

Министерство образования Российской Федерации  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)

**В. И. Сологаев**

**ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ  
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ  
В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Омск  
Издательство СибАДИ  
2002

УДК 69.034.96  
ББК 38.621  
С 60

Рецензенты:

д-р геогр. наук, профессор И.В. Карнацевич  
(Омский государственный аграрный университет),  
канд. техн. наук Р.Ш. Абжалимов  
(ОАО «Омскгражданпроект»)

Монография одобрена редакционно-издательским советом СибАДИ.  
Все авторские права защищены.

**Сологаев В.И.**

Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: Монография. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. – 416 с.  
ISBN 5-93204-080-7

Рассмотрены прогнозы подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования в технологии городского строительства с использованием различных методов и средств защиты от подтопления. Фильтрационные расчёты в городском строительстве даны с новыми решениями, учитывающими техногенные изменения гидрогеологии города. Представлен метод компьютерного моделирования защиты от подтопления — метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel). Теория проиллюстрирована многочисленными примерами.

Книга может быть полезна в производственной и научно-исследовательской деятельности специалистам по борьбе с подтоплением, строителям, изыскателям, гидрогеологам, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Табл. 23. Ил. 186. Библиогр.: 352 назв.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	6
Введение .....	8
 <i>Глава 1</i>	
<b>Защита от подтопления в городском строительстве .....</b>	<b>14</b>
§ 1. Подтопление городов и населенных пунктов .....	14
§ 2. Климат и город .....	25
§ 3. Причины, источники и последствия подтопления застройки .....	31
§ 4. Методы и средства защиты от подтопления .....	37
§ 5. Стадии жизненного цикла систем защиты от подтопления .....	55
§ 6. Строительный водоотлив, водопонижение и дренаж .....	59
 <i>Глава 2</i>	
<b>Закономерности движения воды и воздуха в пористых средах .....</b>	<b>69</b>
§ 7. Закономерности фильтрации воды и воздуха .....	70
§ 8. Дифференциальные уравнения фильтрации воды и воздуха .....	88
§ 9. Дифференциальные уравнения фильтрационной консолидации .....	100
§ 10. Закон диффузии влаги и дифференциальные уравнения влаготеплопереноса .....	102
§ 11. Электроосмос и его дифференциальные уравнения .....	104
 <i>Глава 3</i>	
<b>Фильтрационные расчеты в городском строительстве .....</b>	<b>109</b>
§ 12. Технология фильтрационных расчётов .....	109
§ 13. Схематизация области фильтрации .....	112
§ 14. Обратные фильтрационные задачи .....	129
§ 15. Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований .....	131
§ 16. Прогнозы подтопления в городском строительстве .....	150
§ 17. Фильтрационные расчеты водоотлива, водопонижения и дренажа .....	200
 <i>Глава 4</i>	
<b>Компьютерное моделирование при защите от подтопления .....</b>	<b>237</b>
§ 18. Обзор методов моделирования фильтрации .....	237
§ 19. Метод автора МКР-Excel и автоматизация моделирования .....	248
§ 20. Выбор и построение МКР-сетки .....	270
§ 21. Критерии устойчивости нестационарных моделей .....	276
§ 22. Формулы моделирования МКР-Excel .....	279
§ 23. Разные технологические приемы моделирования МКР-Excel .....	306

## Глава 5

<b>Практика моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel</b> .....	317
§ 24. Схематизационное моделирование фильтрации .....	317
§ 25. Моделирование обратных фильтрационных задач .....	323
§ 26. Моделирование изменения проницаемости грунтов оснований .....	332
§ 27. Прогнозное моделирование подтопления .....	336
§ 28. Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа .....	352
<b>Заключительные выводы и рекомендации</b> .....	381
<b>Приложения</b> .....	383
Приложение 1. Эмпирические зависимости по испаряемости .....	383
Приложение 2. Макропрограмма ForSurfer() .....	386
Приложение 3. Макропрограмма ДопЛистСсыл() .....	388
Приложение 4. Аналогия физических процессов .....	389
Приложение 5. Исправления справочного пособия к СНиП .....	390
<b>Литература</b> .....	392
<b>Буквенные обозначения</b> .....	408
<b>Именной указатель</b> .....	411
<b>Предметный указатель</b> .....	414
<b>Перечень примеров</b>	
Пример 1. Определение подтопления по норме осушения .....	15
Пример 2. Местная корректировка норм осушения .....	15
Пример 3. Микрорайон с искусственным озером. ....	18
Пример 4. Гидрогеологические условия г. Омска .....	20
Пример 5. Подтопление Омска .....	21
Пример 6. Подтопление Омской области .....	23
Пример 7. Испаряемость с поверхности асфальта .....	28
Пример 8. Уменьшение испаряемости в тени .....	29
Пример 9. Уменьшение испаряемости в безветренной зоне застройки .....	30
Пример 10. Климат и подтопление застройки .....	32
Пример 11. Защита от барражного эффекта .....	33
Пример 12. Ущерб от подтопления .....	36
Пример 13. Стена в грунте .....	40
Пример 14. Профилактический дренаж пруда .....	41
Пример 15. Элементы вентиляционного дренажа .....	42
Пример 16. Кольцевой (контурный) дренаж .....	48
Пример 17. Пластовый дренаж .....	51
Пример 18. Устройство лучевого дренажа .....	53
Пример 19. Проектирование пристенного дренажа .....	56
Пример 20. Проектирование дренажа (продолжение) .....	57
Пример 21. Вакуумная водопонизительная система в Омске .....	62
Пример 22. Строительство пристенного дренажа .....	65

Пример 23. Пластовый дренаж (при реконструкции здания) .....	68
Пример 24. Пористость грунта .....	71
Пример 25. О водоотдаче грунта .....	71
Пример 26. Коэффициент упруго-пластической водоотдачи .....	74
Пример 27. Напорные и безнапорные потоки .....	75
Пример 28. Живое сечение потока .....	75
Пример 29. Горизонтальная поверхность водоупора .....	77
Пример 30. Температурная поправка для коэффициента фильтрации .....	79
Пример 31. Опыты по воздухопроницаемости влажного песка .....	85
Пример 32. Электроосмотическая водоотдача грунта .....	105
Пример 33. Критерий линеаризации по С.Ф. Аверьянову .....	114
Пример 34. Критерий А.Ж. Муфтахова по гидравлической теории .....	116
Пример 35. Область фильтрации и граничные условия .....	118
Пример 36. Очаг подтопления от затопленного подвала .....	121
Пример 37. Об осреднении проницаемости грунта .....	125
Пример 38. Принцип суперпозиции для двух скважин .....	128
Пример 39. Решение нелинейной обратной задачи .....	130
Пример 40. Коэффициент фильтрации уплотненного песка .....	134
Пример 41. Зона максимально уплотненного грунта около сваи .....	146
Пример 42. Верховодка на естественных и техногенных линзах .....	153
Пример 43. Проверка формул для верховодки на вытянутой линзе .....	159
Пример 44. Проверка формул для верховодки на круглой линзе .....	162
Пример 45. Подпор станцией метро грунтовых вод .....	193
Пример 46. Барражный эффект от группы зданий .....	196
Пример 47. Подпор станцией метро напорных подземных вод .....	199
Пример 48. Водоотлив из котлована со «стеной в грунте» .....	216
Пример 49. «Стена в грунте» с относительным водоупором .....	218
Пример 50. Водоотлив из котлована со свайным креплением .....	221
Пример 51. Расчет дренажа с учетом свайных фундаментов .....	231
Пример 52. Моделирование фильтрации в грунтовом лотке .....	238
Пример 53. Аналоговое компьютерное моделирование .....	241
Пример 54. Моделирование одномерной стационарной фильтрации .....	250
Пример 55. VBA-программа с OLE Automation (ActiveX) .....	256
Пример 56. Моделирование пристенного дренажа в напорном пласте .....	258
Пример 57. Неравномерный шаг сетки по В.С. Усенко .....	273
Пример 58. Моделирование подпора УГВ речной поймы .....	280
Пример 59. Метод прогонки по неявной схеме в МКР-Excel .....	312
Пример 60. Схематизация области фильтрации для моделирования .....	320
Пример 61. Моделирование обратной инверсной задачи .....	323
Пример 62. Моделирование фильтрационной консолидации грунта .....	333
Пример 63. Моделирование стационарной верховодки на вытянутой линзе .....	339
Пример 64. Прогнозное моделирование подтопления .....	347
Пример 65. Моделирование водоотлива из дренажной штольни .....	353
Пример 66. Моделирование сопротивления электрода в грунте .....	363
Пример 67. Моделирование строительного водопонижения .....	369
Пример 68. Трехмерное моделирование лучевого дренажа .....	378

*Посвящается профессору  
Ахмету Жаляевичу Муфтахову*

## **Предисловие**

В монографии рассмотрены прогнозы подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования в городском строительстве с использованием различных методов и средств защиты от подтопления. Аналитические методы расчета неразрывно связаны с компьютерным моделированием по методике автора.

Фильтрационные расчеты и моделирование защиты от подтопления представлены с новыми решениями, учитывающими техногенные изменения гидрогеологии города, микроклимата городской застройки, в условиях малой мощности грунтовых вод, что обуславливает нелинейность решаемых задач. Применение изложенных методик, а особенно компьютерного моделирования МКР-Excel (метода конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel), позволяет совершенствовать проектирование защиты от подтопления при инженерной подготовке строительства и реконструкции городских территорий. Разработанные методики полезны при технологическом проектировании строительного водоотлива, водопонижения и дренажа.

Теория проиллюстрирована многочисленными примерами. Текст, рисунки и графики дополняют друг друга. В приложениях даны зависимости по испаряемости, листинги программных алгоритмов и другие материалы.

Авторский курс дистанционного обучения «Защита от подтопления в городском строительстве» доступен через сеть Internet по адресу:

[www.sibadi.omsk.ru](http://www.sibadi.omsk.ru)

Последовательно рассмотрена тесная взаимосвязь технологии городского строительства с проблемой подтопления городов. Весьма важно достоверно спрогнозировать параметры технологических процессов строительного водоотлива, водопонижения и дренирования, других защитных мероприятий от подтопления. Большие погрешности линеаризации исходных дифференциальных уравнений фильтрации грунтовых вод малой мощности побуждают полностью переходить на компьютерное моделирование вышеназванных технологических процессов. Это направление исследований избрано автором в качестве наиболее перспективного в технологии городского строительства при защите от подтопления.

Другим интересным направлением исследований является моделирование влияния технологических процессов городского строительства на гидрогеологическую среду городов, в том числе при использовании различных методов и средств защиты от подтопления.

Монография разработана последователем научной школы профессора А.Ж. Муфтахова (ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, в настоящее время ВНИИ ВОДГЕО Госстроя России). В ней развиты перспективные идеи, обсуждавшиеся с Ахметом Жалаяевичем еще в период 1980-х годов. Она является итогом исследований автора за период более 20 лет, выполненных во ВНИИ ВОДГЕО и СибАДИ.

Монография направлена на совершенствование методик фильтрационных расчетов и компьютерного моделирования при защите от подтопления в городском строительстве. Особое значение она имеет для городов, расположенных на равнинах, с близким залеганием водоупоров и подверженных подтоплению.

Автор применил следующие методы исследований: аналитические решения (интегральные преобразования, конформные отображения, методы фрагментов, фильтрационных сопротивлений и последовательных приближений), численный эксперимент (компьютерное моделирование по методике автора МКР-Excel), натурные обследования, лабораторные опыты и полевые наблюдения.

Научная новизна содержится в аналитических решениях для фильтрационных расчетов подтопления, водопонижения и дренирования в технологии городского строительства, учитывающих техногенные изменения проницаемости грунтов оснований и микроклимата городской застройки в условиях грунтовых вод малой мощности. Представлена новая технология компьютерного моделирования МКР-Excel для стационарных и нестационарных процессов фильтрации воды, воздуха, влаготеплопереноса, электроосмоса, консолидации грунтов.

Методика автора получила практическую реализацию при разработке защиты от подтопления г. Омска. Авторские разработки использованы ОАО «Омскгражданпроект» при разработке технико-экономического обоснования защиты от подтопления г. Омска, а также трестом инженерно-строительных изысканий ОАО «ОмскТИСИЗ» при гидрогеологических изысканиях для защиты от подтопления населенных пунктов Омской области и при разработке компьютерных геоинформационных систем подземных вод г. Омска.

Автор выражает признательность всем коллегам по работе из СибАДИ, ВНИИ ВОДГЕО, государственных, научно-исследовательских, строительных, проектных, изыскательских и природоохранных организаций, которые оказали помощь и поддержку в работе. Обсуждение результатов работы, а подчас и дискуссии, были весьма полезны и направлены на улучшение ее содержания.

Особую благодарность автор приносит своим родителям — Наталье Алексеевне и Ивану Ивановичу Сологаевым за постоянное внимание, помощь и поддержку в ходе кропотливой исследовательской работы.

## Введение

Процесс подтопления охватил в настоящее время большинство городов мира, расположенных на равнинах [70]. Более 70 % поверхностных грунтов Земли сложено породами осадочного происхождения, главным образом четвертичного возраста [128]: песками, супесями, суглинками и глинами. Большинство городов подтоплено грунтовыми водами, приуроченными к этим породам. Особенно подвержены подтоплению города с близким расположением водоупорных пород [52].

Защиту от подтопления применяют издавна. Истории многих древних цивилизаций начинались с дренажей: осушение болот долины Нила 6000 лет назад, осушение междуречья Тигра и Евфрата 5000 лет назад, осушение пойм Янцзы и Хуанхэ 4000 лет назад [66]. Первые трубчатые дренажи появились ещё до нашей эры. В средние века в Западной Европе о дренаже забыли, и лишь с 1650 г. в Англии стали устраивать дренажи из дерева, фашии и камня [321]. Дренаж крепостей и улиц древнего Новгорода был устроен в XI в. [292].

До середины XIX в. дренажи проектировали интуитивно, исходя из имеющегося практического опыта. В 1856 г. инженер Анри Дарси (H. Darcy) опубликовал результаты исследований фильтрации воды через пески в связи с устройством колодезного водоснабжения г. Дижона [331]. Так был открыт закон фильтрации (закон Дарси) — основа современных фильтрационных расчётов и моделирования защиты от подтопления. Это типичный феноменологический закон, базирующийся на экспериментах. К подобным линейным законам относятся закон теплопроводности Фурье, закон диффузии Фика и закон электропроводности Ома [305]. Подобие этих законов позволяет совместно использовать решения дифференциальных уравнений движения и моделировать по аналогии.

Отечественные ученые внесли значительный вклад в развитие теории фильтрации. Профессор Н.Е. Жуковский в 1889 г. опубликовал работу «Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод» с выводом общих дифференциальных уравнений фильтрации [82]. Книги академика Н.Н. Павловского [186] вышли в свет в 1920-30-е гг., заложив фундамент отечественной школы фильтрации и моделирования.

В период 1930-40-х гг. в СССР решали преимущественно стационарные (установившиеся) фильтрационные задачи с применением метода конформных отображений. Этот метод позволял решать двухмерные задачи по фильтрации напорных и безнапорных подземных вод. Такие задачи называли гидродинамическими или гидромеханическими [210]. Гидромеханический метод в теории фильтрации разработал Н.Н. Павловский [186, 187], в дальнейшем этот метод развивали В.И. Аравин, С.Н. Нумеров, В.В. Ведерников и другие отечественные ученые [12].



С конца 1940-х — начала 1950-х гг. расчеты начали дополнять решениями нестационарной фильтрации, преимущественно в рамках так называемой гидравлической теории фильтрации с использованием предпосылки Дюпюи, когда фильтрационный напор упрощенно считают не зависящим от вертикальной координаты [199]. В этих решениях широко использовали математическую аналогию теорий фильтрации, теплопроводности и диффузии. Это позволило распространять имеющиеся решения из одной дисциплины в другую. Наиболее продуктивным оказался операторный метод решения дифференциальных уравнений фильтрации [210]. Расчетные методики с гидравлическими решениями создали С.К. Абрамов, С.Ф. Аверьянов, В.И. Аравин, В.А. Барон, Ф.М. Бочеввер, Н.Н. Веригин, Е.С. Дзекцер, Н.П. Куранов, Н.Н. Лапшин, В.А. Мироненко, А.Ж. Муфтахов, Р.А. Нагуманов, В.П. Недрига, С.Н. Нумеров, П.Я. Полубаринова-Кочина, Г.А. Разумов, А.В. Романов, В.К. Рудаков, В.С. Саркисян, В.С. Усенко, И.А. Чарный, Э.Б. Чекалюк, Б.С. Шержуков, А.П. Шевчик, В.Н. Щелкачев, В.М. Шестаков, Ц.Н. Шкинчис, Д.Ф. Шульгин и другие.

В 1940-60-х гг. вопросами теории и практики защиты от подтопления в промышленном и городском строительстве занимался профессор С.К. Абрамов (ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР). В 1960-90-х гг. происходила наработка аналитических решений по защите от подтопления городов. В 1975 г. А.Ж.Муфтахов разработал гидродинамические основы прогнозов подтопления и фильтрационных расчетов защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях [156]. В 1986 г. в СССР впервые был опубликован СНиП «Инженерная защита территории от затопления и подтопления» [239]. В 1991 г. вышло справочное пособие к СНиП [208], содержащее аналитические решения по теории фильтрации. Данное справочное пособие к СНиП было разработано группой ученых под руководством профессора А.Ж. Муфтахова (ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР). Кроме фильтрационных расчетов в пособие к СНиП были включены разделы по предупредительным мероприятиям, конструкциям дренажей и их гидравлическому расчету. С 1990-х гг. развитие научной школы ВНИИ ВОДГЕО продолжил профессор Н.П. Куранов [120].

Оригинальный градостроительный подход к дренированию территорий был разработан Б.М. Дегтяревым [70]. Данный автор получил известность также благодаря своим многочисленным изобретениям по вакуумным дренажам.

Интересные дополнительные исследования по проблеме подтопления проведены В.И. Федоровым [293]. Указанный автор на основе более чем 30-летних исследований дальневосточных городов России пришел к выводу о существенной роли в подтоплении разуплотненных обратных засыпок подземных сооружений и фундаментов. По данным В.И. Федорова, подтопле-

ние городов может происходить лишь от инфильтрации атмосферных вод в обратные засыпки траншей инженерных сетей и котлованов зданий, то есть даже при отсутствии утечек из водонесущих коммуникаций.

За рубежом теория фильтрационных расчетов была разработана несколько раньше, чем в России. В 1857 г. Жорж Дюпюи (J. Dupuit) представил свой мемуар по динамике подземных вод, который более известен по второму изданию 1863 г. [333], где дал основы гидравлической теории движения грунтовых вод [199]. Развитие этой теории получило в трудах другого французского ученого Жозефа Буссинеска (J. Boussinesq) в конце XIX — начале XX веков [330]. Интересно, что данная теория до сих пор остается основной при фильтрационных расчетах и моделировании защиты от подтопления. Австрийский ученый Филипп Форхгеймер (Ph. Forchheimer) обобщил гидравлическую теорию Дюпюи [334; 299]. Ученый из США М. Маскет опубликовал в 1937 г. крупную работу по теории фильтрации, которая была переведена на русский язык в 1949 г. [140]. Ему удалось, в частности, получить точное решение для гидродинамически несовершенной скважины (гидрогеологи нашей страны обычно используют поправки Н.Н. Веригина [150]). Более полный обзор зарубежных работ представлен в книгах [12; 39; 187; 199; 210].

Моделирование защиты от подтопления в России и СССР началось с работы Н.Н. Павловского 1922 г. [187], предложившего метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Численный метод конечных разностей в гидрогеологии начал применять Г.Н. Каменский с 1943 г. [91]. Подробный обзор становления моделирования в нашей стране и за рубежом приведен в монографии И.К. Гавич «Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии» [50]. Значительный вклад в развитие отечественного моделирования внесли В.И. Аравин, И.К. Гавич, Н.И. Дружинин, И.Е. Жернов, Г.Н. Каменский, А.В. Лебедев, В.С. Лукьянов, Е.А. Ломакин, В.А. Мироненко, С.Н. Нумеров, Д.Ю. Панов, И.С. Пашковский, А.А. Самарский, П.Ф. Фильчаков, В.М. Шестаков и другие.

За рубежом наиболее существенные работы по моделированию фильтрации опубликовали М.П. Андерсон (M.P. Anderson), Я. Бэр (J. Bear), К.А. Бреббиа (C.A. Brebbia), Дж. Ф. Ванг (J.F. Wang), Т.В. Громадка II (T.V. Hromadka II), Р.Дж.М. Де Уист (R.J.M. De Wiest), О. Зенкевич (O. Zienkiewicz), У. Карплюс (W. Karplus), Л.Ф. Коников (L.F. Konikow), С.П. Ларсон (S.P. Larson), Ч. Лей (C. Lai), Г.П. Леннон (G.P. Lennon), Дж.А. Лиггетт (J.A. Liggett), Л. Лукнер (L. Luckner), П.Л.Ф. Лью (P.L.F. Liu), Т. Нарисимхан (T. Narisimhan), Г.Ф. Пиндер (G.F. Pinder), Д.В. Писмен (D.W. Peaceman), К.Р. Раштон (K.R. Rushton), И. Ремсон (I. Remson), Р.В. Соутвелл (R.V. Southwell), Р.В. Столлмен (R.W. Stallman), П.К. Трескотт (P.C. Trescott), Д.К. Тодд (D.K. Todd), Х.С. Хеле-Шоу (H.S. Hele-Shaw), Г.М. Хорнбергер (G.M. Hornberger), И.К. Чанг (Y.K. Cheung) и другие.

В настоящее время моделирование фильтрации подземных вод при защите от подтопления во всём мире реализуется численно на ЭВМ (компьютерное моделирование), что считается наиболее чистым способом. Аналоговое моделирование устарело, установки типа ЭГДА, БУСЭ и УСМ уже давно не выпускаются промышленностью. Физическое моделирование фильтрации в грунтовых лотках играет подчинённую роль и применяется в основном для изучения частных, локальных эффектов фильтрации.

В подавляющем большинстве публикаций по численному моделированию существует проблема сложности освоения методик. Даже если текст программы приведён, авторы фактически подразумевают, чтобы читатель дополнительно овладел прикладной математикой и профессиональным программированием. Однако это под силу далеко не каждому исследователю в прикладных науках, желающему применить моделирование в своей работе. Это сильно тормозит широкое внедрение компьютерного моделирования. Поэтому нами разработана и представлена новая технология численного моделирования фильтрации. Применен метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel, получивший название МКР-Excel. Новая методика моделирования вобрала в себя лучшие черты традиционных технологий. Она проста как аналоговое моделирование, но не имеет его физических ограничений. Она точна и практически неограниченно расширяема, поскольку оперирует с числами, а не с физическими характеристиками.

Технология моделирования фильтрации в электронных таблицах МКР-Excel напоминает дискретное аналоговое моделирование на сеточных электроинтеграторах резисторного типа. Это позволяет использовать наработки ставшими классическими книг по аналоговому моделированию геофильтрации И.К. Гавич, И.Е. Жернова, Л. Лукнера, В.А. Мироненко, В.М. Шестакова и других авторов. С другой стороны, таблицы Excel имеют массовое распространение и обладают встроенным языком макропрограммирования Visual Basic for Application (VBA). Исследователи могут эволюционно наращивать возможности по автоматизации моделирования в процессе накопления опыта (это было проблематично на аналоговых моделях). Аудитория пользователей Excel огромна, легко налаживать информационный обмен и быстро обучать моделированию. Основные приемы моделирования с помощью МКР-Excel приведены достаточно полно в данной монографии.

Преподавание теории фильтрации по защите от подтопления в университетах и вузах СССР и России всегда проводилось на должном уровне. Монографические учебные пособия В.И. Аравина и С.Н. Нумерова [12], П.Я. Полубариновой-Кочиной [198], появившиеся в начале 1950-х гг., оказали огромное влияние на подготовку специалистов по борьбе с подтоплением. Учебники по гидрогеодинамике И.К. Гавич [49], В.А. Мироненко [152] и В.М. Шестакова [314] взаимно дополнили друг друга.

Подтопление влияет на технологию городского строительства. Строительные процессы значительно усложняются на подтопленных городских территориях и отдельных площадках строительства, при проведении земляных работ, реконструкции подземной среды [102; 281; 282; 312].

В России водопонижение с помощью скважин начали применять в конце XIX века. До этого в котлованах, траншеях и шахтах применяли водоотлив насосами. В 1920-30-х гг. профессор И.П. Кусакин разработал гидравлическую методику расчета для обоснования проектирования искусственного водопонижения [122]. В 1940-50-х гг. в нашей стране получили распространение иглофильтровый и эжекторный способы водопонижения. Методики расчета строительного водопонижения в 1950-60-х гг. опубликовали С.К. Абрамов, С.Ф. Аверьянов, В.И. Аравин, П.П. Аргунов, Ю.П. Борисов, Н.Н. Веригин, В.М. Григорьев, Г.М. Мариупольский, С.Н. Нумеров, А.В. Романов, И.А. Чарный, В.М. Шестаков. В 1970-90-х гг. расчетные методики для установок вакуумного водопонижения представили Р.Н. Арутюнян, К.С. Боголюбов, Б.С. Краковский и другие.

За рубежом вопросами фильтрационных расчетов при строительном водопонижении занимались А. Тим (A. Thiem), В. Зихардт (W. Sichardt), К. Терцаги (K. Terzaghi), А. Кезди (A. Kézdi), И. Шульце (J. Schultze), С. Ирмей (S. Irmay), Ф. Форхгеймер (Ph. Forchheimer), Д.Н. Дитц (D.N. Dietz), В. Кнаупе (W. Knaupe), В. Кирилейс (W. Kyrieleis), Л. Казагранде (L. Casagrande), Р. Пек (R. Peck) и другие.

Обзор публикаций показывает, что в подавляющем большинстве методик фильтрационных расчетов по защите от подтопления у различных авторов отсутствует учет техногенных изменений проницаемости грунтов оснований и особенностей тепловлагообменных ресурсов климата городов. Исключение составляют лишь отдельные работы. Существующие методики фильтрационных расчетов при малой мощности грунтовых вод и в первоначально необводненных грунтах [210] охватывают не все важные случаи подтопления и дренирования. Например, неизвестно точное решение о радиальном растекании языка по водоупору в необводненных грунтах, а также другие случаи, которые рассмотрены в нашей работе. Точные аналитические решения важны как для расчета, так и для моделирования фильтрации.

Техногенные изменения проницаемости грунтов оснований и фильтрационных неоднородностей рассматривали А.Ж. Муфтахов [205], В.К. Рудаков [151], В.П. Пилатовский [191], В.С. Спорышев [268], М.И. Швидлер [309; 311], Г. Шнейдер [345; 346; 347], Р.Г. Поуп и К.С. Хоу [344]. В этих работах рассмотрены или частные случаи плановой неоднородности (А.Ж. Муфтахов, В.К. Рудаков, В.П. Пилатовский, В.С. Спорышев, Г. Шнейдер), или же только влияние свайных фундаментов на потоки грунтовых вод (Р.Г. Поуп и К.С. Хоу), но без учета уплотнения грунта вблизи свай и т.д.

Стохастические подходы к прогнозам подтопления исследовали В.К. Рудаков, С.П. Поздняков, В.Н. Шестаков [317]. М.И. Швидлер [310; 311] рассмотрел статистические модели неоднородностей, равномерно распределенных по грунтовому пространству. М.В. Болгов, Е.С. Дзекцер и В.Ф. Писаренко вероятностно-статистически проанализировали подтопление застраиваемых территорий [28]. Большое количество работ такого направления по теории фильтрации перечислено в [210].

С каждым годом увеличивается степень изученности инженерной толщи грунтов оснований городов. Городская гидрогеологическая среда становится всё более детерминированной техногенной системой. Поэтому в нашей работе все расчеты и моделирование, следуя И.К. Гавич [50], рассмотрены для детерминированных систем.

По учету техногенного изменения микроклимата городов при защите от подтопления публикаций очень мало. Есть частные случаи учета различных климатических факторов. В справочном пособии к СНиП по защите от подтопления [208] дана таблица техногенной дополнительной инфильтрации влаги на территориях городов в зависимости от климатических зон увлажнения. С.Ф. Аверьянов [6] построил расчетные зависимости фильтрации воды из каналов с учетом испарения. Ряд работ такой же направленности перечислены в монографии П.Я. Полубариновой-Кочиной [199].

Достаточно актуальным является совершенствование методов фильтрационных расчетов и компьютерного моделирования по защите от подтопления в городском строительстве, предпринятое в нашей работе.

Разработанные методики позволяют прогнозировать параметры технологических процессов водоотлива, водопонижения и дренирования, совершенствовать их технологии, исследовать эффективность применения технических средств защиты от подтопления (водоотлива, водопонижения и дренажа) путем математического моделирования по методике автора МКР-Excel, повысить качество определения фильтрационных параметров с помощью имитационного моделирования МКР-Excel, необходимое для технологического проектирования упомянутых технических средств, разрабатывать проекты организации строительного водоотлива, водопонижения и дренажа на крупных народно-хозяйственных объектах и комплексах и совершенствовать календарное планирование, развивать информационные технологии организации строительства, повысить надежность возведения зданий и сооружений и их реконструкции в условиях подтопления, разрабатывать комплексную механизацию технологических процессов по защите от подтопления, исследовать влияние этих технологических процессов на окружающую среду в городах.

Автор стремился восполнить методические пробелы теории фильтрации в технологии городского строительства при защите от подтопления.

## *Глава 1*

### **Защита от подтопления в городском строительстве**

Потребность в защите от подтопления возникает в связи с проблемой подтопления. Поэтому вначале рассмотрено, что такое подтопление в городском строительстве и нормы осушения.

Города преобразуют геологическую среду приповерхностного слоя Земли. Далее следует очерк по гидрогеологии, климату и подтоплению городов, причины, источники и последствия подтопления застройки.

Методы и средства защиты от подтопления изложены с классификациями по различным признакам, конструктивными решениями и стадиями жизненного цикла. Представлены полезные зависимости, таблицы и примеры.

#### *§ 1. Подтопление городов и населенных пунктов*

Подтопление в городах — это повышение уровня подземных вод (УПВ), приводящее в отдельности или совокупности:

- к аварийно-катастрофическому,
- антисанитарно-дискомфортному,
- экономически-убыточному

состоянию зданий, сооружений, коммуникаций и других элементов городской территории (дорог, парков и т.д.).

В технологии городского строительства [281; 282] подтопление препятствует проведению земляных работ, устройству фундаментов, подземных сооружений. Оно приводит к дополнительным затратам труда и времени на борьбу с ним, удорожает строительство. Оно может вызвать опасные геологические процессы в виде оплываний и обрушений стенок котлованов, траншей и выработок. Близлежащие к строительному участку здания и сооружения могут получить недопустимые деформации. Перечисленные особенности надо заранее предвидеть. С этой целью составляют прогнозы подтопления и дренирования, а также рассчитывают возможные неблагоприятные последствия и от подтопления, и от дренирования.

По СНиП [239] подтопление застройки определяется с помощью критерия «норма осушения».

Нормы осушения — это глубины понижения уровня подземных вод, считая от проектной отметки территории, которые при проектировании защиты от подтопления принимаются в зависимости от характера застройки защищаемой территории в соответствии с табл. 1 СНиП [239]. Таким образом, нормы осушения по СНиП [239] являются обобщенными показателями подтопления, осредненными по территории.

Таблица 1 [239]

Характер застройки	Норма осушения, м
1. Территории крупных промышленных зон и комплексов	До 15
2. Территории городских промышленных зон, коммунально-складских зон, центры крупнейших, крупных и больших городов	5
3. Селитебные территории городов и сельских населённых пунктов	2
4. Территории спортивно-оздоровительных объектов и учреждений обслуживания зон отдыха	1
5. Территории зон рекреационного и защитного назначения (зелёные насаждения общего пользования, парки, санитарно-защитные зоны)	1

### Пример 1. Определение подтопления по норме осушения

Рассмотрим пример определения, подтоплен ли жилой район города (селитебная территория), с помощью критерия «норма осушения». Пусть, по данным многолетних наблюдений, УГВ (уровень грунтовых вод) залегает в течение года в данном районе не ближе 2 метров от поверхности. Тогда согласно п. 3 табл. 1 данная территория не подтоплена, так как норма осушения соблюдена.

### Пример 2. Местная корректировка норм осушения

В некоторых городах нормы осушения увеличены решениями местных законодательных органов. Например, московские городские строительные нормы (МГСН 1.01-98, часть 2, разд. 11, автор Б.М. Дегтярев) определяют, что «...на территориях жилых районов с высоким уровнем грунтовых вод норма осушения устанавливается на 3 м от проектных отметок поверхности земли. Для понижения уровней грунтовых вод до нормы осушения территории подтапливаемых микрорайонов должны быть оборудованы дренажной сетью закрытого типа. Возможна локальная защита отдельных зданий и сооружений, и, в этом случае, норма осушения на прилегающей площади устанавливается на 2 м от проектных отметок поверхности земли...».

Следует заметить, что при локальной защите зданий и сооружений справочное пособие к СНиП [208] рекомендует понижать УПВ не менее 0,5 метра ниже пола подвала, основания сооружения.

В технологии строительных процессов [281; 282] при проведении земляных работ, устройстве фундаментов и подземных сооружений

понижение УПВ можно принимать не менее 0,5 метра ниже отметок дна котлованов и траншей [250]. В строительных нормах по устройству оснований и фундаментов [235] требуемое понижение УПВ предложено определять по критериям:

- допустимого повышения уровня безнапорных грунтовых вод за время аварийного отключения водопонижительной системы;
- исключения прорывов напорных подземных вод в котлован или заглубленное сооружение, обеспечивая устойчивость грунтов в основании сооружения.

Гидрогеология — это наука о подземных водах (ПВ), изучающая их состав и свойства, происхождение, закономерности распространения и движения, а также взаимодействие с горными породами [30]. В данной книге рассмотрен раздел гидрогеологии городов, касающийся динамики подземных вод (ДПВ), их фильтрации (движения) при защите от подтопления. Этот раздел гидрогеологии также называют гидрогеодинамикой, геофильтрацией [49, 126, 314]. Однако в городах подземные воды просачиваются не только через геологические тела (грунты), но и сквозь искусственные строительные материалы: бетоны, кирпичную кладку, щебеночные подсыпки и др. Поэтому в сфере городского строительства и хозяйства этот раздел гидрогеологии можно называть просто фильтрацией ПВ или ДПВ, а расчёты — фильтрационными.

Подземные воды (ПВ) подразделяются на грунтовые (ГВ), напорные (НПВ) и сезонную верховодку (СВ). Простая классификация подземных вод по Ф.М. Саваренскому (1939) показана на рис. 1.

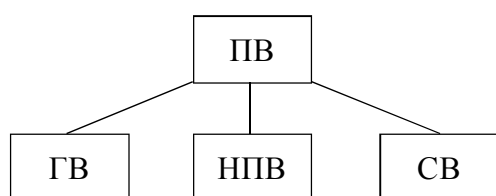


Рис. 1. Классификация подземных вод

Грунтовые воды имеют свободную поверхность (уровень грунтовых вод — УГВ), сообщаются с атмосферой через зону аэрации и считаются безнапорными (рис. 2). Снизу они поддерживаются водоупорными породами (например, глинами). Водонасыщенный грунт от водоупора до УГВ в природном состоянии называется естественной мощностью  $h_e$ . На поверхности УГВ давление равно атмосферному  $p_{атм}$ . Подтопление городов происходит в основном при повышении УГВ вследствие разных причин. УГВ подвержен сезонным колебаниям.

Напорные подземные воды сверху и снизу перекрыты водоупорными породами и имеют пьезометрический напор  $h_p$  до отметки УНПВ (см. рис. 2). УНПВ — это уровень напорных подземных вод. Скважина, пробуренная до НПВ, вскрывает их и заполняется поднимающимся столбом воды высотой  $h_p$ .



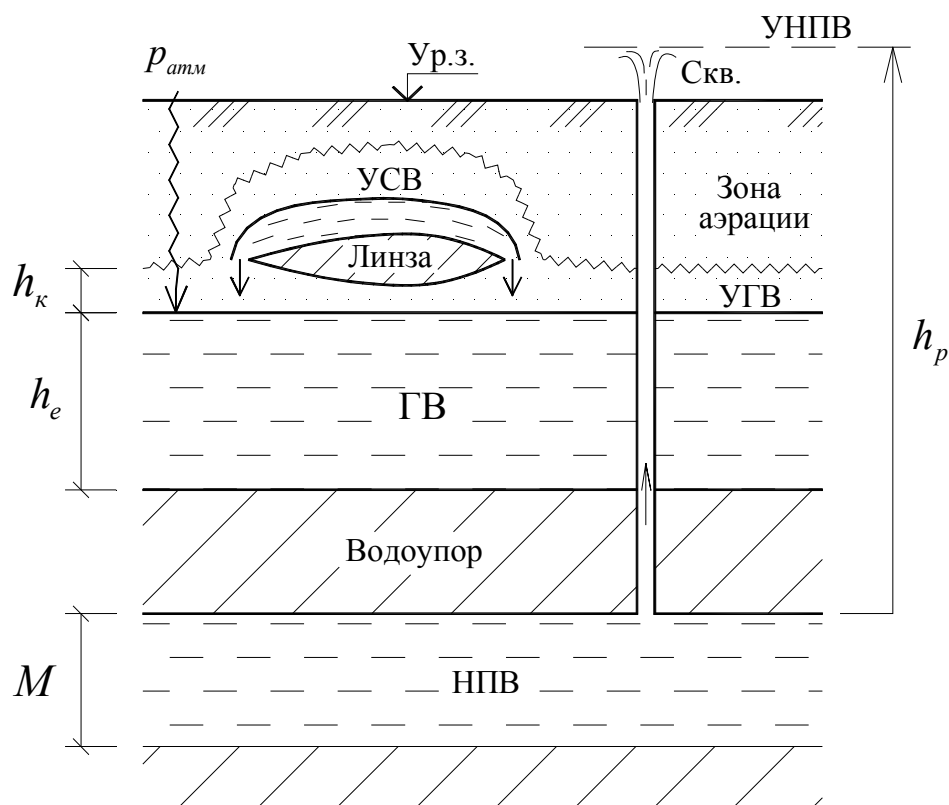


Рис. 2. Схема гидрогеологического разреза

— это и есть пьезометрический напор. Если напор  $h_p$  больше глубины скважины, то она начинает фонтанировать. Расстояние от водоупорной кровли до подошвы называется мощностью водоносного напорного пласта  $M$  (см. рис. 2) — это толща проницаемого грунта, водонасыщенного и с пьезометрическим напором  $h_p$  выше кровли.

Верховодка — это временно образующаяся подземная вода. Её происхождение может быть естественно-сезонным (природным) и техногенным (антропогенным, под влиянием деятельности человека). Летом верховодка исчезает вследствие испарения в атмосферу и перетекания в нижележащие пласты. На рис. 2 показан случай образования верховодки на линзе — непроницаемом или слабопроницаемом включении в толще грунта — и обозначен уровень сезонной верховодки (УСВ). УСВ — нестандартное обозначение.

Термин УПВ (уровень подземных вод) является общим. Это может быть УГВ, УНПВ или УСВ. При проектировании лучше оговаривать точно, что это за уровень.

Напорные воды по скважине могут подняться вверх, как показано стрелкой. Характерно, что НПВ поступают за пределы своей мощности  $M$ .

Движение воды происходит под влиянием разности напоров. НПВ имеют некоторое избыточное давление  $p_{\text{изб}} = \gamma h_p$ . Здесь  $\gamma$  — удельный вес подземной воды. Поэтому НПВ по скважине стремятся подняться до отметки УНПВ, что на гидрогеологических разрезах принято показывать в виде Г-образной стрелки (см. рис. 2).

Грунтовые воды ведут себя совсем иначе. Они не поднимаются в скважине выше своей мощности  $h_e$  (см. рис. 2). Другими словами, где ГВ залегают, там и продолжают оставаться. Поэтому УГВ может быть измерен по уровню воды (Ур.в.) в открытой скважине, котловане или траншее, так как и УГВ и Ур.в. являются свободными поверхностями, давление на которых равно атмосферному  $p_{\text{атм}}$ . Выше УГВ находится капиллярная зона высотой  $h_k$ .

Верховодка чаще всего является безнапорной, как грунтовые воды. Она может стекать с краёв линзы и может просачиваться вниз через грунт линзы. Верховодка может также появиться на слабопроницаемых прослоях. Она сезонна.

Рассмотренный пример гидрогеологического разреза на рис. 2 не имеет признаков городской застройки. На самом деле здания и сооружения вторгаются в геологическую среду города. При этом может происходить образование новых техногенных горизонтов подземных вод: верховодки, грунтовых и даже напорных ПВ. Многочисленные примеры изменения гидрогеологической среды городов изложены в книгах [70; 163; 164].

Техногенное подтопление начинается в ходе строительства, и продолжается при эксплуатации городских территорий [208]. Изменения гидрогеологии города связаны не только с положением уровня подземных вод. Изменяются фильтрационные свойства водовмещающих пород. Например, грунт может существенно уплотниться и уменьшить свою проницаемость под зданием. Техногенные изменения геологии города происходят стихийно. Однако возможно и целенаправленное создание благоприятной для человека гидрогеологической среды.

### Пример 3. Микрорайон с искусственным озером

На гидрогеологической карте (рис. 3) показан участок местности размером 2х2 км, предназначенный для строительства микрорайона с искусственным озером. Эта прогнозная карта получена компьютерным моделированием по авторской методике МКР-Excel. Градостроительная идея принадлежит кандидату архитектуры П.В. Радищеву [209]. По его замыслу озеро должно дренировать грунтовые воды и испарять их в атмосферу.

Естественный поток ГВ направлен от левого верхнего угла участка к правому нижнему. УГВ показан с помощью гидроизогипс с шагом 0,25 метра по высоте. Гидроизогипсы — это линии равных УГВ (гидроизопьезы — равных УНПВ). Карта иллюстрирует влияние застройки на естественный поток грунтовых вод — здания, как плотины, перегораживают фильтрацию (барражный эффект). Любопытно, что между зданиями и озером дренирующий эффект — понижение УГВ — несколько усиливается.

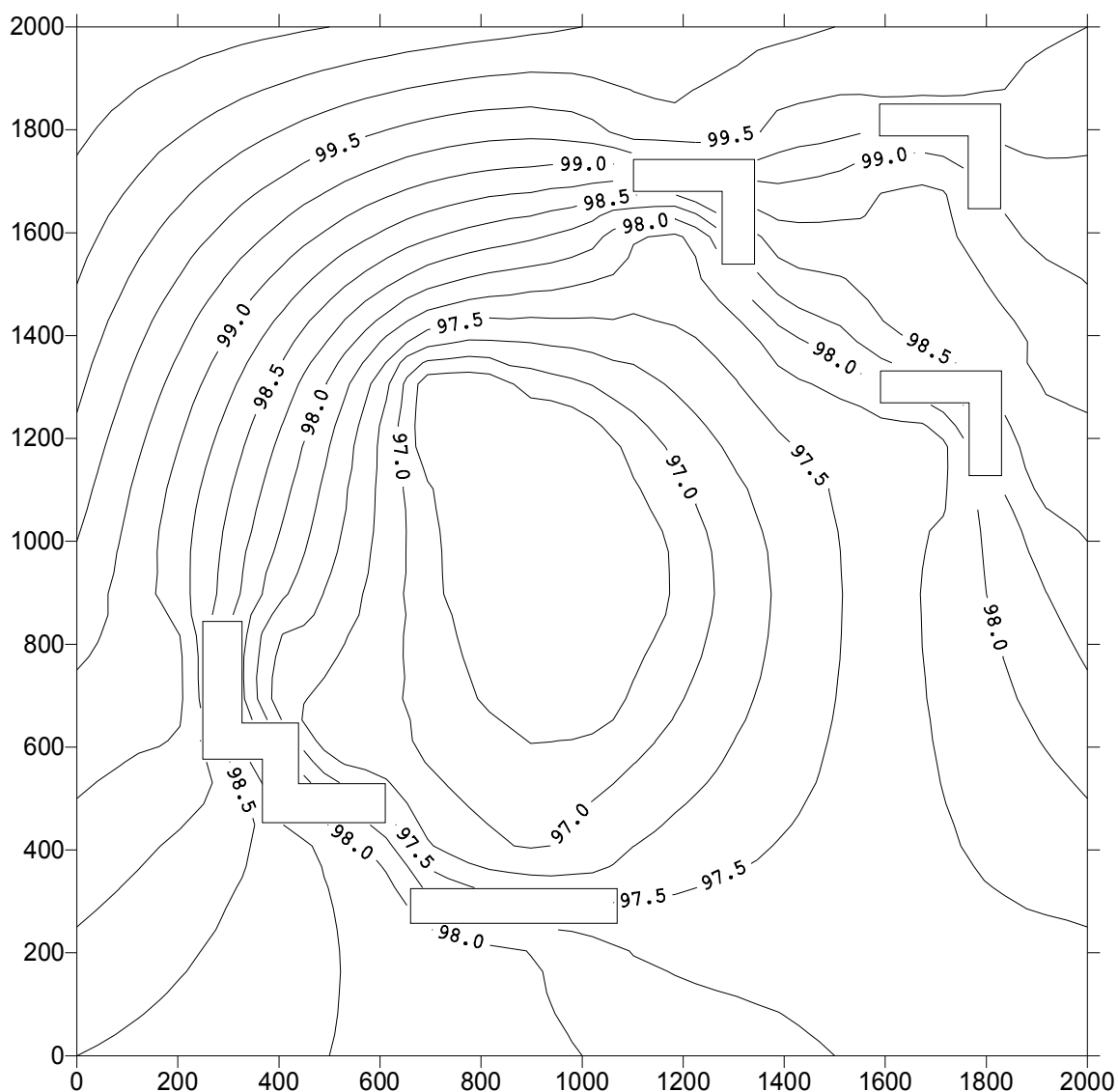


Рис. 3. Гидрогеологическая карта микрорайона с озером

Дренирующие водоемы и водотоки — это искусственные озера, пруды, котлованы, каналы. Пример искусственного озера для дренирования микрорайонной застройки показан на рис. 3. Главными условиями для надежного дренирования являются хорошая проницаемость грунтов прилегающей территории (коэффициент фильтрации  $k > 5 \text{ м/сут}$ ) и гидравлическая связь этих грунтов с водоёмом или водотоком. Хорошо проницаемый искусственный грунт может быть получен путем гидронамыва речного песка. Устройство дренирующих водоемов связано с ландшафтной архитектурой. Водоёмы не только дренируют местность, но и улучшают её живописность и микроклимат [179]. Омск имеет большой опыт применения гидронамыва. В начале 1960-х гг. таким путем был построен жилой массив вдоль созданной Иртышской набережной длиной около 5 км (разработка П.В. Радищева). В результате город повернулся лицом к реке. Строительство жилых районов с искусственными озерами (гидропарками), по сообщению Г.М. Гаврилова и Д.Г. Донцова (ВНИИТАГ Госкомархитектуры, 1991 г.), вызывает интерес во всем мире.

Подтопление охватило многие города мира. Причины подтопления разные. Подтоплены города европейской части России, Украины, Урала, Сибири, Казахстана, Средней Азии. Города Великобритании, стран Западной, Центральной и Восточной Европы, США, Бразилии, Индии, Китая, Саудовской Аравии также не избежали этого неблагоприятного процесса [2; 52; 70; 71; 156; 163; 164; 201; 202; 205; 217; 218; 220; 288; 326; 328; 329; 332; 335; 337; 343; 349].

#### Пример 4. Гидрогеологические условия г. Омска

Для описания гидрогеологических условий г. Омска использованы общегородские геофондовые материалы, любезно предоставленные ОАО «ОмскТИСИЗ» (Омским трестом инженерно-строительных изысканий), а также материалы исследований автора по Омскому метрополитену.

Город Омск, площадью около 400 км<sup>2</sup>, раскинулся на южной части Западно-Сибирской равнины, имеющей слабые уклоны рельефа к долинам рек Иртыша и его притока Оми, а также в направлении их течения. Эти водные артерии пререзают четвертичные отложения, заглубляясь в неогеновые. Грунты в основном глинистые: глины, суглинки, супеси. Ближе к рекам попадаются прослойки песков.

Подземные воды (ПВ) в инженерной грунтовой зоне до глубин 50 м от поверхности земли встречаются в трех разновидностях: сезонная верховодка, грунтовые воды (ГВ) со свободной поверхностью, напорные подземные воды (НПВ). Основными ПВ, наиболее существенно влияющими на процессы подземного городского строительства, являются ГВ и НПВ, действующие круглогодично.

Грунтовые воды по территории Омска встречаются почти повсеместно, а особенно на промплощадках и селитебных зонах. Исключение составляют небольшие, естественно сдренированные зоны у рек. Максимальное положение уровня грунтовых вод (УГВ) в последние годы зафиксировано на глубинах от поверхности земли менее 2 метров на 80 % территории Омска, что рассмотрено в следующем примере.

Приурочены ГВ к таким грунтам: насыпным и намывным; четвертичным аллювиальным отложениям, слагающим пойменные террасы Иртыша и Оми; встречаются на первых надпойменных террасах, а на второй надпойменной террасе Иртыша — преимущественно на левом берегу; широко распространены в покровных отложениях водораздельной равнины преимущественно на правобережье Иртыша. Водовмещающими для ГВ являются в основном пластичные супеси, мягко- и текучепластичные суглинки, реже пески пылеватые, мелко- и среднезернистые. В среднем коэффициенты фильтрации упомянутых грунтов составляют 0,2...0,4 м/сут. Средняя мощность ГВ обычно от 1 до 2 метров. Водоупорами для ГВ служат суглинки и глины твердых и полутвердых консистенций различных свит.

НПВ залегают под водоупорными породами ниже ГВ. НПВ обычно приурочены к туго-, мягко- и текучепластичным суглинкам и пластичным супесям павлодарской и таволжанской свит. Коэффициенты фильтрации этих грунтов в среднем имеют значения 0,1...0,2 м/сут. Пьезометрические напоры обычно находятся в пределах 5...15 м, причем уровень напорных подземных вод (УНПВ), как правило, устанавливается в наблюдательных скважинах на 0,5...1,5 м ниже УГВ. Мощности водовмещающих пород изменяются обычно от 1 до 6 м, обводненные прослойки часто переслаиваются с относительно водоупорными глинами и суглинками твердой и полутвердой консистенций.

Подземные проходки, прокладываемые по городу на глубине в среднем 6...12 м, зачастую как раз попадают в зону НПВ. При этом НПВ создают трудности не только из-за водопритоков, даже не столько. Основной проблемой является оплывание водонасыщенных грунтов в забоях. Несмотря на относительно небольшие величины водопритоков, фильтрация НПВ в забои подземных проходок усиливает проявление плавунных свойств обводненных грунтов.

Таким образом, в целом по Омску водоносные грунты в зоне действия строительных проходческих машин и механизмов можно охарактеризовать как слабопроницаемые и в то же время имеющие малую устойчивость в водонасыщенном состоянии. Даже в таком первом приближении эта фактическая информация уже влияет на выбор защитных средств от подтопления при подземном городском строительстве, исключая возможность применения не только обычных гравитационных (открытых в атмосферу) водопонижительных скважин, но и легких иглофильтров.

### Пример 5. Подтопление Омска

Ежегодно в мае Омск оказывается сезонно подтопленным грунтовыми водами примерно на 80 % (рис. 4). Данная карта построена с опорой на геофондовые материалы ОАО «ОмскТИСИЗ» (Омского треста инженерно-строительных изысканий). Районы города очерчены штрихпунктирной линией, а зоны подтопления заштрихованы как подземные воды, где УГВ менее 2 метров от поверхности земли. Согласно критерию «норма осушения» такая территория города относится к подтопленной (см. п. 3 табл. 1). Летом начинается спад УГВ, вода уходит из подвалов зданий. В конце октября опять наблюдается небольшое осеннее повышение УГВ. Даже сезонное подтопление приносит огромные убытки городскому хозяйству. В целом по Омску защита от подтопления отсутствует.

В дальнейшем изложении много примеров взято из практики г. Омска и Омской области, подверженных подтоплению. Данная территория принята базовой с точки зрения подтопления в исследованиях автора.

Защитить от подтопления здания и сооружения в Омской области непросто. Дренаж для дома или группы зданий построить можно, но сбрасывать дренажные воды проблематично. Рельеф местности в основном плоский, бессточный. Дождевая канализация — ливнёвка — не развита.

Омск — областной центр. Он не имеет развитой дождевой канализации. Потребность города в ней составляет почти 80 %.

Некоторые участки города были подтоплены еще до застройки, например, низкая пойма 1 левого берега Иртыша (см. рис. 4). Она пока не застроена. Относительно нестарые микрорайоны Левобережья 2 возведены на искусственном слое песчаного грунта мощностью около 3 метров, поданного гидронамывом из русла Иртыша. Общий уклон Левобережья направлен к реке, подтопления здесь почти нет, хотя возраст застройки 20...30 лет. Застройка же старого Кировска 3 значительно подтоплена, основной причиной этого является нарушение поверхностного стока.

Правобережная часть Омска наиболее подтоплена (см. рис. 4). В Ленинском округе 4 подтопление охватывает даже незастроенные территории. Характерно, что расположенное на южной окраине города озеро Чередовое имеет среднюю отметку уровня воды, почти совпадающую с отметками поверхности окружающей территории. А уклон рельефа между озером и Иртышом в основном направлен не к реке, а к озеру. Октябрьский округ 5 имеет особенность (см. рис. 4) — в его центре нет застройки и нет подтопления. Здесь расположен лесопарк. Однако западнее застройки этого округа подтопление проявляется, хотя

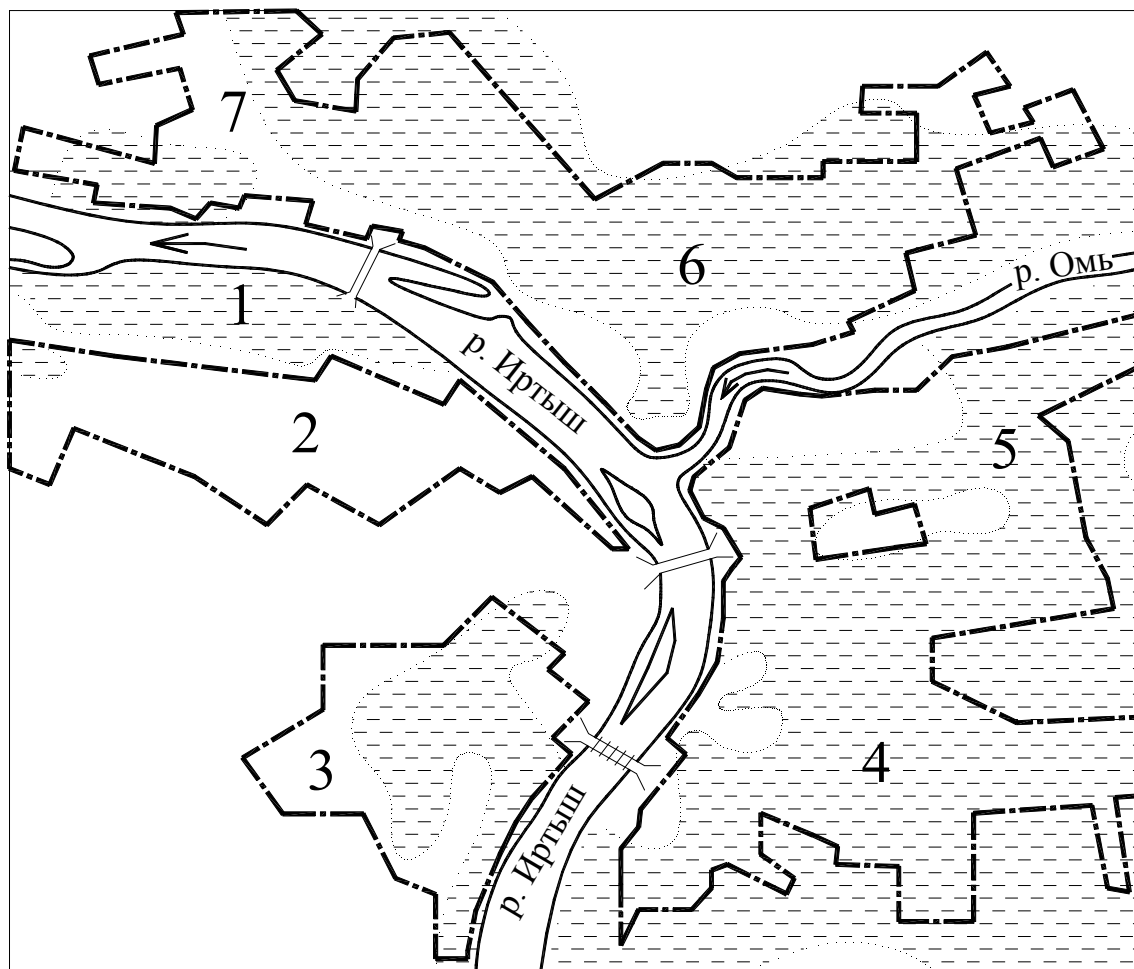


Рис. 4. Схематическая карта сезонного подтопления Омска

застройка отсутствует. Значит, связывать подтопление напрямую с застройкой нельзя. Омь немного дренирует свой левый берег. Иртыш в округах Ленинском 4 и Октябрьском 5 почти не дренирует застройку. Хотя ливнёвка здесь имеется, но и её недостаточно.

Центральный округ 6, расположенный на правобережьях Иртыша и Оми, подтоплен значительно. Исключение составляет береговая зона Иртыша до улицы Красный путь включительно, где на водный баланс территории разгружающе действует дождевая канализация. Советский округ 7 имеет сходное состояние по подтоплению с Центральным.

В середине 90-х годов омские проектировщики разработали технико-экономическое обоснование (ТЭО) строительства ливневой канализации с очистными сооружениями и инженерной защиты территории Омска от подтопления. Разработки осуществлялись согласно действующим СНиПам и другим нормативным документам. Финансирование работ даже на стадии ТЭО имело проблемы. Строительство сетей и сооружений, заложенных в ТЭО, оказалось не выполнимым в условиях современной многоукладной экономики. Вины проектировщиков здесь нет, так как они зачастую обязаны следовать стандартным нормативам. Необходимы нестандартные решения, опережающие инерцию федеральных СНиПов, что было предложено автором в работе [245] и рассмотрено в следующем примере.

## Пример 6. Подтопление Омской области

Рассмотрим Омскую область с точки зрения подтопления населенных пунктов. Омский регион расположен на юге Западно-Сибирской равнины. Средняя и южная части области особенно подвержены подтоплению (рис. 5).

Возьмём в качестве характерного примера районный центр Азово, который расположен на водораздельной равнине. Рельеф плоский, гидрографическая сеть не развита. Под почвами, в основном чернозёмными толщиной от 0,3 до 0,7 метра, залегают четвертичные отложения слабопроницаемых суглинков и глин. К этим отложениям приурочены грунтовые воды малой мощности с минерализацией в пределах 1...4 г/л. Ежегодно в мае уровень грунтовых вод (УГВ) устанавливается на глубине 1...3 метра от поверхности земли. Такой УГВ наблюдается на ещё не застроенных территориях. Таким образом, окрестности р.ц. Азово подвержены сезонному подтоплению ещё до застройки. Пример ситуации подтопления р.ц. Азово с практически бессточной территорией и слабопроницаемыми поверхностными отложениями весьма типичен для центральной и южной частей Омской области. Населённые пункты, расположенные на водораздельной равнине, также подвержены сезонному подтоплению.

Защиту от подтопления в населенных пунктах Омской области, исходя из реальных экономических условий, в первую очередь надо осуществлять локальными автономными системами для отдельных объектов строительства. Это обусловлено отсутствием в городах и населённых пунктах уже построенных площадных систем дождевой канализации, проблемой выпуска ливнедренажных стоков в водоемы из-за их удалённости, безуклонностью территорий, что вызывает необходимость в перекачке дренажных стоков.

Выпуск дренажного стока можно осуществить в поглощающие скважины глубиной около 150 метров, пробуренные на напорные солоноватые воды палеогеновых отложений, которые практически непригодны для водоснабжения. Скважину расположить рядом с домом или под ним. При необходимости (что крайне редко) дренажный сток перед сбросом можно очищать на автономных канализационных системах (например, септиках). Расчёты по омским гидрогеологическим условиям показали, что за сутки каждая автономная система с поглощающей скважиной может отводить от здания не менее 30...60 м<sup>3</sup> дренажных вод. В условиях слабопроницаемых грунтов Омской области такого объёма вполне достаточно для среднего здания или сооружения площадью в плане около 50х50 м<sup>2</sup>, или для обслуживания группы небольших зданий типа коттеджей.

По данным Р.А. Нагуманова и И.М. Бывальцева [38], исследовавших проблему подтопления городов Южного Урала, стоимость такого типа автономных систем может быть в 10...20 раз меньше общей стоимости систем традиционного типа с наружными сетями дождевой канализации. Приоритет изучения возможности водосброса в подземный пласт принадлежит этим учёным. Однако они рекомендовали поглощающую скважину в Омском районе устроить на пески неогенового водоносного горизонта в интервале глубин от 88 до 110 метров. По нашему мнению [245], гораздо более надёжным будет сброс в палеогеновые пески журавской свиты на среднюю глубину около 150 метров, так как они имеют устойчивую мощность около 10...15 метров, а удорожание скважины незначительное.

Принцип локальных автономных систем защиты от подтопления (они не требуют наличия наружной ливневой сети!) может быть применён не только в сельской местности, но и в Омске. Особенно на тех участках его застройки, где отсутствует дождевая канализация, а таких участков не менее 80 % площади города. Рассчитать такие системы в условиях грунтовых вод малой мощности можно по нашей методике, изложенной в данной книге.

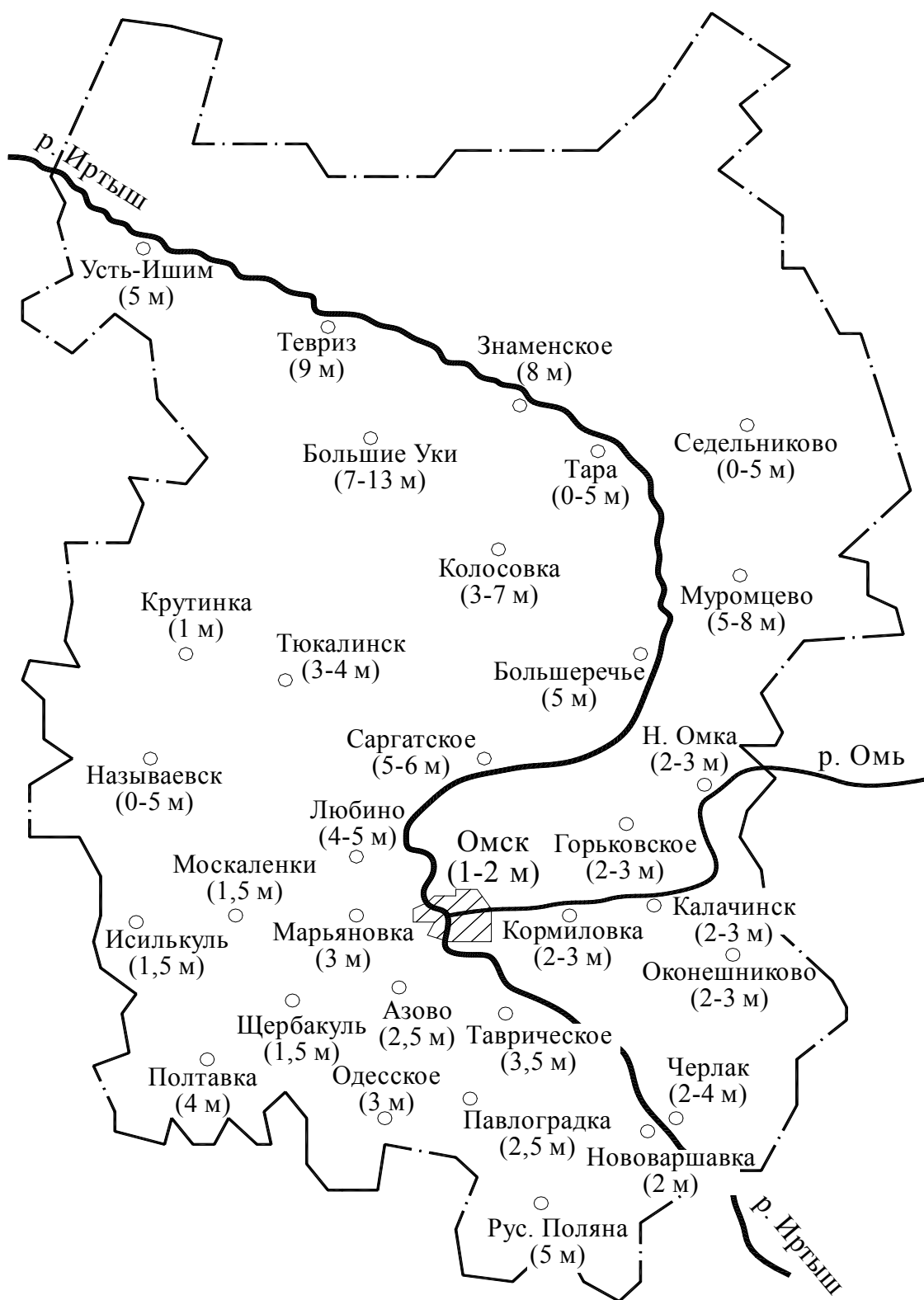


Рис. 5. Схематичная карта подтопления городов и районных центров Омской области (по материалам ОАО «ОмскТИСИЗ»).

В скобках показаны среднестатистические глубины залегания УГВ весеннего максимума на территории застройки



## § 2. Климат и город

Рассмотрим взаимосвязь климата и микроклимата города с процессами подтопления. При этом могут действовать следующие климатические факторы: солнечная радиация, альbedo поверхностей, затенение участков застройки зданиями и деревьями, температура воздуха, почвогрунтов и искусственных покрытий, их влажность, условия аэрации застройки, скорость ветра, инфильтрация атмосферных осадков в грунты, испарение влаги с поверхности почвогрунтов, искусственных покрытий и уровня подземных вод и др.

Следует отметить, что климат городов — это широкая тема, которую невозможно подробно рассмотреть в настоящей работе. Основное внимание уделено главным факторам влияния климата и города на подтопление застройки. Результаты исследований автора по актинометрии, испарению и климату приземной части поверхности городской среды сопоставлены с проверенными практикой известными зависимостями, таблицами и материалами других авторов. Преследовалась цель составления необходимой методики учета климата в расчетах и моделировании защиты от подтопления.

В отечественной климатологии климат городов изучен лучше, чем климат огромных географических пространств. Особенно это характерно для Сибири, гидрометеорологическая изученность которой до сих пор остается слабой. Это связано с тем, что метеостанции устраивают в населенных пунктах [96]. В то же время для целей нашей работы такое расположение метеостанций более благоприятно в сравнении с задачами общей гидрологии суши. Необходимо широко использовать многочисленные первичные климатические данные актинометрических и метеорологических станций государственной сети, опубликованные в климатических справочниках СССР и России, для целей защиты от подтопления в городском строительстве.

Актинометрия изучает различные виды лучистой энергии в природных условиях [110]. Нас интересует влияние солнечной энергии на испарение с поверхности уровня грунтовых вод (УГВ) в городах.

В условиях междуречного режима грунтовых вод, особенно при невысокой проницаемости грунтов, в условиях плоского рельефа, на бессточных территориях преобладает вертикальный инфильтрационно-испарительный влагообмен между УГВ и атмосферой [164]. На основании многочисленных полевых наблюдений С.Ф. Аверьянов [6; 7] дал следующую зависимость для интенсивности испарения влаги с УГВ,  $м/сут$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - z/z_0\right)^n, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — испаряемость (испарение с водной поверхности по С.Ф. Аверьянову),  $м/сут$ ;  $z$  — глубина залегания УГВ от поверхности земли,  $м$ ;  $z_0$  — критическая глубина залегания, при которой прекращается испарение с УГВ,  $м$ ;  $n$  — эмпирический коэффициент от 1 до 3, по С.Ф. Аверьянову  $n = 2$ . П.Я. Полубаринова-Кочина (1951, 1952) и Н.Н. Веригин (1950) принимали  $n = 1$ . Позднее, при исследованиях подтопления орошаемых массивов Кулундинской степи, П.Я. Полубаринова-Кочина [199; 200] приняла по С.Ф. Аверьянову  $n = 2$ . В нашей работе принято  $n = 2$ , как наиболее достоверное. Для определения  $z_0$  наиболее известна эмпирическая зависимость В.А. Ковды (1946-1947), которую использовали С.Ф. Аверьянов [6] и П.Я. Полубаринова-Кочина [199] в виде

$$z_0 = (1,7 + 0,08T), \quad (2)$$

где  $z_0$  — в метрах;  $T$  — среднегодовая температура воздуха в градусах по Цельсию.

Исследования ученых сибирской школы В.С. Мезенцева по гидрологии суши показали, что за величину  $\varepsilon_0$  надо принимать максимально возможное испарение с поверхности суши — водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов (ТЭР) испарения [96, 142]. В нашей работе  $\varepsilon_0$  понимается именно в этом смысле, однако для удобства использован традиционный термин «испаряемость». Среднемесячную испаряемость  $\varepsilon_0$  для равнин Сибири можно определить по картам И.В. Карнацевича [95]. Среднесуточную испаряемость при прогнозах подтопления и моделировании предлагаем определять по нашим эмпирическим формулам, построенными методом кусочной аппроксимации квадратичными полиномами. Примеры таких формул для двадцати городов Сибири, Алтая, Урала и Казахстана помещены в прил. 1.

Величины среднесуточной испаряемости для конкретного участка строительства можно уточнить, учитывая климатическо-техногенные факторы городской застройки (альбедо, затенение, продуваемость и др. Испаряемость в городе на разных его участках  $\varepsilon_0$  может как уменьшаться, так и, наоборот, увеличиваться относительно величины  $\varepsilon_{мст}$ , средней по городу и измеренной на городской метеостанции. Испаряемость на конкретном участке застройки можно рассчитать с помощью корректирующих коэффициентов:

$$\varepsilon_0 = K_a K_T K_B \varepsilon_{мст}. \quad (3)$$

где  $K_a$ ,  $K_T$ ,  $K_B$  — коэффициенты изменения испаряемости в зависимости, соответственно, от изменения альбедо поверхности испарения, условий затенения и ветрового режима (продуваемости).

Солнечная радиация является основным источником экзогенной энергии приповерхностной толщи почвогрунтов [183]. Эндогенная энергия, поступающая к поверхности земли из недр, на 2-3 порядка меньше солнечной энергии [94; 183]. С солнечной энергией по величине сравнимы лишь тепловые потоки зимой от зданий и сооружений — это антропогенное или техногенное тепло [123, 293]. Таким образом, испарение с УГВ зависит от  $\varepsilon_0$ , а величина  $\varepsilon_0$  сильно зависит от прихода солнечной радиации и от альбедо облучаемой поверхности. Альбедо — это коэффициент отражения суммарной солнечной радиации [95].

Асфальтовые покрытия могут сильно увеличить испарение. Это известно из работ отечественных [308] и зарубежных авторов [123]. Это подтверждается нашими натурными наблюдениями и замерами в Омске.

Вслед за М.И. Будыко [35; 36] и С.И. Харченко [300] запишем приближенное выражение для испаряемости в средних широтах на метеостанции

$$\varepsilon_{\text{мст}} \approx R_{\text{мст}}/L_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{мст}}$  — радиационный баланс (остаточная радиация), измеренный на городской метеостанции,  $\text{МДж}/\text{м}^2$ ;  $L_{\text{исп}}$  — удельная теплота испарения воды, равная  $2,512 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{мм})$  [95].

С другой стороны, испаряемость на конкретном участке застройки

$$\varepsilon_0 \approx R_y/L_{\text{исп}}, \quad (5)$$

где  $R_y$  — радиационный баланс участка застройки.

Тогда, имея в виду (4) и (5), а также основные обозначения, принятые в климатологии [95], можно записать выражение для коэффициента изменения испаряемости по альбедо в виде

$$K_a = \left[ R_k (1 - \alpha_y) / (1 - \alpha_{\text{мст}}) - I \right] / R_{\text{мст}}, \quad (6)$$

где  $R_k$  — баланс коротковолновой радиации;  $\alpha_y$  — альбедо поверхности земли на участке застройки;  $\alpha_{\text{мст}}$  — альбедо поверхности земли на метеостанции;  $I$  — эффективное излучение. Все величины, входящие в формулу (6), можно брать по климатическим справочникам.

Например, альбедо площадки метеостанции в Омске летом  $a_{\text{мст}} = 25\%$ . В справочниках по климату СССР (1965-1969) альбедо асфальта дано в пределах  $a_{\text{асф}} = 10-30\%$ , например, в [269, с. 16]. Эта величина альбедо, по-видимому, завышена. Даже визуально можно наблюдать, как влажный асфальт на солнце «парит». По нашим натурным замерам с помощью актинометра в Омске альбедо влажного и сухого асфальта соответственно  $a_{\text{асф}} = 5 - 15\%$ , что почти

совпало с известным альбедо влажного и сухого чернозема 5 – 14 % [269]. По данным ученых США альбедо влажных автостоянок и дорог на территории этой страны составляет около 5 % [123, с. 54].

Резюмируя, можно утверждать, что испаряемость в радиационно-теплый период года с поверхности влажного асфальта выше на 40-50 % среднего максимально возможного испарения  $\varepsilon_0$  для любого города в средних широтах. Этот вывод поясним следующим примером.

#### Пример 7. Испаряемость с поверхности асфальта

Найдем изменение испаряемости в Омске в июле на поверхности влажного асфальта. Актинометрические характеристики для Омска взяты из [95]. По формуле (6) находим

$$K_a = \left[ R_k (1 - \alpha_{\text{асф}}) / (1 - \alpha_{\text{мст}}) - I \right] / R_{\text{мст}} = \\ = [520(1 - 0,05) / (1 - 0,25) - 180] / 340 = 1,408.$$

Таким образом, испаряемость с поверхности потемневшего от влаги асфальта на открытых, незатененных и продуваемых площадях за счет изменения альбедо его поверхности увеличится примерно на 41 % в сравнении с испаряемостью на городской метеостанции. Так как в июле в Омске среднемесячная величина  $\varepsilon_{\text{мст}} = 138...139$  мм [95; 144], то на влажном асфальте  $\varepsilon_0 = (138...139) \cdot 1,408 = 194...196$  мм/мес. При этом мы учитывали лишь фактор изменения альбедо.

Старые растрескавшиеся асфальтовые покрытия могут служить испарителями влаги в городах. Они не обладают водоупорными свойствами. Инфильтрация атмосферной влаги через них, по данным А.Я. Тулаева [287], может достигать значений  $2 \cdot 10^{-3}$  м/сут. Это соизмеримо со среднегодовыми величинами дополнительной инфильтрации для городских территорий [208]  $10^{-2}...10^{-5}$  м/сут. Максимально возможное испарение с поверхности земли соизмеримо с дополнительной инфильтрацией влаги. Например, в июне в Омске по нашим расчетам среднемесячное испарение для условий метеоплощадки составляет около 5-6 мм/сут. Для открытых асфальтовых покрытий, находящихся на солнце, оно примерно в полтора раза больше.

Другим климатическим фактором, влияющим на испаряемость, является затенение поверхности грунта зданиями и зелеными насаждениями. На северных сторонах домов поверхность почвы обычно сыроватая, так как она почти все время находится в тени. Наши натурные наблюдения и замеры температуры и относительной влажности воздуха и почвы показали, что температура почвы в тени дома примерно равна температуре мокрого термометра. Поэтому другой коэффициент изменения испаряемости по затененности участка застройки можно записать по закону Дж. Дальтона с учетом исследований ГТИ [289] в виде

$$K_m = (e_{t\_m} - e_{200}) / (e_{t\_c} - e_{200}), \quad (7)$$

где  $e_{t_c}$  — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре почвы на солнце;  $e_{t_m}$  — то же, но соответствующая температуре почвы в тени (может быть принята по температуре мокрого термометра);  $e_{200}$  — упругость водяного пара, измеренная в воздухе метеорологической будки на высоте 200 см от поверхности земли; все исходные величины, входящие в формулу (7), могут быть приняты по климатическим справочникам. Данная формула пригодна для определения среднемесячных значений испаряемости, что удобно при прогнозном моделировании подтопления и дренирования.

#### Пример 8. Уменьшение испаряемости в тени

Определим уменьшение испаряемости с северной стороны дома в июле в Омске. Среднемесячная величина испаряемости на метеостанции  $\varepsilon_{\text{мст}} = 138 \dots 139$  мм [95; 144]. Используем данные репрезентативного 1965 года по климатическим справочникам [271; 270; 272]. Упругость водяного пара  $e_{200} = 14,4$  миллибар (или гПа), относительная влажность воздуха  $\varphi = 0,68$  или 68 %, температура почвы на солнце  $+27$  °С, которой соответствует максимальная упругость водяного пара [110]  $e_{t_c} = 35,68$  миллибар (гПа). Максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре мокрого термометра,  $e_{t_m} = 14,3 / 0,68 = 21,03$  миллибар. По формуле (7) находим

$$K_T = (e_{t_m} - e_{200}) / (e_{t_c} - e_{200}) = (21,03 - 14,3) / (35,68 - 14,3) = 0,315.$$

Таким образом, испаряемость влаги в тени здания в Омске уменьшится более чем в три раза и станет равной 43...44 мм водяного столба в июле (за месяц).

При эпигнозном моделировании, то есть при попытке воспроизвести на модели произошедший процесс, гораздо точнее брать суточные значения испаряемости, а не среднемесячные. Основное испарение влаги происходит летом. Мы провели опыты в 1990-х гг. по испарению в условиях положительных температур  $+10 \dots +30$  °С. Рекомендовано определять коэффициент изменения суточной испаряемости с учетом формулы Б.В. Давыдова [220] в виде

$$K_T = \left[ (e_{t_m} - e_{200}) / (e_{t_c} - e_{200}) \right]^{0,8}, \quad (8)$$

где обозначения прежние, что и для формулы (7).

Коэффициент изменения испаряемости в зависимости от ветрового режима (продуваемости) с учетом [289] можно записать так:

$$K_B = (1 + 0,72V_3) / (1 + 0,72V_{\text{мст}}), \quad (9)$$

где  $V_{\text{мст}}$  — скорость ветра по данным метеостанции;  $V_3$  — скорость ветра на конкретном участке застройки, которая может быть рассчитана по аэродинамической методике Э.И. Реттера [219].

### Пример 9. Уменьшение испаряемости в безветренной зоне застройки

Оценим по формуле (9) на сколько уменьшится внутри застройки испаряемость влаги при снижении скоростей ветра в июле в Омске. По данным аэродинамических расчетов и моделирования микрорайонов [219, с. 202, рис. 8.3], скорость ветра около некоторых зданий может стать меньше 20 % от первоначальной скорости ветра на открытых площадях. Для определенности принимаем 10 %. В июле в Омске [240] наблюдается средняя скорость ветра на метеостанции  $V_{\text{мст}} = 3,7 \text{ м/с}$ . Тогда  $V_3 = 0,1 \cdot 3,7 = 0,37 \text{ м/с}$ . По формуле (9) находим

$$K_v = (1 + 0,72V_3) / (1 + 0,72V_{\text{мст}}) = (1 + 0,72 \cdot 0,37) / (1 + 0,72 \cdot 3,7) = 0,346.$$

Таким образом, при снижении скорости ветра в микрорайоне в 10 раз, испаряемость уменьшится примерно в три раза.

Подводя итог расчета по примеру 8 и примеру 9, найдем значение испаряемости в июле для Омска в безветренной зоне микрорайона, находящейся в тени (северная сторона домов). По формуле (3) результирующая испаряемость

$$\varepsilon_0 = K_a K_t K_v \varepsilon_{\text{мст}} = 1 \cdot 0,315 \cdot 0,346 (138 \dots 139) = 15 \text{ мм/мес.}$$

Среднемесячная величина испаряемости на метеостанции  $\varepsilon_{\text{мст}} = 138 \dots 139 \text{ мм}$ . Значит, испаряемость в затененной и безветренной зоне застройки уменьшилась почти в десять раз.

Таким образом, внутри застройки, где существуют безветренные зоны, находящиеся в тени, например с северной стороны домов, испарение может уменьшаться в несколько раз и даже на порядок. Это, в свою очередь, способствует повышению уровня техногенных грунтовых вод.

Пользуясь картограммами инсоляционного режима застройки [312], климатическими справочниками типа [269—272], вычисляя значения скоростей ветра между зданий и сооружений [219], можно определить по формулам (1) – (9) значения испарения с уровня грунтовых вод  $\varepsilon$ . Вычитая эту величину из интенсивности инфильтрационного питания  $\omega$  грунтовых вод застройки, вызывающую подъем УГВ, можно получить результирующую величину — некоторый модуль питания. При положительном знаке модуля питания происходит подъем УГВ, при отрицательном — спад УГВ.

Данная приближенная методика дифференцированного уточнения инфильтрационной нагрузки на грунтовые воды под застройкой устраняет противоречие, связанное с величиной дополнительного техногенного инфильтрационного питания  $\omega$  [208]. Дело в том, что величина  $\omega$  при постепенном подъеме УГВ к поверхности земли начинает уменьшаться вследствие испарения с УГВ. Впервые это было проанализировано С.Ф. Аверьяновым [6].

Расчеты по испарению с поверхности грунтовых вод целесообразно проводить с помощью моделирования, для чего автор рекомендует использовать метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel).

### § 3. *Причины, источники и последствия подтопления застройки*

Причины и источники подтопления подразделяются на две группы:

- естественные (природные);
- техногенные (антропогенные).

Причины и источники подтопления могут проявляться по отдельности или комплексно. Влияют на застройку они по-разному.

Естественные причины (и источники) подтопления:

- подъём уровня водоёмов (источники — моря, озёра и реки);
- опускание поверхности прибрежных городов (источники те же);
- циклы колебания климата (источник — атмосферная влага);
- сезонные колебания УГВ (источник — атмосферная влага).

Подъём уровня водоёмов особенно влияет на подтопление приморских городов. Наиболее яркими примерами являются Венеция, Санкт-Петербург и города Голландии [212]. Повышение уровня водоёмов влияет на подтопление городов в двух случаях: 1) когда происходит поверхностное затопление из-за наводнения и вода насыщает грунты с повышением УГВ; 2) когда происходит фильтрация воды в берега без наводнения и повышение УГВ (подпор) распространяется на прибрежную территорию, однако это возможно лишь в случае хорошо проницаемых грунтов. Причинами неожиданного и непредсказуемого повышения уровня моря могут быть наводнения во время штормов, таяние полярных льдов при потеплении климата Земли, возникновение гигантских волн-цунами при подводных землетрясениях (Дальний Восток). Наводнения на континентальных реках и озёрах связаны с обильными ливнями, таянием снега и ледников в горах.

Опускание поверхности прибрежных городов может происходить по причине тектонических движений и подвижек земной коры медленно во времени или быстро, при землетрясениях. Медленно погружается в море Италия, особенно Венеция. Погружается Голландия, 40 % её территории находится на отметках ниже уровня моря, и лишь самоотверженный труд местных жителей помогает им выжить в борьбе с затоплением и подтоплением. Ежегодные землетрясения на озере Байкал приводят к опусканию его прибрежной территории и подтоплению берегов [212]. Кроме опускания земной поверхности землетрясения, сотрясая грунт, вызывают повышение УГВ до величин порядка 1-2 метров [171].

Циклы колебаний климата на земном шаре довольно чётко установлены как 11-летние [100]. Характерно, что они совпали с циклами появления солнечных пятен. Режим грунтовых вод в естественных условиях зависит от климата, так как грунтовые воды сообщаются с атмосферой через зону аэрации. Однако влияние климата на техногенное подтопление городов и населённых пунктов носит не четко выраженный характер [202].

## Пример 10. Климат и подтопление застройки

Некоторое представление о слабой связи климата и подтопления застройки в Омской области может дать карта-схема на рис. 5, составленная по материалам ОАО «ОмскТИСИЗ». Климат Омской области континентальный [17]. Северная часть лежит в зоне оптимального увлажнения, здесь много болот. Южная часть области засушливая. Омск недостаточно увлажнён. Согласно критерию «норма осушения», к подтопленным городам можно отнести Омск, Тару, Седельниково, Крутинку, Называевск, Москаленки, Исилькуль, Щербакуль. Заметим, что города, охваченные подтоплением, разбросаны по всей области независимо от климатических зон. Последние тридцать лет в области наблюдается климатический цикл пониженной влажности, однако даже наличие столетних наблюдений не позволяет предсказать, что произойдёт с климатом в будущем [143] и соответственно — с его влиянием на УГВ.

Сезонные колебания УГВ, происходящие в течение года, изучены в городах довольно хорошо. На рис. 6 представлены сравнительные графики сезонных колебаний УГВ в Омске (построены по данным ОАО «ОмскТИСИЗ»), Санкт-Петербурге (Ленинграде) [83] и Мюнхене [321]. Нетрудно сделать общий вывод, что множество осложнений в городских хозяйствах связано с весенним повышением УГВ. Специалистам городского строительства и хозяйства знание таких графиков необходимо для заблаговременной подготовки к весеннему подтоплению.

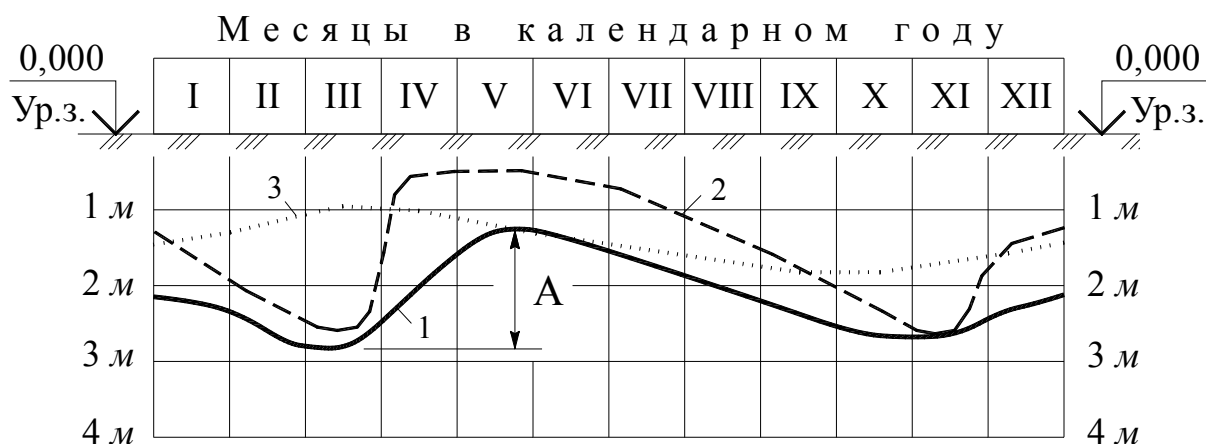


Рис. 6. Графики сезонных колебаний УГВ:  
1 — в Омске; 2 — в Санкт-Петербурге (Ленинграде); 3 — в Мюнхене (ФРГ);  
A — годовая амплитуда колебаний УГВ (в Омске  $A \approx 1,2–1,5$  м)

Техногенными причинами (и источниками) подтопления являются [208]:

- гидротехническое строительство водохранилищ и каналов;
- нарушение естественного поверхностного и подземного стоков;
- утечки из водонесущих коммуникаций.

В справочном пособии к СНиП [208] подчеркнуто, что основные причины подтопления застройки связаны со стадиями строительства и последующей эксплуатацией. С началом освоения городской территории начинается



техногенное (антропогенное) подтопление, происходящее под влиянием деятельности человека. Оно возникает и развивается вследствие нарушения сложившегося природного динамического равновесия в водном балансе территории — это и есть основная причина подтопления городских территорий [208].

Причины подтопления застройки связаны с источниками подтопления. В некоторых случаях причины и источники подтопления неразделимы, совпадают друг с другом, в других — нет. Приведём примеры.

Гидротехническое строительство водохранилищ и каналов преследует водохозяйственные цели, однако побочным явлением возникает подтопление окружающей территории. После наполнения этих сооружений начинается фильтрация воды в берега, прибрежные города подтапливаются повышающимся УГВ — это явление называют подпором. Вблизи этих сооружений возникают подтопленные территории шириной до нескольких, иногда до десятков километров [43; 46; 195; 220]. Такое подтопление свойственно городам, где грунты берегов хорошо проницаемые.

Нарушение естественного поверхностного стока застройкой происходит практически повсеместно. Задерживаемая строительными котлованами, траншеями, зданиями и сооружениями атмосферная влага (источник) просачивается (инфильтруется) в грунт. Природный баланс (равновесие) влаги нарушается, УГВ повышается, возникает подтопление. В редких случаях, когда грунты хорошо проницаемые, то подтопления вследствие рассматриваемой причины может и не произойти, особенно если застройка находится в зоне дренирующего влияния водоёмов или оврагов.

Устройство дождевой (ливневой) канализации К2 в городах улучшает нарушенный застройкой поверхностный сток. Канализация К2 должна устраиваться в сочетании с вертикальной планировкой городской территории [102]. Кроме того, ливнёвка влияет и на улучшение подземного стока с городской территории, так как она может принимать в себя воды из дренажей, понижающих УПВ. Канализация К2 не понижает УГВ, а уменьшает источник подтопления.

Нарушение естественного подземного стока происходит вследствие перегораживания зданиями и сооружениями естественных фильтрационных потоков (источников), что называют барражным эффектом [208].

#### Пример 11. Защита от барражного эффекта

На рис. 7 приведена схематичная карта 1-й очереди 1-й линии строящегося метрополитена Омска. Метро мелкого заложения перекроет потоки подземных вод (ГВ и НПВ), направленные в сторону естественных дренажей — рек Иртыша и Оми. Чтобы с верховой стороны потоков не возник подпор ПВ (барражный эффект), под метро предусмотрен водопропускной слой щебня толщиной 0,5 метра [206].

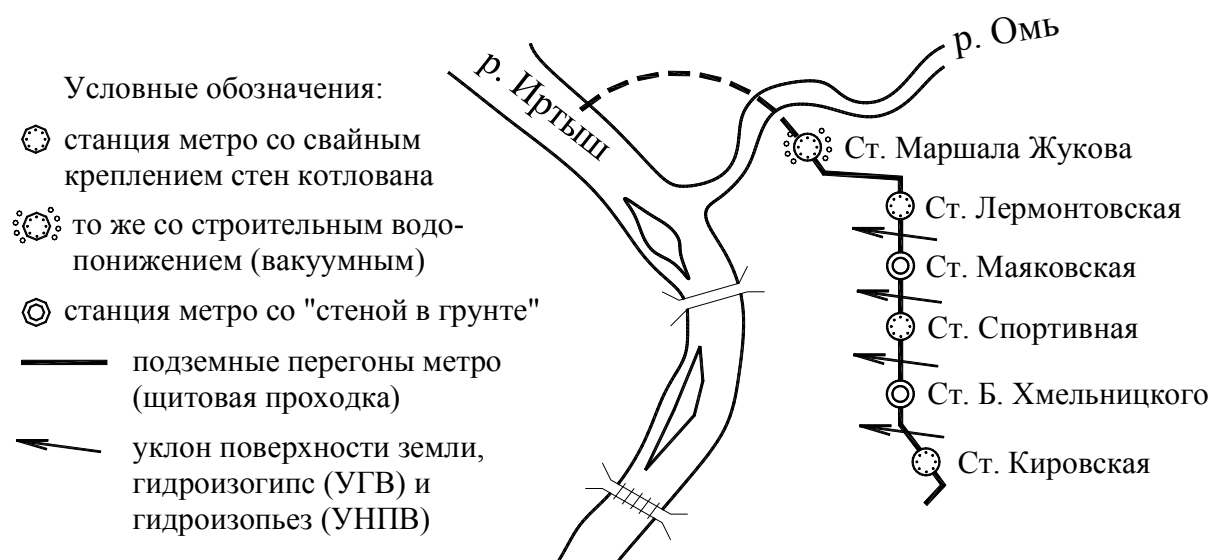


Рис. 7. Омский метрополитен (1-я очередь 1-й линии) и потоки подземных вод

В практике строительства тоннелей в Германии применяют специальные дренажные дюкеры для пропуска подземных вод под сооружением, чтобы предотвратить барражный эффект [336].

При строительстве метро в Брюсселе на участках в долине реки Сены и ее притоках возникали случаи перекрытия естественных потоков подземных вод. Было принято решение соорудить два ряда вертикальных фильтрационных колодцев. Первый ряд колодцев с верховой стороны потока улавливает подземные воды, а второй ряд — сбрасывает воду вниз по течению. Система работает надежно и проста в управлении [352].

Утечки из водонесущих коммуникаций — водопровода, канализации, теплосетей — являются настоящим бедствием всех городов, создавая локальное подтопление территории в виде куполов грунтовых вод. Сети стареют, начинаются скрытые подземные утечки воды, которые очень трудно обнаружить. Часто место прорыва трубопровода находят лишь после выхода воды на поверхность, но это значит, что куполообразное подтопление в этом месте уже произошло. Теоретически утечки должны происходить там, где трубопроводы уже выработали свой срок эксплуатации. На практике же бывает, что и новые системы протекают. На это влияет множество причин. Хотя в последнее время предложено статистически прогнозировать подтопление [28], однако основные прогнозы подтопления проводят аналоговым методом [208]. Для этого используют величину интенсивности дополнительной инфильтрации влаги  $\omega$  (м/сут), вызывающую техногенное повышение УГВ.

Дополнительная техногенная инфильтрация влаги интенсивностью  $\omega$  (м/сут) — это просачивание воды на поверхность УГВ, причем источник может быть в любой комбинации: атмосферная влага от дождя, снега и мерзлоты, техногенные воды утечек из трубопроводов, конденсационная влага под зданиями и сооружениями и т.д.

Величина  $\omega$  наиболее достоверно может быть определена на основе режимных наблюдений за УГВ на застроенной территории. Ориентировочно ее можно определить по [208, с. 71-74].

Последствия подтопления застройки можно разбить на три группы:

- аварийно-катастрофические (табл. 2);
- антисанитарно-дискомфортные [209];
- экономические.

Таблица 2

Последствия	Результаты (примеры)
Потеря несущей способности и устойчивости грунтов в основании зданий и сооружений	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Провал здания под землю (дом в Москве на улице Большая Дмитровка, 1998 г.)</li> <li>2. Опрокидывание здания (эlevator в Норс-Трансконе в Канаде, 1913 г. [109])</li> <li>3. Крен здания (Пизанская башня в Италии[220])</li> <li>4. Деформация и подвижки конструкций здания, трещинообразование (повсеместно)</li> </ol>
Оползни и оплывы берегов и крутых склонов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Снос зданий и сооружений (снос моста через реку <i>Peace River</i> в Канаде, 1957 г. [141])</li> <li>2. Мгновенный оползень вызывает наводнение (оползень объёмом 0,25 км<sup>3</sup> в водохранилище Вайонт в Италии привёл к наводнению в пяти селениях и гибели 2000 человек, 1963 г [102])</li> </ol>
Повышение сейсмичности территории на 1-2 балла [202]	Провалы зданий и просадка грунта (застройка в долине реки Ганг в Индии, пострадало более 360 зданий и сооружений, территория просела на глубину более 1 метра [141])
Увеличение морозного пучения грунта	Деформация и подвижки конструкций здания, трещинообразование (суммарное пучение грунта за зиму в Омске достигает до 10-20 см, по данным В.М. Гольцова [60])
Усиление коррозионной активности грунтов	Электрохимическая коррозия стальных подземных труб, конструкций и разрушение бетона фундаментов (повсеместно)
Уменьшение электробезопасности	Поражение электротоком в сырых помещениях (гибель студента СибАДИ в подвальной подтопленной мастерской в 1990 г.)

Антисанитарно-дискомфортные последствия подтопления в основном связаны с появлением сырости в помещениях. При повышенной влажности воздуха человеку становится дискомфортно. На стенах и потолках начинает конденсироваться влага, возникают плесень, грибки. Плодятся насекомые. Повышается заболеваемость людей, особенно простудными болезнями.

Экономический ущерб от подтопления застройки имеет довольно сложную структуру. Существуют методики его расчёта, изложенные в [149, 216, 306], взаимно дополняющие друг друга. В настоящее время эти методики нужно переосмысливать с учётом многоукладной экономики города. Годовой ущерб от подтопления селитебной территории города в ценах 1984 г. представлен в табл. 3 [202].

Таблица 3 [202]

Этажность	Годовой ущерб селитебной территории (тыс. руб./га)			
	При глубине залегания УГВ (м)			При изменении физико-механических свойств грунтов
	0	1	2-3	
2	58,1	38,9	4,6	105,7
5	95,6	66,5	7,7	173,9
9	120,1	80,5	9,6	218,4
12	134,1	89,8	10,2	243,9
16	176,3	118,1	14,1	320,6

Анализируя таблицу, заметим, что при глубине залегания УГВ 2-3 метра, согласно критерию СНиПа [239] «норма осушения», селитебная территория относится к неподтопленной (см. табл. 1). Однако ущерб от подтопления всё равно происходит, хотя значительно меньший, чем при УГВ на 0 и 1 метре.

#### Пример 12. Ущерб от подтопления

Применим показатели табл. 3 к Омску в 1990-х годах. Согласно официальным данным [172], город имеет общую площадь 48,9 *тыс. га*, а селитебная территория занимает 10,9 *тыс. га* при средней этажности 5. По данным ОАО «ОмскТИСИЗ», УГВ в Омске залегает в среднем на 2-3 метра ниже поверхности земли. Тогда годовой ущерб от подтопления на селитебной территории Омска  $У = 7,7 \cdot 10,9 = 83,93$  *млн. руб.* (в ценах 1984 г.). В 1990-х годах в Омске намечалось строить жилья ежегодно на 240 *млн. руб.* [172]. Таким образом, ущерб от подтопления селитебной территории Омска составляет не менее трети средств на строительство жилья, что весьма существенно.

Данные, приведенные в табл. 3 [202], можно также применять для сравнительных экономических оценок в качестве укрупненных показателей при вариантном проектировании защиты от подтопления жилой застройки.

#### § 4. Методы и средства защиты от подтопления

Класс методов и средств защиты от подтопления, рассчитанных на длительный срок эксплуатации в городах, делится на две группы [208]:

- предупредительные мероприятия (пассивные методы);
- защитные дренажи (активные методы).

К другому классу относятся методы и средства для кратковременной защиты от подтопления: строительные водоотлив, водопонижение, дренаж, шпунт и т.д. Дренаж по окончании строительства рекомендуется переводить в группу долговременной эксплуатации [235, п. 18.5]. На территориях городов, постоянно подверженных подтоплению подземными водами, дренажные системы имеют большее значение для технологии строительства и реконструкции, чем временные средства водоотлива и водопонижения. Последние оказывают побочное отрицательное влияние технологических процессов на окружающую среду: осадки фундаментов прилегающих к строительному участку зданий и сооружений, суффозионное вымывание грунта оснований [250, 314]. Дренажи при наличии надежных защитных фильтрующих обсыпок и слоев имеют меньшее отрицательное побочное влияние [208].

Предупредительные мероприятия по защите от подтопления застройки можно подразделить на 9 типов [250]:

- 1) вертикальная планировка;
- 2) дождевая канализация;
- 3) гидронамыв и подсыпка территорий;
- 4) гидроизоляция зданий и сооружений;
- 5) противofильтрационные завесы («стены в грунте»);
- 6) предотвращение утечек из водонесущих коммуникаций;
- 7) профилактические дренажи сетей и сооружений;
- 8) сохранение естественного подземного стока;
- 9) вентиляция подземных частей зданий и сооружений.

Мероприятия имеют разную степень влияния на защиту от подтопления. Некоторые являются общими по территории (1-3), другие — локальными для отдельных зданий и сооружений (4-9).

Вертикальная планировка — это комплексное преобразование естественного или существующего рельефа территории города для размещения зданий, сооружений, дорожно-транспортных коммуникаций и организации поверхностного стока атмосферных вод [102]. Она является основной частью инженерной подготовки территории. Рельеф с уклонами 0,005-0,1 на неводонённых непросадочных грунтах наиболее благоприятен для городского строительства [274]. Существенно повлиять на уменьшение подтопления города средствами вертикальной планировки нельзя. Вертикальная планировка должна быть увязана с уличной сетью, которая принимает поверхностный

сток талых и дождевых вод от застройки и сбрасывает в систему дождевой канализации.

Наружная дождевая канализация К2 предназначена для отведения поверхностных атмосферных и талых вод с городской территории и выпуска их в водоём [324]. Её проектируют по СНиП [237]. Мнение о том, что развитая сеть К2 «способствует понижению горизонта грунтовых вод» [68], почти верно. Однако сама по себе К2 не может понижать УГВ, если только она не совмещена с дренажом [70; 154]. К2 улучшает подземный сток с городской территории, так как может принимать дренажные воды.

Гидронамыв и подсыпку территорий применяют как средство ухода от высокого УГВ, а также при строительстве на поймах рек, подверженных затоплению. Производят земляные работы, искусственное повышение планировочных отметок поверхности территории [208]. Например, способом гидронамыва песчаного грунта из русла Иртыша с 1960-х годов была образована Иртышская набережная г. Омска площадью более 150 га [163; 164], где теперь расположены три жилых микрорайона. Правда, через 30 лет эта территория всё равно стала сезонно подтапливаться грунтовыми водами. Это произошло из-за отсутствия защитных дренажей, которые следовало бы заложить тогда же. Таким образом, гидронамыв и подсыпка территорий сами по себе не гарантируют от подтопления.

Гидроизоляция зданий и сооружений является альтернативой другим способам защиты от подтопления. В отличие от предыдущих, это локальное мероприятие для отдельного здания или сооружения. Она подразделяется на два класса: противofильтрационная и антикоррозионная [30]. Противofильтрационную гидроизоляцию можно классифицировать:

- по способу устройства;
- материалу;
- конструкции.

По способу устройства гидроизоляция делится на окрасочную, штукатурную, оклеечную, литую, пропиточную, инъекционную, засыпную и монтируемую.

По материалу гидроизоляция подразделяется на битумную, минеральную (цементы, глины), полимерную и металлическую (чаще всего из стальных листов, соединяемых электросваркой).

По конструкции гидроизоляцию выполняют по наружной поверхности стены (наиболее часто) или по внутренней. В последнем случае гидроизоляция работает «на отрыв» (закрепляют анкерами).

Окрасочная (противокапиллярная) гидроизоляция не защищает от подтопления. Она предназначена препятствовать проникновению капиллярной влаги из грунта в подземные конструкции. Наиболее распространена окраска горячей битумной мастикой в два слоя толщиной около 2 мм по верти-

кальным наружным поверхностям подвальных стен, соприкасающихся с грунтом. В условиях подтопления применение такой гидроизоляции не эффективно.

Штукатурную гидроизоляцию чаще всего применяют в виде торкрет-бетона толщиной до 2 см по вертикальным железобетонным конструкциям. Она может держать напор воды. Для её устройства на расстоянии около метра от стены ставят цемент-пушку, которая делает высокоскоростной набрызг жёсткого цементного раствора. Например, таким способом в 1979 году была устроена гидроизоляция стен высотой 3 метра железобетонной подземной чаши градирни ТЭЦ-5 в Омске.

Оклеечную гидроизоляцию устраивают наклейкой горячим битумом рулонного материала (рубероида, толя и др.) в 3-4 слоя по вертикальным и горизонтальным поверхностям с обязательным устройством соответственно прижимной стенки в полкирпича или стяжки из цементно-песчаного раствора и балластной пригрузки. Держит напор до 2 метров водяного столба. Весьма склонна к трещинообразованию [30].

Литую гидроизоляцию выполняют по горизонтальным поверхностям из асфальтовых мастик. Выдерживает напор не более 1 метра. Отличается дороговизной.

Пропиточная гидроизоляция — это пропитка битумом или полимерными смолами железобетонных плит, блоков, панелей в заводских условиях. Это в основном антикоррозионное мероприятие.

Инъекционная гидроизоляция предназначена для ремонта существующей гидроизоляции. Её можно применять в двух разновидностях: инъекция в грунт и инъекция в конструкцию. Для инъекции применяют жидкое стекло, полимерные смолы или расширяющийся цементный раствор. Вероятность положительного эффекта ремонта невысокая, 50 на 50 %.

Монтируемую гидроизоляцию собирают из металлических или пластмассовых листов, которые крепятся к стенам с помощью монтажных связей. Швы герметизируют сваркой. Это дорогостоящая гидроизоляция.

Засыпная гидроизоляция — это заполнение полостей или траншей гидрофобным материалом. Самое недорогое мероприятие — устройство глинистого экрана толщиной не менее 0,5 метра. Глина должна быть водоупорной, влажной. От сырости такая гидроизоляция не защитит.

Недостатком большинства гидроизоляций является трещинообразование как следствие подтопления [220].

Противофильтрационные завесы (ПФЗ), или «стены в грунте», предназначены для защиты от подтопления отдельных площадок, зданий и сооружений [208; 273]. Одновременно они могут выполнять роль несущих и ограждающих конструкций и фундаментов [176]. Тогда они могут быть конкурентоспособны с другими мероприятиями по защите от подтопления.

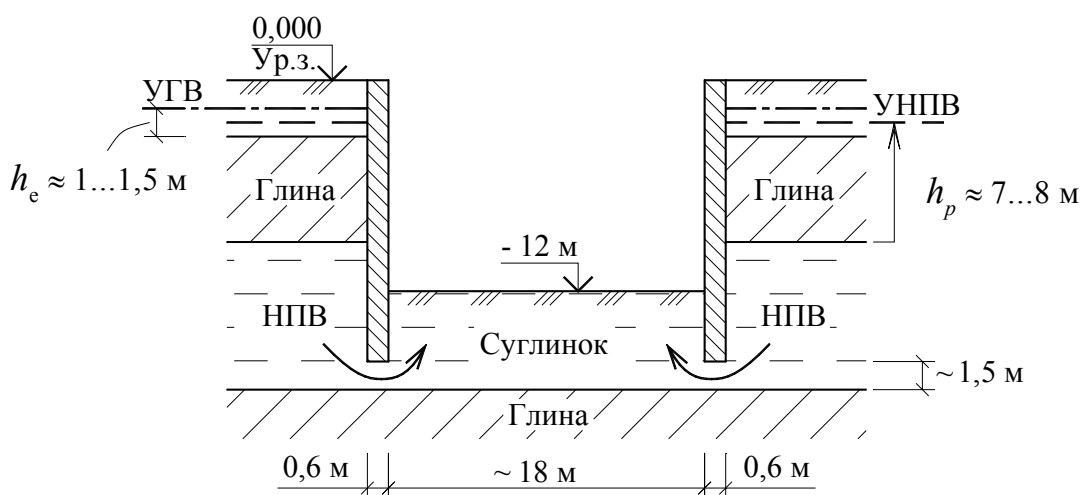


Рис. 8. Схематичный гидрогеологический разрез со «стеной в грунте»

### Пример 13. Стена в грунте

Две станции метро в Омске предполагается строить методом «стена в грунте» (см. рис. 7). Схематичный разрез показан на рис. 8. Железобетонная стена толщиной 0,6 метра первоначально была запроектирована гидродинамически несовершенной, то есть не доходящей до водоупорных глин. Расчёты показали, что будет фильтрационный проскок НПВ под стенами, поэтому необходимо или довести стену вниз до водоупора, на 1,5 метра ниже, или предусмотреть на период строительства водоотлив в котловане. Второй вариант хуже, так как восходящая фильтрация будет разжижать грунт основания котлована.

Технология возведения «стены в грунте» такова [176]. Вначале специальной техникой отрывают узкие и глубокие траншеи шириной 0,6 метра. В процессе откопки их заполняют жидким глинистым раствором, который удерживает стенки траншеи от обрушения. Затем в траншею опускают арматурные каркасы и по трубопроводу нагнетают бетон, вытесняющий глину. Примерно через месяц, когда стена наберёт прочность, откапывают внутренний котлован, а стена защищает от обрушения грунта и притока подземных вод. В дальнейшем «стена в грунте» изнутри будет отделана для подземного помещения.

Другие ПФЗ — инъекционные из цемента, глиноцемента, силикатного геля, смолы или битума [208]. Для Омска они не применимы из-за низких коэффициентов фильтрации пылевато-глинистых грунтов менее 1 м/сут.

Противофильтрационные экраны применяют по дну водоёмов [208].

Утечки в грунт из водонесущих коммуникаций (водопроводных, канализационных и теплофикационных сетей) в среднем составляют 8-9 %, а иногда достигают 15 % объёма поданной воды [104]. Подтопление от утечек носит локальный характер в виде куполов УГВ. Предупреждать утечки можно проведением организационных, эксплуатационных и конструктивно-технологических мероприятий [208], однако снижение утечек до уровня менее 5 % экономически и технически нецелесообразно [202]. Поэтому нельзя строить слишком оптимистические прогнозы на будущее об избавлении от утечек. Выход состоит в создании защитных дренажных систем.



Профилактические дренажи предназначены перехватывать распространение утечек воды из водонесущих сетей и сооружений при фильтрации в грунты застройки. Дренаж для перехвата утечек из сети водопровода, канализации или теплофикации называется сопутствующим, и он может быть линейным трубчатым или пластовым. Для сооружений, компактных в плане, обычно устраивают кольцевой или пластовый дренаж. Все разновидности дренажа рассмотрены дальше.

#### Пример 14. Профилактический дренаж пруда

Кольцевой профилактический дренаж производственного водоёма — пруда с промстоками — показан на рис. 9. Вредные стоки просачиваются в грунт из котлована 1 и перехватываются дренами 2 — трубами с отверстиями и фильтрующими обсыпками. Дрены уложены на водоупорный грунт. При фильтрации образуется свободная поверхность воды в грунте — кривая депрессии 3. Таким образом, профилактические дренажи могут не только препятствовать подтоплению местности, но и защищать её от загрязнения вредными сточными водами. Разумеется, дренажи должны быть устойчивы к агрессивному воздействию промстоков.

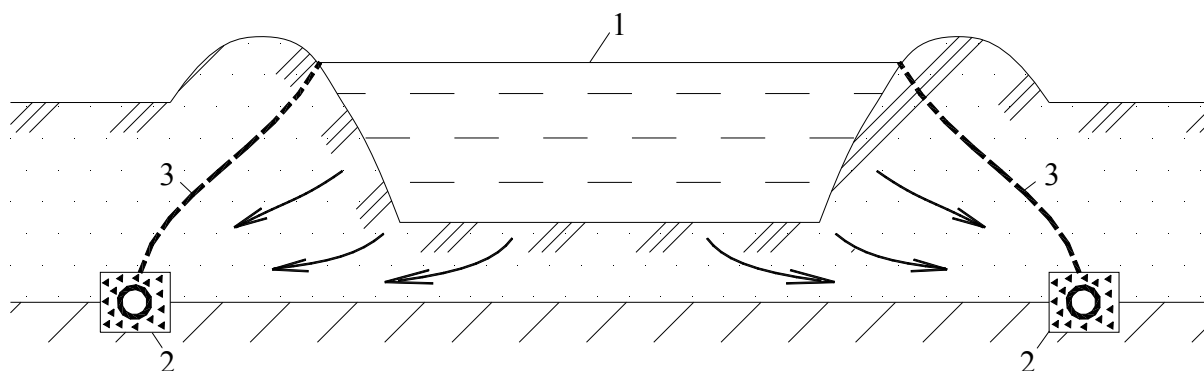


Рис. 9. Кольцевой профилактический дренаж производственного водоёма:  
1 — пруд с промстоками; 2 — дренажи с обсыпкой; 3 — кривая депрессии

Естественные подземные потоки могут перекрываться зданиями и сооружениями, как плотинами. Возникает подпор потоков, то есть повышение УПВ с верховой стороны. С низовой стороны потока УПВ, наоборот, понижается. Такой подпор называют иногда барражным эффектом, так как барраж — это то же, что ПФЗ [155]. Подпор подземных вод и его профилактика для метрополитенов и тоннелей рассмотрен в примере 11. Мероприятия по сохранению естественного подземного стока аналогичны устройству водопропускных труб на дорогах с целью не допустить скопления воды.

Вентиляция подземных частей зданий и сооружений — это профилактическое мероприятие не столько от подтопления, сколько от сырости зданий и сооружений [232]. Например, повсеместно устраивают продухи под деревян-

ными полами 1-го этажа на грунте. Это позволяет продлить срок службы и защитить древесину от гниения и домовых грибов [113].

Наиболее интересно устройство так называемого «вентиляционного дренажа» для зданий и сооружений на слабопроницаемых грунтах. Такой термин подчёркивает двойную роль этого устройства. С одной стороны, воздушная вентиляция подсушивает грунт, окружающий подземную часть объекта. С другой — вызывает понижение УГВ [208]. Необходимо подчеркнуть, что вентиляционный дренаж работает в зоне аэрации над УГВ (см. рис. 2). Под УГВ надо закладывать дренажи традиционного типа или совмещать их конструктивно с вентиляционными. Проиллюстрируем это на примере.

#### Пример 15. Элементы вентиляционного дренажа

На рис. 10 показан вариант устройства вентиляционного дренажа. Движение воздуха из верхней дрены в нижнюю через слой щебня происходит под влиянием перепада давлений, то есть две дрены работают как приточно-вытяжная вентиляция. В результате грунт обратной засыпки и фундаменты подсушиваются. Капиллярная влага подтягивается от

окружающего грунта к щебню и уносится потоком воздуха. Если вдруг появятся подземные воды, то нижняя дрена заработает как традиционная, понижая УГВ.

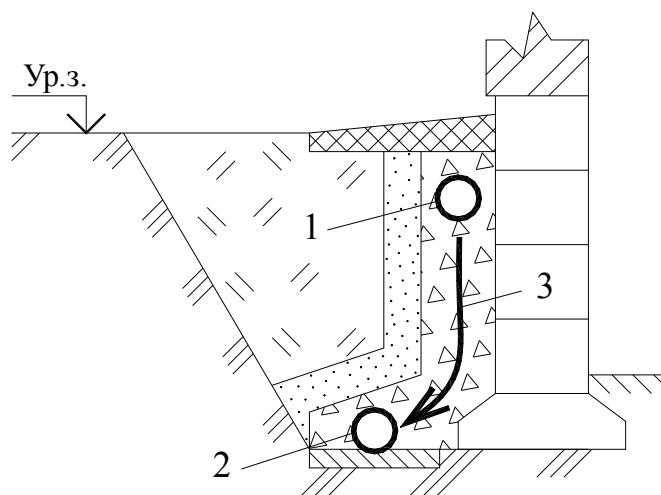


Рис. 10. Вентиляционный пристенный дренаж:

- 1 — воздухоприточная дрена;
- 2 — вытяжная дрена;
- 3 — поток воздуха

Защитные дренажи отличаются от рассмотренных предупредительных мероприятий тем, что они надёжно понижают УПВ и обеспечивают норму осушения на территории застройки, для отдельного здания или сооружения. Таким образом, дренажи представляют собой активные методы защиты от подтопления.

Дренаж — это инженерная система из дрен (труб с отверстиями), фильтрующих обсыпок, слоёв и других элементов, предназначенная для понижения УПВ не менее нормы осушения или не менее 0,5 метра ниже пола подвала, основания сооружения со сбросом дренажных вод:

- в дождевую канализацию К2;
- близлежащий водоём или водоток;
- нижележащий подземный пласт.

Дренажи, применяемые в городском строительстве, можно классифицировать по пяти признакам:

- 1) степень охвата территории;
- 2) положение дрен в пространстве;
- 3) движущая сила фильтрации или влагопереноса;
- 4) продолжительность работы;
- 5) целевое предназначение.

По степени охвата территории дренажи подразделяют на общие и локальные. Это основная классификация дренажей. Общие дренажи (для всей территории города или крупных участков застройки) применимы при коэффициентах фильтрации грунтов  $k > 5 \text{ м/сут}$ . Локальные дренажи отдельных зданий или сооружений можно сооружать в грунтах с любой проницаемостью, но чаще при  $k < 5 \text{ м/сут}$  [70; 208].

Классификация дренажей по положению дрен в пространстве:

1. По отношению к поверхности земли:
  - а) подземные дренажи (на промзонах и селитебных территориях);
  - б) открытые дренажные канавы (в зелёных зонах, на дорогах).
2. По отношению к линии горизонта:
  - а) горизонтальные дренажи (применяются наиболее часто);
  - б) вертикальные дренажи (водопонизительные скважины);
  - в) комбинированные и наклонные дрены (применяются редко).

Классификация дренажей по движущей силе фильтрации или влагопереноса (6 типов):

1. Гравитационные системы (гравитационные дренажи) являются основными. Стеkanie воды в дренаж из грунта происходит под влиянием силы тяжести [202]. Водоприток под действием разности напоров в подземных водах и дрене происходит самотёком, поэтому гравитационные системы являются энергосберегающими. Они понижают уровни грунтовых вод (УГВ), напорных подземных вод (УНПВ) и сезонной верховодки (УСВ). Если дренаж конструктивно выполнен в виде скважины, то её называют грунтовой (принимает безнапорные ГВ) или артезианской напорной скважиной (принимает НПВ) [13; 101].

2. Вакуумные дренажи, в сравнении с гравитационными, интенсивнее осушают обводнённый грунт за счёт создания вакуума в дрене (принудительного отсоса). Применяют в грунтах с малыми коэффициентами фильтрации:  $0,01 < k < 0,5 \text{ м/сут}$ . Требуют тщательной изоляции дрен от атмосферного давления, что усложняет устройство дренажа. Весьма много изобретений и разработок по таким дренажам у Б.М. Дегтярёва [70].

3. Вентиляционные дренажи закладываются в зоне аэрации грунта. Движущей силой влагопереноса служит перепад влажности. Используются для дополнительной подсушки грунта. См. пример 15.

4. Пневмонагнетательные дренажи оттесняют в грунте УПВ посредством нагнетаемого компрессором воздуха. Эти весьма энергоёмкие системы могут применяться лишь для сезонного или периодического осушения слабопроницаемых грунтов [208].

5. Электроосмотический дренаж использует эффект электроосмоса: при пропускании электрического тока через обводнённый грунт вода устремляется к отрицательно заряженной металлической дренаж-катоде. Позволяет осушать грунты с малой проницаемостью — при  $0,001 < k < 0,01$  м/сут. Весьма энергоёмок, но применим там, где другие способы не годятся [103; 202].

6. Биодренаж — понижение УПВ растениями — в условиях холодных зим не реален. Всасывающая сила корней действует лишь около полугода (в тёплый период года в средних широтах). К тому же весной под деревьями образуются купола УГВ [202]. Таким образом, зелёные насаждения не могут понижать УПВ круглый год и не подходят для надёжной защиты от подтопления застройки. Исключение составляют страны с вечнозеленым климатом, где известны случаи положительного эффекта биодренажа [327]. Известно и вредное влияние деревьев на иссушение грунта оснований зданий [339].

Классификация дренажей по продолжительности работы:

- капитальные дренажи, рассчитанные на многолетнюю работу по защите от подтопления территории, здания или сооружения;
- временные дренажи, обычно на период строительства объекта.

Классификация дренажей по целевому назначению:

- защитные дренажи (рассматриваются в данном разделе);
- профилактические дренажи (см. пример 14);
- дренажи для строительных мелиораций (по улучшению свойств грунта, например для быстрого его уплотнения).

Вернёмся к основной классификации дренажей — по степени охвата территории — и рассмотрим их разновидности.

Общие дренажи должны обеспечивать норму осушения [239]. Дренажи для общего понижения УПВ на территории города подразделяются на систематические и перехватывающие [70; 208]. Они применяются в хорошо проницаемых грунтах ( $k > 5$  м/сут). К общим дренажам можно также отнести дренирующие искусственные водоёмы и водотоки.

Систематические дренажи, в свою очередь, делятся:

- на горизонтальные (наиболее распространённые);
- вертикальные;
- комбинированные;
- лучевые.

Горизонтальный систематический дренаж устраивают из трубопроводов-дрен, которые укладывают на расстоянии не ближе 100-200 метров друг от

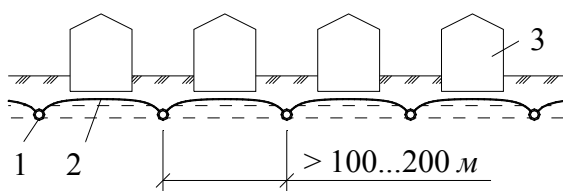


Рис. 11. Горизонтальный систематический дренаж: 1 – дрена; 2 – кривая депрессии (пониженный УПВ); 3 – защищаемое здание

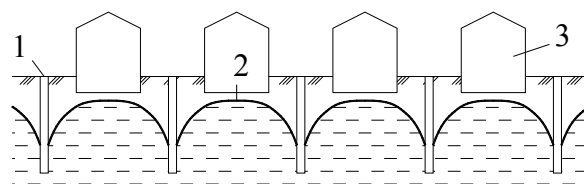


Рис. 12. Вертикальный систематический дренаж: 1 – скважина; 2 – кривая депрессии (пониженный УПВ); 3 – защищаемое здание

Рис. 13. Комбинированный систематический дренаж: 1 – горизонтальная дрена; 2 – самоизливающаяся скважина; 3 – кривая депрессии (пониженный УГВ); 4 – защищаемое здание

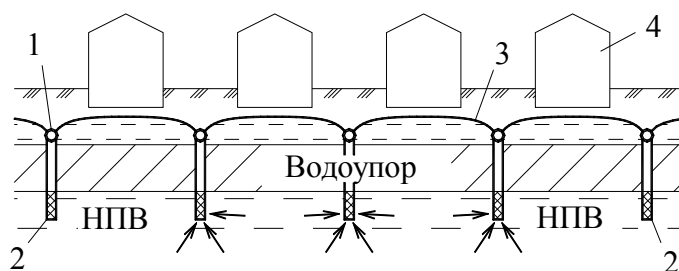


Рис. 14. Береговой перехватывающий дренаж: 1 – горизонтальная дрена; 2 – кривая депрессии (пониженный УГВ); 3 – защищаемое здание; 4 – водоём

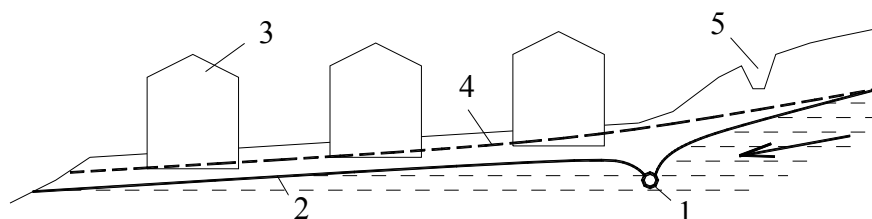
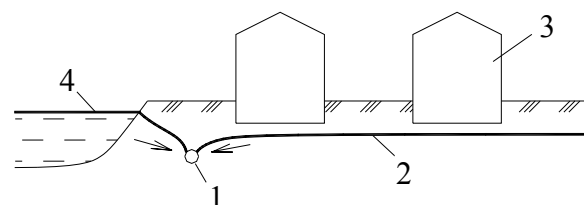


Рис. 15. Головной перехватывающий дренаж: 1 – горизонтальная дрена; 2 – кривая депрессии (пониженный УГВ); 3 – защищаемое здание; 4 – естественный УГВ; 5 – нагорная канава

друга на глубине до 6-8 метров, обеспечивающей норму осушения городской территории (рис. 11). При большей глубине устраивают галереи.

Вертикальный систематический дренаж делают из скважин (рис. 12). Он энергоёмок из-за наличия погружных насосов. В случае поглощающих скважин — экономичен. Положительный опыт его использования имеется в США, штате Айдахо, где сброс дренажных вод через поглощающие скважины происходит в пористые вулканические лавы на глубину около 20 метров [75]. Водосбросные колодцы проектировали для микрорайона Плявниеки г. Риги в Латвии [264].

Комбинированный систематический дренаж — это система горизонтальных дрен с самоизливающимися скважинами (рис. 13). Применяется при сложном гидрогеологическом разрезе. Горизонтальные дрены понижают УГВ, а вертикальные — УНПВ. Конструкция дренажа достаточно сложна, поэтому его устраивают редко.

Лучевой систематический дренаж внесён в классификацию как перспективный для тесной городской застройки [70]. На практике он реализован только как локальный лучевой дренаж.

Перехватывающие дренажи подразделяются на две разновидности:

- береговые (перехват фильтрации из водоёмов);
- головные (перехват фильтрационных потоков со склонов).

Береговой перехватывающий дренаж устраивают вдоль берега водоёма для защиты застройки от подъёма УГВ вследствие фильтрации в берега, то есть для защиты от подпора со стороны водоёма (рис. 14).

Головной перехватывающий дренаж защищает застройку от фильтрационных потоков со склонов (рис. 15). Кроме горизонтальной дрены возможно устройство нагорной канавы для перехвата поверхностного стока, а также в качестве открытой дрены. Немаловажно, что головная дрена защищает не только от подтопления, но и от возможного оползня грунта, так как происходит постоянное осушение массива склона.

О дренирующих водоёмах и водотоках см. пример 3.

Локальные дренажи устраивают для защиты от подтопления отдельных зданий и сооружений. При нормальной работе дренажа пониженный УПВ должен находиться ниже отметки пола подвала или основания сооружения не менее 0,5 метра [208]. Таким образом, при локальной защите от подтопления норма осушения берётся не по СНиП [239] (в отличие от общих дренажей), а отсчитывается как понижение УПВ от низа защищаемого объекта. Локальные дренажи применяют повсеместно. Хотя критерий их выбора связан с грунтами небольшой проницаемости при коэффициентах фильтрации  $k < 5 \text{ м/сут}$ , однако такие дренажи применяют и в хорошо проницаемых грунтах. Поэтому локальные дренажи можно считать достаточно универсальными.

Для зданий и сооружений в городском строительстве устраивают следующие локальные дренажи [208]:

- 1) пластовые (наиболее надёжные);
- 2) горизонтальные трубчатые (массовое применение);
  - а) пристенные (для зданий на водопоре);
  - б) кольцевые (контурные, вокруг компактных зданий);
  - в) одно- и двухлинейные (для вытянутых зданий);
- 3) вертикальные (скважины);
- 4) лучевые (в условиях тесной городской застройки);

- 5) сопутствующие (для дорог и сетей);
- 6) вакуумные;
- 7) пневмонагнетательные;
- 8) комбинированные (в широкой трактовке термина).

В перечисленной классификации основное место занимают дренажи, в которых движущей силой является гравитация. Другими словами, это дренажи, где фильтрационный приток грунтовых и напорных вод происходит самотёком, без привлечения дополнительных движущих сил (вакуума, электроосмоса и др.). Это наиболее распространённые дренажи. Простейшим дренажом такого типа является канава. Как только её дно оказывается ниже УГВ, то сразу же в неё начинается фильтрация воды.

Основные элементы дренажа (рис. 16):

- 1) водоприёмное устройство (дрена, скважина);
- 2) фильтрующие обсыпки и слои (защита от заилинения);
- 3) смотровые колодцы (для удобства обслуживания и ремонта);
- 4) водоотводящая труба (дренажный коллектор);
- 5) насосная станция перекачки дренажных вод (не всегда);
- 6) труба-выпуск дренажных вод (в К2, водоём или пласт).

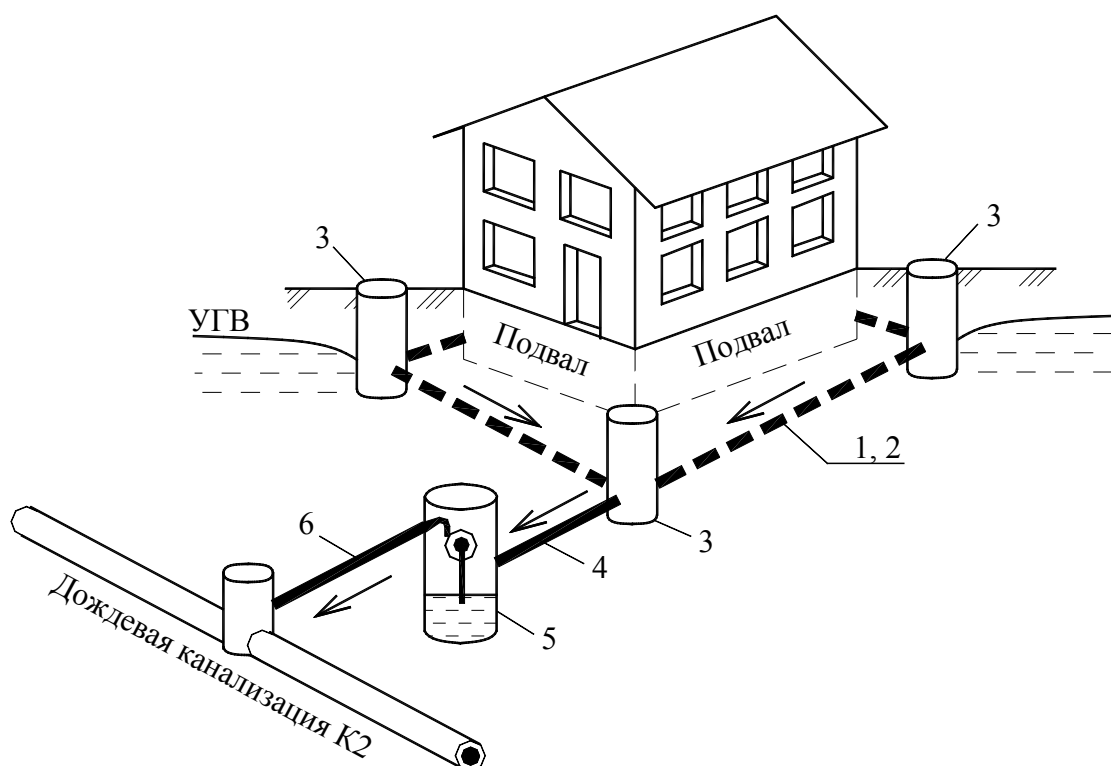


Рис. 16. Элементы дренажа (на примере кольцевого дренажа)

## Пример 16. Кольцевой (контурный) дренаж

Элементы дренажа рассмотрим на примере кольцевого дренажа (см. рис. 16). Он защищает от подтопления грунтовыми водами подвал дома. Дрены 1 уложены вокруг здания на такой глубине, чтобы кривая депрессии УГВ находилась относительно пола подвала как минимум на 0,5 метра ниже. Дрены обсыпаны слоями щебня (в непосредственной близости) и песка (между щебнем и окружающим грунтом) для защиты внутреннего пространства дрен от заиливания частицами грунта. Грунтовая вода проходит фильтрующую обсыпку 2 и, довольно чистая, попадает в дрена 1 через водоприёмные отверстия или щели-пропилы (шаг 25-50 см). Подземная вода, попавшая внутрь дрен, называется дренажным стоком, который самотёком отводится дренами и через один из смотровых колодцев 3 поступает по дренажному коллектору 4 в резервуар насосной станции перекачки 5. Оттуда дренажные воды время от времени насосом перекачиваются в коллектор дождевой канализации К2. Элемент 5 не всегда нужен.

Дрены — это водоприёмные и одновременно водоотводящие элементы дренажных сооружений и систем. В городском строительстве их устраивают из труб. Трубопроводы могут быть [208]:

- асбестоцементные (чаще всего);
- чугунные (обычно под фундаментами);
- керамические (в агрессивных средах);
- трубофильтры из пористого беспесчаного бетона;
- полимерные гибкие (в основном в период строительства).

Трубы, кроме полимерных, применяют диаметром 150 (min), 200, 250, 300 мм. Полимерные — 100, 200 мм. Минимальный уклон дрен 0,003, в проектах обычно назначают уклон 0,005 [283].

Фильтрующие обсыпки и слои вокруг дрен и скважин защищают их от заиливания частицами грунта. На рис. 17 изображено поперечное сечение дрена с традиционной двухслойной обсыпкой. Первый слой, рядом с дренай, устраивают из щебня. Второй слой, между щебнем и грунтом, — из песка.

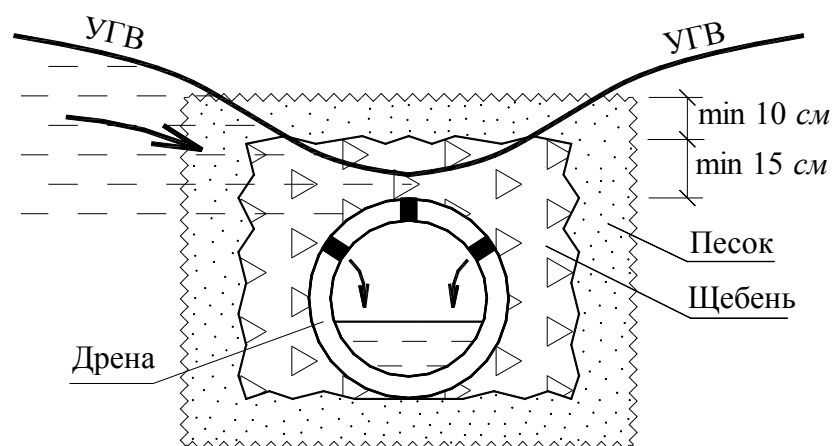


Рис. 17. Двухслойная обсыпка дрена

формы с содержанием глинистых частиц не более 1,5 % по массе. Песок среднезернистый, с коэффициентом неоднородности  $K_{60/10} < 5$ , должен быть чистый, лучше речной, с содержанием глинистых частиц не более 5 % [283]. Проверку



подбора обсыпок следует делать по [208].

Дренажные вертикальные скважины применяют в тесной застройке, когда грунты имеют коэффициент фильтрации более  $5 \text{ м/сут}$  [208]. Мощность обводнённых пород должна превышать несколько метров, с глубиной залегания водоупора свыше 8-10 метров [208]. Выбор скважины вместо горизонтальной дрены должен быть экономически обоснован, так как она требует насоса. Разновидностью дренажных скважин являются горизонтальные и наклонные. Их устраивают с помощью специальных буровых станков или продавливанием домкратом. Горизонтальные скважины применяют для лучевых дренажей.

Скважины изготавливают чаще всего из стальных труб диаметром 100-200 мм. Просверливают отверстия на участке трубы, соответствующем залеганию подземных вод. Сквозность отверстий должна быть 20-25 % [208]. Трубу поверх отверстий обматывают мелкой латунной сеткой (ячейка не более 1 мм) и опускают в пробуренную полость грунта. В зазор между трубой и грунтом насыпают крупнозернистый песок слоем не менее 5 см — это защитная фильтрующая обсыпка. Внутри скважины опускают погружной насос. Подробнее о скважинах см. в [208].

Смотровые колодцы для дренажа [208] сооружают из железобетонных колец почти так же, как канализационные, по ГОСТ 8020-80. Шаг колодцев не более 35 метров при диаметре дрены 150 мм и не более 50 метров — при диаметре 200-300 мм. В отличие от канализационных колодцев, они должны иметь отстойник для выпадения в осадок частиц грунта из дренажных вод (рис. 18).

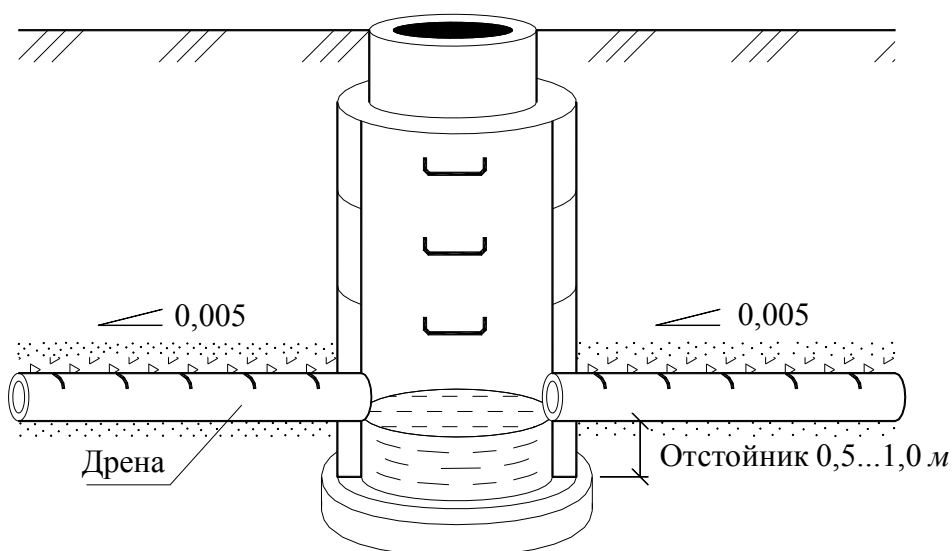


Рис. 18. Смотровой колодец для дренажа

Люки колодцев на асфальтовых покрытиях должны быть вровень с ними, на газонах — выше на 5...7 см, на пустырях — выше на 20 см. Диаметр колец 1 метр при глубине колодца до 3 метров или 1,5 метра — при его глубине свыше 3 метров [237]. Дно колодца устраивают из монолитной подбетонки [208].

Трубы-коллекторы отводят самотёком дренажные воды от защищаемого объекта для последующего выпуска в дождевую канализацию К2, водоём или подземный пласт через поглощающую скважину или колодец. Трубы устраивают глухие, с полной заделкой стыков, как для наружной канализации, по СНиП [237]. Иногда их функционально совмещают с дренами, иногда — с дождевыми (ливнедренажными) коллекторами [70; 154 ].

Насосные станции перекачки устраивают при невозможности самотечного стока дренажных вод в места выпуска [208]. Они могут быть выполнены, например, как большие смотровые колодцы с резервуаром-отстойником. Работу насоса автоматизируют с помощью двух датчиков уровня воды — на верхний и нижний уровни (ДВУ и ДНУ). Насос, при накоплении воды до ДВУ, включается и перекачивает воду по трубе-выпуску. Когда уровень воды в резервуаре понизится до ДНУ, насос выключается. Время работы насоса должно быть не менее 10-15 минут, что достигается подбором насоса и объёма резервуара.

Выпуски дренажных вод могут быть решены по одному из трёх вариантов [208]:

- 1) в дождевую канализацию К2;
- 2) поверхностный водоём или водоток;
- 3) подземный пласт.

Выпуск в дождевую канализацию может быть самотечным, если коллектор К2 находится ниже трубы-выпуска. Иначе надо устраивать насосную станцию перекачки дренажных вод. Подсоединение трубопровода выпуска к К2 выполняют через смотровой колодец.

Выпуск в поверхностный водоём или водоток устраивают незатопленный [208]. Низ трубы должен быть на 0,3 метра выше уровня водоёма. Поверхность берега в месте выпуска укрепляют мощёным камнем или бетонными плитами. Трубу закрывают решеткой от грызунов.

Выпуск в подземный пласт устраивают через поглощающую скважину или колодец [208]. Надзирающие государственные органы по охране природы обычно противятся такому сбросу, мотивируя опасностью загрязнения подземных вод (ПВ). Однако такой выпуск можно обосновать. Во-первых, дренажные воды могут, наоборот, улучшить ПВ, особенно если ПВ — солончатые. Во-вторых, если дренажный сток действительно загрязнённый, то он легко очищается с помощью септиков [324].

Пластовый дренаж является самым надёжным из всех типов дренажей. Наиболее подробно об этом дренаже изложено в отечественной книге [3]. При проектировании можно использовать типовую серию 8.005-1 «Конструкции пластовых дренажей» [283]. Пластовый дренаж стандартизован во всём мире. Например, в Германии — это стандарт DIN 4095 [321], в США имеется соответствующий промышленный стандарт. Пример пластового дренажа изложим по [3; 208; 283].

#### Пример 17. Пластовый дренаж

На рис. 19 изображён пластовый дренаж здания шириной не более 30 метров. Пластовые дренажи обычно сооружают в начале строительства защищаемого здания или сооружения.

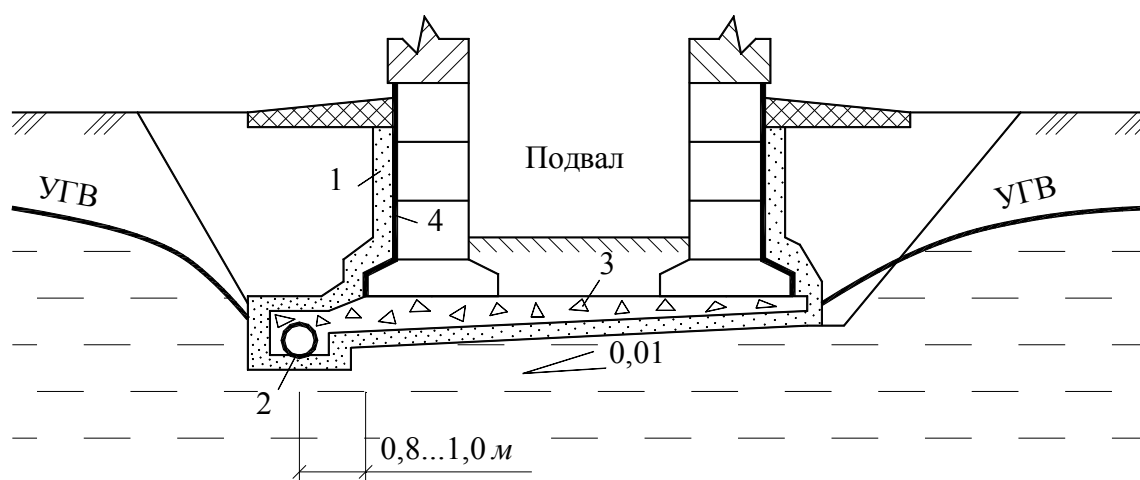


Рис. 19. Пластовый дренаж при ширине здания не более 30 метров:  
1 — песок; 2 — пристенная дрена; 3 — щебень; 4 — гидроизоляция

Вначале откапывают котлован, дно которого планируют с уклоном 0,01 в одну сторону, где вдоль котлована делают небольшую канаву. По дну котлована и в канаве отсыпают слой среднезернистого песка толщиной не менее 10 см. С использованием нивелира в канаву укладывают пристенную дренажную трубу 2 с уклоном 0,005 в сторону отводящего коллектора дренажных вод. Все работы по укладке дрен и коллекторов делают по способу «снизу вверх», то есть монтаж трубопроводов начинают с самой низкой точки. Затем насыпают слой щебня 3 толщиной не менее 15 см, который будет отводить грунтовую воду из-под здания в дренажную трубу. Слой песка и слой щебня в совокупности выполняют роль обратного фильтра, который необходим для защиты от заиливания дренажной трубы и дренажных слоев мелкими частицами грунта [3].

После устройства пластового дренажа начинают строительство фундаментов. Стену снаружи обмазывают двумя слоями горячего битума — это гидроизоляция 4 от влаги, стекающей по фильтрующей песчаной шторе 1.

В случае сооружения пластового дренажа для здания шириной более 30 метров пристенные дренажные трубы укладывают с двух сторон дома, а при ширине более 60 метров — под зданием из чугунных труб.

Горизонтальные трубчатые дренажи подразделяют на три вида [208]:

- а) пристенные (для зданий на водоупоре);
- б) кольцевые (контурные, вокруг компактных зданий);
- в) одно- и двухлинейные (для вытянутых зданий).

Пристенный дренаж показан на рис. 20. Такой дренаж предназначен для зданий, посаженных на водоупорные породы (жирные глины, нетрещиноватую скалу). Водоупор должен быть сплошной под зданием.

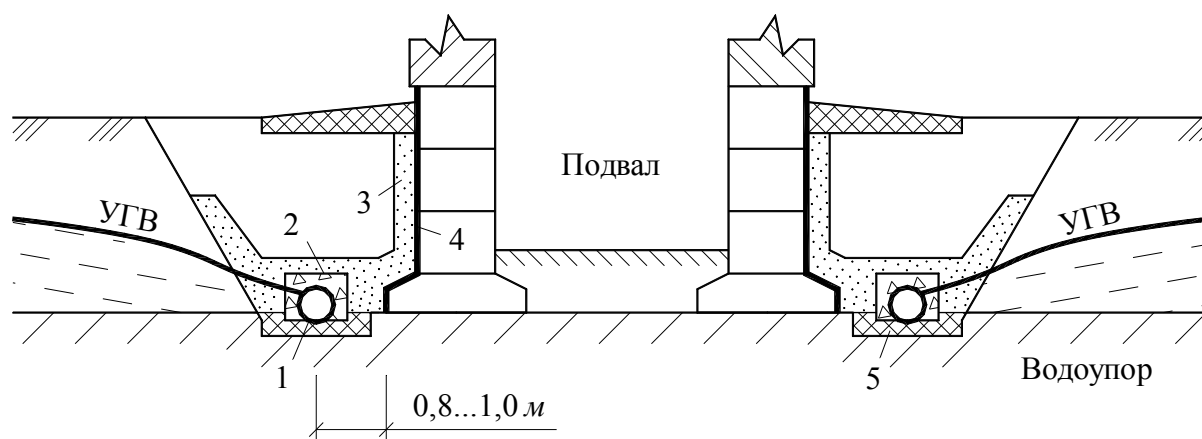


Рис. 20. Пристенный дренаж:

1 – дрена; 2 – щебень; 3 – песок; 4 – гидроизоляция; 5 – глинобетон

Кольцевой (контурный) дренаж показан на рис. 16. Описание его работы см. в примере 16. Такие дренажи можно устраивать в грунтах с коэффициентами фильтрации не менее  $2 \text{ м/сут}$  [274].

Одно- и двухлинейные дренажи сооружают для вытянутых в плане зданий (рис. 21). Однолинейный — со стороны склона, как головной (см. рис. 15), для перехвата склоновых потоков грунтовых вод.

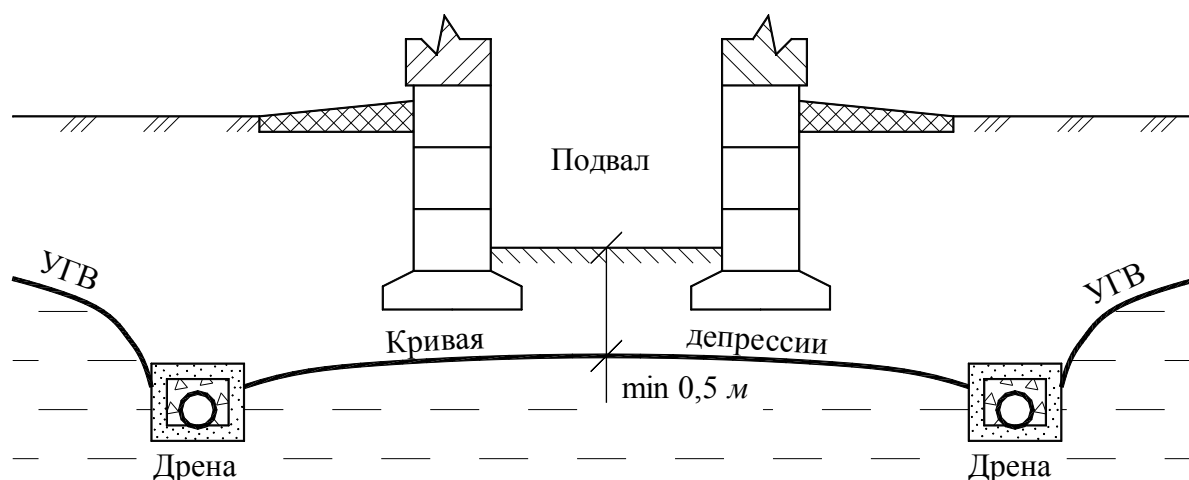


Рис. 21. Двухлинейный дренаж

Шахта

Подвал

Кривая депрессии

ДВУ

ДНУ

1

0,003...0,005

Отстойник 2,5...3,0 м

До 130 м

4

5

3

2

### Пример 18. Устройство лучевого дренажа

Шахта может быть выполнена как большой смотровой колодец с резервуаром-отстойником (см. рис. 22). Работу насоса автоматизируют с помощью двух датчиков уровня воды — на верхний и нижний уровни. Насос, при накоплении дренажных вод до датчика верхнего уровня, включается и перекачивает воду по трубе-выпуску. Когда уровень воды в резервуаре понизится до датчика нижнего уровня, насос выключается. Время работы насоса должно быть не менее 10-15 минут, что достигается подбором насоса и объёма резервуара [208].

53

Сопутствующие дренажи устраивают для вытянутых сооружений:

- дорог;
- инженерных сетей.

Сопутствующие дренажи дорог необходимы для осушения верхней части земляного полотна с целью увеличения межремонтного срока эксплуатации дороги. Стоимость благоустроенных сетей городских дорог составляет не менее 50 % бюджета каждого города [287], поэтому дренирование может принести существенную экономию. Дорожный дренаж можно разработать по типовым проектным решениям [203]. На рис. 23 показан вариант дренажа дороги.

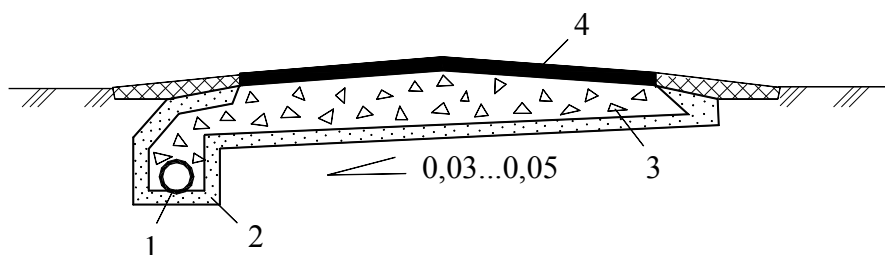


Рис. 23. Сопутствующий дренаж дороги:

1 – дрена; 2 – песок; 3 – щебень; 4 – дорожное покрытие

Сопутствующие дренажи инженерных сетей (теплотрасс, водопровода, канализации) нужны как профилактические и как защитные одновременно, так как они могут перехватывать утечки воды из сетей и понижать УПВ около них. На рис. 24 показан пример пластового дренажа лотка теплотрассы. Нетрудно заметить сходство с пластовым дренажом дороги (см. рис. 23) и отличия от пластового дренажа здания (см. рис. 19). Во-первых, уклон водоотводящей фильтрующей постели принимают гораздо больший, чем у пластового дренажа здания. Во-вторых, сопутствующий дренаж рассмотренных сооружений имеет мелкое заложение. Уклон сопутствующей дрены принимают тоже больший (0,04), чем около здания (0,005). Это делается с учётом возможного замерзания воды при мелком заложении дренажа [287]. Сброс дренажных вод может быть осуществлён самотёком в коллекторы дождевой канализации К2, прокладываемые обычно вблизи дорог.

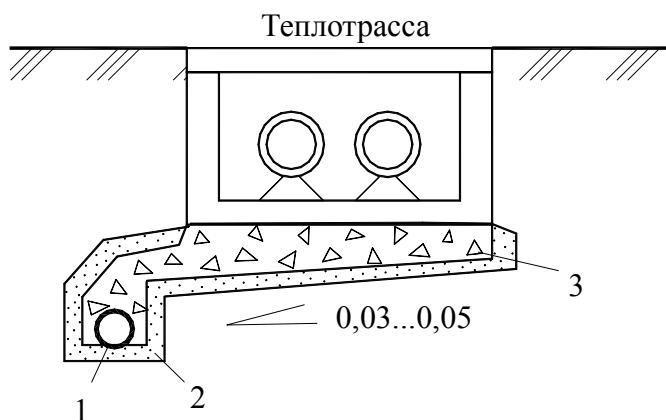


Рис. 24. Сопутствующий дренаж теплотрассы:

1 – дрена; 2 – песок; 3 – щебень

## § 5. Стадии жизненного цикла систем защиты от подтопления

Стадии жизненного цикла систем защиты от подтопления (СЗП) на территории застройки удобно представить в виде табл. 4.

Таблица 4

Работы	Результаты
1. Исследования по определению потребности в СЗП	1. Технико-экономическое обоснование (ТЭО) и техническое задание на проектирование
2. Проектно-изыскательские работы	2. Проект СЗП
3. Строительно-монтажные работы	3. Реализация СЗП
4. Эксплуатация и ремонты	4. Функционирование СЗП
5. Реконструкция	5. Продлённый или новый жизненный цикл

Приведённую последовательность стадий выполняют на крупных объектах, таких как общая защита от подтопления всего города. В случае же локальной защиты отдельного здания или сооружения проводят следующие работы:

- проектирование;
- строительство;
- эксплуатация;
- реконструкция.

Исследования по определению потребности в системе защиты от подтопления традиционно относят к стадии проектирования [30]. Однако для больших СЗП уровень квалификации проектировщиков может оказаться недостаточным для проведения научно-исследовательских работ (НИР), особенно на крупных объектах защиты — городах, промплощадках, районах жилой застройки. Тогда привлекают научно-исследовательские организации. Проводят НИР, которые завершают составлением задания на проектирование.

Стадии устройства и работы систем защиты от подтопления рассмотрим применительно к локальным системам, так как они весьма актуальны в тяжелых условиях грунтов с невысокой проницаемостью и при грунтовых водах малой мощности.

Проектирование защиты от подтопления территорий застройки проводят по СНиП [239]. Градостроительное проектирование ведут по следующим стадиям [102]:

- проект районной планировки (для региона, области);
- генеральный план города;
- проект детальной планировки (для городских районов и зон);
- проект застройки (для микрорайона, квартала или групп домов);
- проект отдельного здания или сооружения.

Защита от подтопления является частью инженерной подготовки территории и поэтому должна разрабатываться на всех перечисленных стадиях градостроительного проектирования. В книгах [70; 102] подробно изложен такой глобальный подход, но мы по причинам, указанным выше, в качестве примера рассмотрим проектирование локального пристенного дренажа отдельного здания.

#### Пример 19. Проектирование пристенного дренажа

Проект дренажа здания или сооружения должен содержать:

- чертежи и спецификации;
- сметы;
- пояснительную записку.

До проектирования проводят технико-экономическое обоснование (ТЭО). Выбирают площадку строительства, делают предварительные расчёты, сравнение вариантов и выбор систем ЗПТЗ. В результате составляют задание на проектирование (составляет проектировщик, утверждает заказчик).

Затем проводят инженерно-строительные изыскания, в результате которых получают следующие материалы [3]: топографическую, инженерно-геологическую и гидрогеологическую съёмку в масштабе 1:500 или 1:1000, данные бурения скважин (колонки), гидрогеологические разрезы, описание режима подземных вод, лабораторных исследований грунта и воды (а при расположении участка строительства вблизи водоёма также и описание режима поверхностных вод). Все эти материалы изыскательская организация компонует в виде отчёта, который поступает проектировщику.

В исходные данные для проектирования входят: задание на проектирование, отчёт об инженерно-строительных изысканиях, план застройки участка и архитектурно-строительные решения подземных частей здания.

Начинают проектирование с расчётов. В первую очередь проектировщику нужно провести два гидрогеологических прогноза [239]:

- подъёма УГВ (прогноз подтопления);
- снижения УГВ при осуществлении защитных мероприятий.

Кроме того, необходимо оценить негативные последствия как от подтопления территории, так и от ее дренирования.



Прогнозы подтопления и расчёты дренажных систем с помощью аналитического метода (по формулам) в гидравлической и гидродинамической постановках изложены в [208]. Они позволяют рассчитывать типовые гидрогеологические схемы. С этой целью реальный водоносный пласт подземных вод, залегающих под зданием, должен быть схематизирован, то есть упрощен геометрически, по проницаемостям грунта и т.д. Формулу стремятся выбрать соответственно существующей ситуации.

Развитием методов прогнозирования является моделирование. В настоящее время моделирование УПВ при защите от подтопления во всём мире реализуется численно на ЭВМ (компьютерное моделирование) и считается наиболее чистым способом. Метод конечных разностей (МКР) является основным для численного моделирования фильтрации подземных вод [126]. Электронные таблицы Microsoft Excel для Windows имеют массовое распространение. Автором разработан метод моделирования систем защиты от подтопления с помощью таблиц Excel — метод МКР-Excel. В эти таблицы встроен макроязык программирования Visual Basic for Application (VBA), позволяющий пользователю практически неограниченно наращивать возможности моделирования.

В результате гидрогеологических расчётов и моделирования определяют положение УПВ, кривые депрессии при работе дренажа (см. рис. 21, 22), водопритоки в дрены. Полученная информация позволяет обоснованно назначить глубину заложения дрена с учётом необходимой нормы осушения. Напомним, что для локальных дренажей кривая депрессии должна быть ниже отметки пола подвала или основания сооружения не менее 0,5 метра [208].

#### Пример 20. Проектирование дренажа (продолжение)

Продолжим рассматривать проектирование пристенного дренажа (см. пример 19). После проведения расчётов или моделирования можно приступить к изготовлению чертежей, что лучше всего делать на компьютере, так как это позволяет прорабатывать различные варианты проектирования. Сейчас среди проектировщиков наибольшей популярностью пользуется пакет автоматизированного проектирования AutoCAD для Windows фирмы Autodesk. Снова отметим, что и здесь можно настроить автоматизацию индивидуально, применив встроенный макроязык (VBA) и объединив процесс черчения с моделированием в Excel.

На рис. 25 показан генплан здания с пристенным дренажом. Смотровые колодцы дренажа обозначены КД-1 ... КД-7, дрены — буквой «Д». В центре здания показана абсолютная отметка пола 1-го этажа, а по углам дома — планировочные отметки земли.

Продольный профиль пристенного дренажа (рис. 26) кроме элементов дренажа содержит положение максимального УГВ в соответствии с прогнозом подтопления. Указана краткая информация по геологическому составу залегающих на строительной площадке грунтов.

Рассматривая эти чертежи, нетрудно заметить сходство с чертежами наружных канализационных сетей.

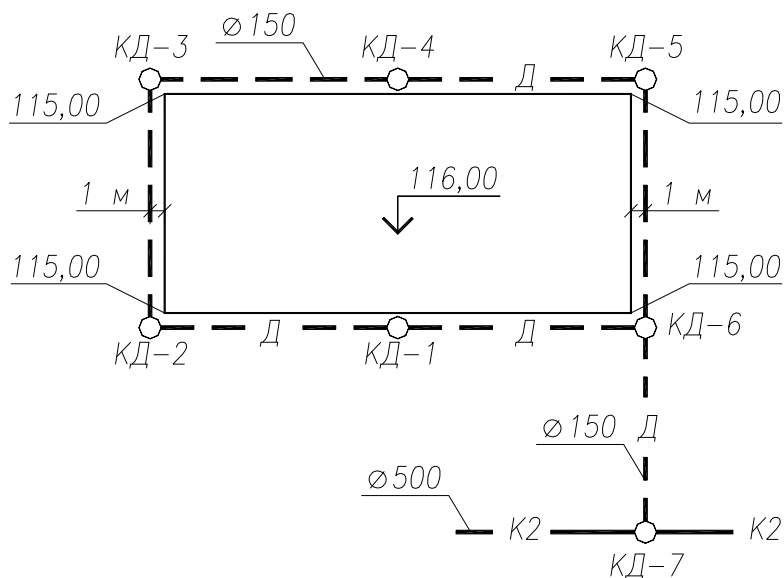


Рис. 25. Генплан здания с пристенным дренажом

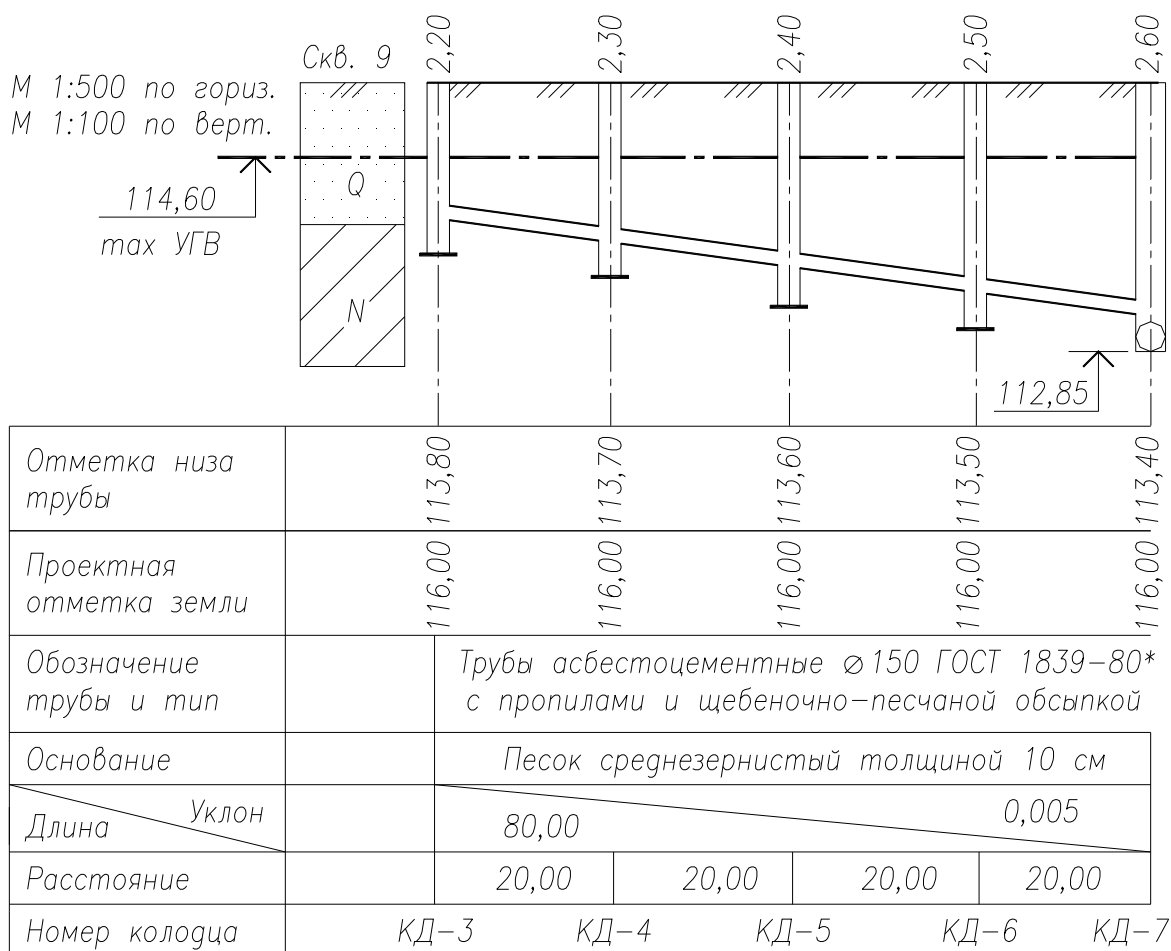


Рис. 26. Продольный профиль пристенного дренажа

## § 6. Строительный водоотлив, водопонижение и дренаж

Строительство объекта осуществляют при наличии проекта, прошедшего согласования и утверждённого заказчиком. Проект организации строительства (ПОС) разрабатывается на стадии ТЭО проектировщиками, а проект производства работ (ППР) составляется по рабочим чертежам инженерами строительно-монтажных организаций [93]. ПОС и ППР должны иметь в своём составе календарные графики строительства, ведомости объёмов работ, чертёж стройгенплана с объектом строительства и временными сооружениями, пояснительную записку [241].

Большинство строительных объектов возводят открытым способом, то есть с поверхности земли [102]. Траншеи и котлованы до глубин 6-8 метров выполняют с естественными откосами, а более глубокие — с вертикальными стенками, закреплёнными от обрушения металлическим шпунтом [103] или «стеной в грунте» (см. пример 13). Часть объектов городского строительства возводят подземным способом: глубокие коллекторы систем канализации, метрополитены. Для этого применяют щитовые проходки [281].

В технологии городского строительства для защиты от подтопления применяют водоотлив, водопонижение и дренаж. Дренажи больше относятся к капитальным сооружениям, предназначенным для длительной эксплуатации, поэтому они уже были рассмотрены выше. Ниже рассмотрены водоотлив и водопонижение и на одном примере — дренаж при строительстве.

Водоотлив — это откачка насосами подземных и поверхностных вод из открытых выемок в грунте и подземных выработок в период строительства (рис. 27). Эта технология подробно описана в отечественном [273] и зарубежном [103] изданиях. Эти две книги хорошо дополняют друг друга.

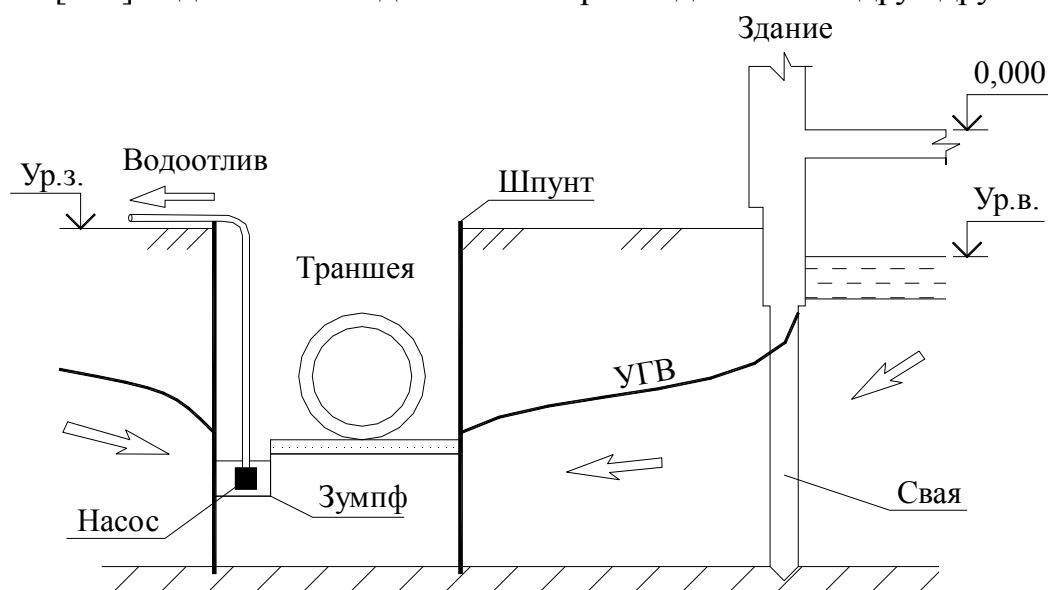


Рис. 27. Водоотлив из траншеи вблизи здания с затопленным подвалом

Из практики строительства [16; 47; 76; 103; 121; 189; 204; 223; 234; 273] известно, что водоотлив подземных вод можно применять в гравийных, галечниковых, скальных и полускальных грунтах, не поддающихся размыву, размоканию и оплыванию, сохраняющих устойчивое состояние на откосах открытых выемок и забоях подземных выработок, не создающих затруднений для технологического цикла строительства.

В случае водонасыщенных песчаных и пылевато-глинистых грунтов применение водоотлива становится проблематичным. Использование водоотлива в таких грунтах рекомендуют проводить при обязательном креплении грунта, что относится к открытому способу работ, когда можно применить шпунт, доски крепления (забирки) между стальными стойками прокатных профилей, фильтрующие пригрузки откосов котлованов и траншей, шторы и т.д. Элементы водоотлива показаны на рис. 27.

В стесненных условиях городской застройки такие мероприятия применять довольно сложно. Даже крепления не всегда вполне надежны. Поступающие под фильтрационным напором в выемки и выработки подземные воды часто выносят с собою ограждения, а со дна — частицы грунта. За стенками ограждений образуются пустоты, ослабляется само крепление, что угрожает обвалом откосов и просадкой грунта с образованием мульды — просадочной воронки на дневной поверхности земли [121]. В зону мульды может попасть существующее здание и сооружение, что приведет к катастрофическим последствиям.

Таким образом, водоотлив в условиях городского строительства на обводненных песчаных и пылевато-глинистых грунтах, несмотря на его технологическую простоту, может вызвать нежелательные последствия:

- оплывание обводненного грунта на откосах котлованов и траншей и в забоях подземных проходок;
- образование внешних мульд просадки грунта;
- разуплотнение грунтов оснований зданий и сооружений и появление недопустимых и трудноустраняемых осадок конструкций;
- резкое снижение темпов строительства нулевого цикла работ, то есть превращение строительства в «долгострой».

Водоотлив все же может рассматриваться как вспомогательное мероприятие при защите от подтопления и затопления. Он может пригодиться на случай аварийных ситуаций, не связанных с водопритокотом подземных вод, например при прорыве воды из ближайшей водонесущей коммуникации или при притоке поверхностных вод, если по каким-либо причинам будут нарушены условия их отведения с территории строительных площадок и т.д.

Строительным водопонижением называется временное, на период строительства, понижение УПВ ниже отметок дна котлованов и траншей (рис. 28) или подземных выработок (рис. 29) на величину не менее 0,5 метра [62] с

помощью скважин различной конструкции с принудительной откачкой насосами. Осушение грунта в пределах котлована устраняет оплывание его откосов и резко повышает производительность труда.

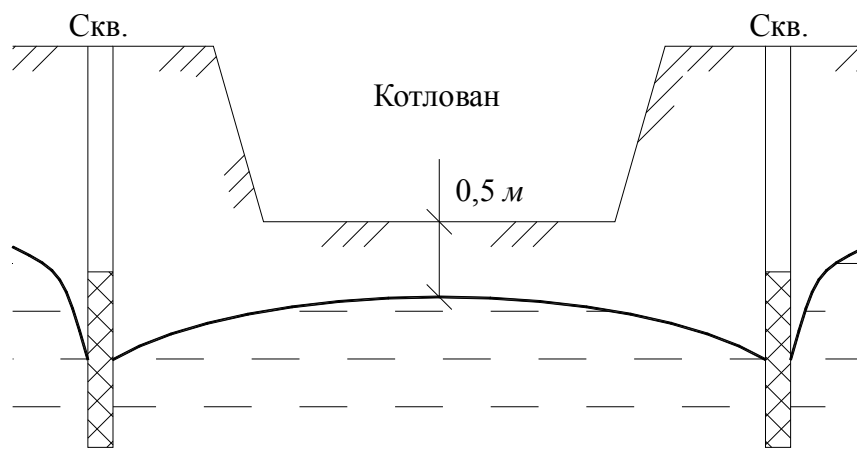


Рис. 28. Строительное водопонижение для открытой выемки

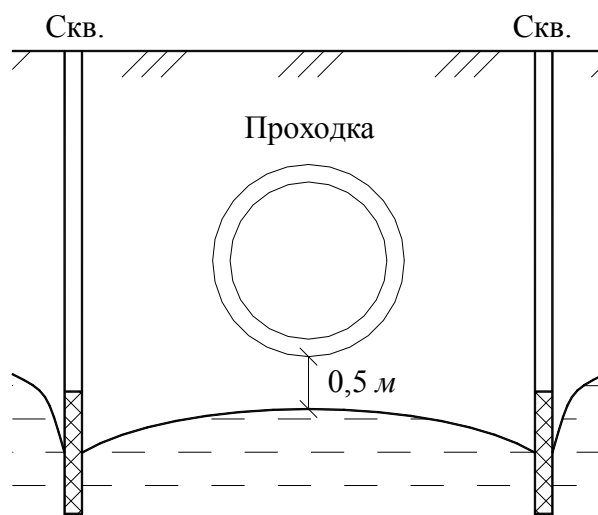


Рис. 29. Строительное водопонижение для подземной выработки

Выбор той или иной системы строительного водопонижения производят с учётом коэффициентов фильтрации грунта  $k$ , м/сут [29; 62; 76; 103; 234]. В гравийно-галечниковых и песчаных грунтах при  $k > 10$  м/сут требуется водопонижение с помощью гравитационных скважин, открытых в атмосферу. В мелкозернистых песках и супесях при  $2 < k < 10$  м/сут применяют иглофильтры (трубчатые скважины небольших диаметров) с поверхностными вакуум-насосами, обеспечивающие понижение УПВ не более 5-6 метров ниже поверхности земли. В глинистых грунтах при  $0,01 < k < 2$  м/сут нужно

применять эжекторные вакуумные скважины, понижающие УПВ до глубины 25-30 метров. При  $0,001 < k < 0,01$  м/сут практически единственным способом является электроосмотическое водопонижение, которым обычно усиливают действие вакуумных водопонизительных систем. При  $k < 0,001$  м/сут грунт считается водоупорным при проектировании строительного водопонижения [238, с. 4].

#### Пример 21. Вакуумная водопонизительная система в Омске

Большинство грунтов в Омске имеют  $k < 1$  м/сут, поэтому выбор строительного водопонижения однозначен: наиболее приемлемы системы с эжекторными вакуумными скважинами (можно в сочетании с электроосмосом). Пример такой системы и ее элементы показаны на рис. 30.

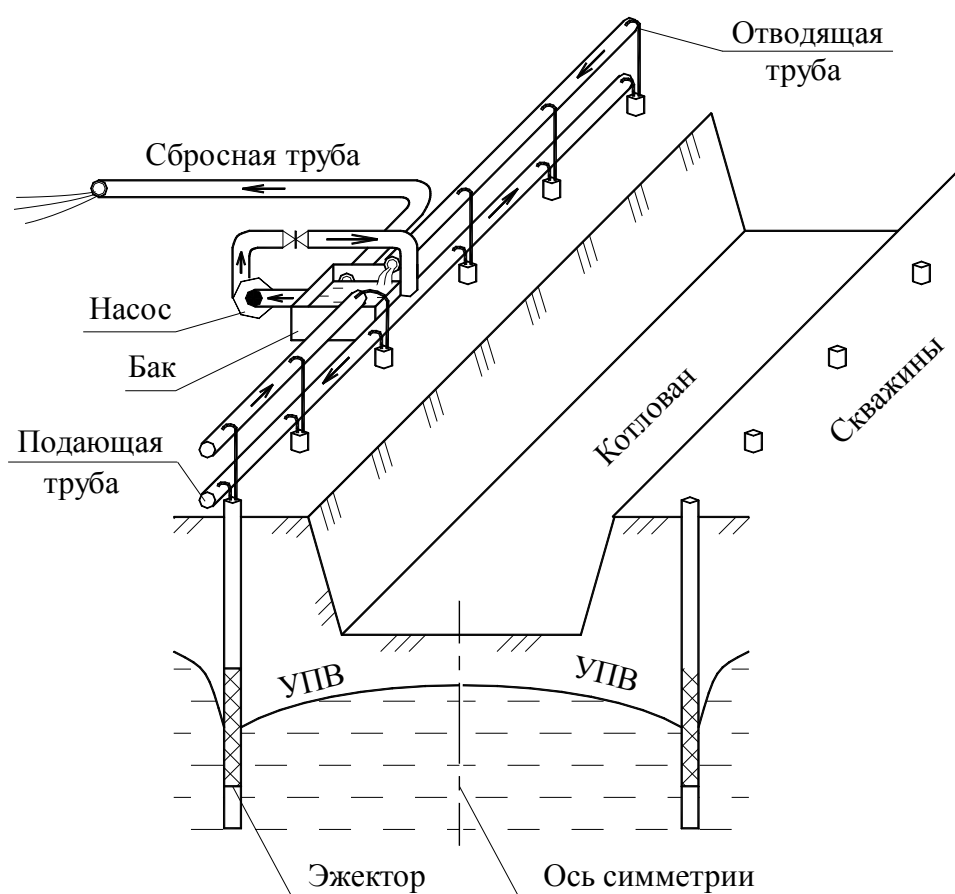


Рис. 30. Вакуумное водопонижение

Вакуумные водопонизительные системы (ВВС) сооружают до вскрытия котлована. Вначале с определённым шагом пробуривают и обустраивают скважины по периметру котлована. Вакуумные скважины (ВС) изолируют от атмосферы. Внутри ВС имеют две трубы: подающую и отводящую (рис. 31). Данный вариант конструкции скважины разработан нами [211] с учётом статьи К.С. Боголюбова, Б.С. Краковского и А.С. Кузьминой [27] для систем вакуумного водопонижения при подземном строительстве в омских условиях.

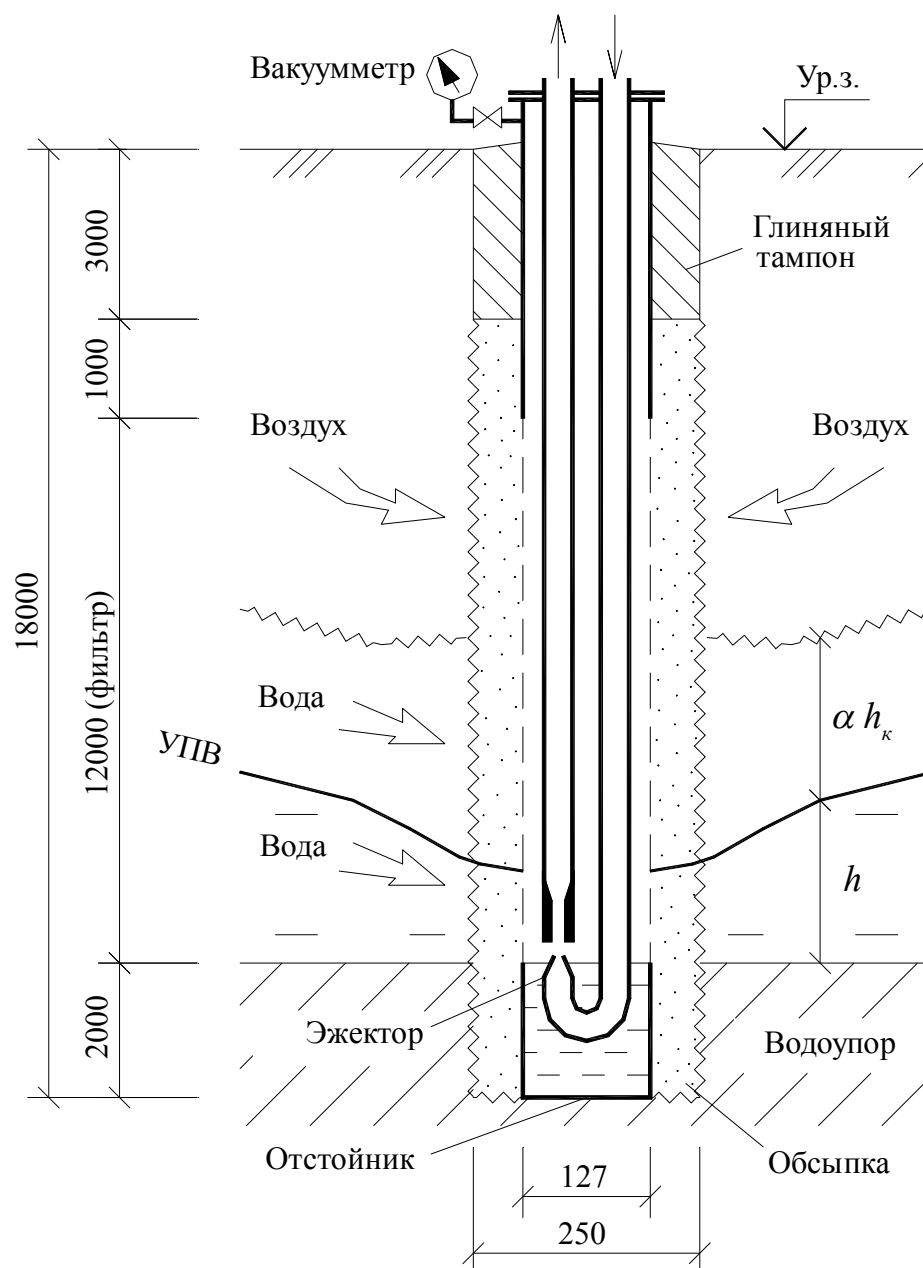


Рис. 31. Конструкция вакуумной скважины

Внизу скважины помещено U-образное колено с эжектором (водоструйным насосом). Пример эжектора показан на рис. 32. Эта конструкция эжектора была разработана нами при защите от подтопления Омского метрополитена [211]. В процессе конструирования были учтены труды ученых ВНИИ ВОДГЕО [27] и Б.Ф. Лямаева [133].

В пределах обводнённых грунтов скважина имеет фильтр с обсыпкой крупнозернистым песком. Верхушку скважины герметично прикрывают фланцем с резиновым уплотнителем. Две трубы скважины соединяют гибкими напорными шлангами с соответствующими двумя трубами на поверхности земли — подающей и отводящей (см. рис. 30). Подающую трубу соединяют с центробежным насосом, установленным на поверхности земли, а отводящую подводят под уклоном к баку с водой. От бака отводят сбросную трубу. После подведения электроэнергии к центробежному насосу установка готова к работе.

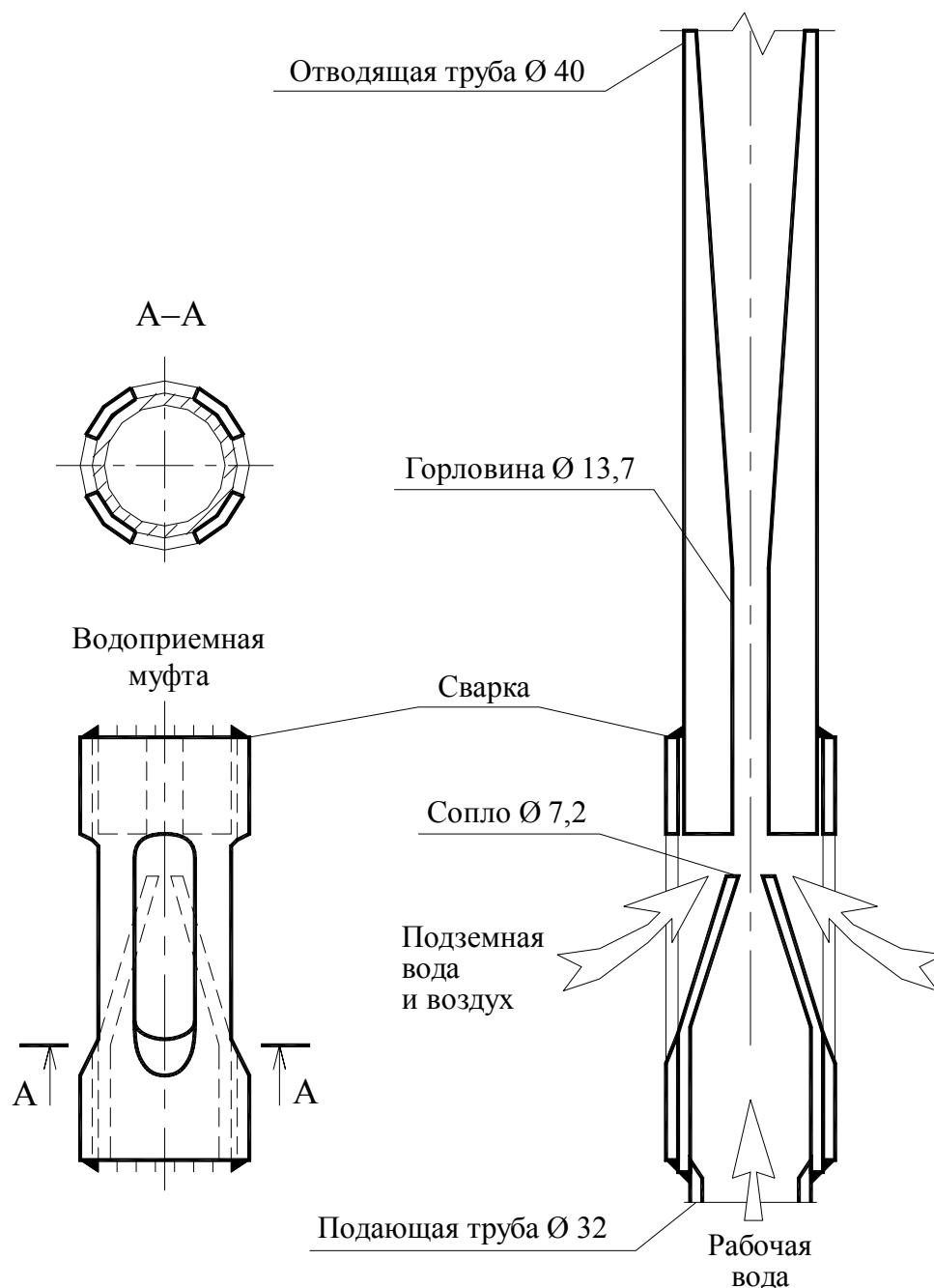


Рис. 32. Конструкция эжектора

Насос включают и открывают задвижку. Вода из бака под напором устремляется по горизонтальным подающим трубам к скважинам. Достигнув эжектора внизу скважины, рабочая жидкость (вода из бака) проходит через сопло, и в зоне фильтра скважины появляется вакуум. Скважина начинает принудительно отсасывать подземную воду из грунта, которая смешивается с рабочей жидкостью и поднимается вверх. Далее смесь стекает по горизонтальному отводящему трубопроводу в бак. Излишек воды из бака уходит по сбросной трубе в сторону от осушаемого котлована, а центробежный насос постоянно забирает воду из бака и гонит её обратно в скважины. Таким образом, при циркуляции воды в ВВС и вакуумном отсосе подземной воды происходит понижение УПВ под будущим котлованом.



Через несколько суток после осушающего действия ВВС начинают копать котлован. Осушенный грунт хорошо держится в откосах котлована и не оплывает. Этот пример показывает, что для Омска технология вакуумного водопонижения весьма перспективна [211]. Кроме того, ее иногда целесообразно совмещать с электроосмотическим водопонижением.

## Пример 22. Строительство пристенного дренажа

Рекомендации по производству работ при строительстве дренажей изложены в [208, с. 135-137], где сказано: «Пристенные дренажи, укладываемые в пазухи строящихся сооружений, должны выполняться после закладки фундаментов защищаемого сооружения». Применительно к дренажу, показанному на рис. 25 и 26, это положение надо откорректировать с привязкой к конкретным условиям строительства. Вернёмся к рис. 20. Если вначале устраивать фундаменты, то с боков котлована будет прибывать грунтовая вода. При отсутствии дренажа откосы котлована начнут разжижаться и оплывать, а из котлована придётся откачивать воду насосами. Затем придётся и дрены укладывать на разжиженный грунт, что опять-таки недопустимо [208, с. 136].

Чтобы не возникло такого неудобства, дренаж нужно строить с опережением устройства фундаментов. Тогда он будет заблаговременно отводить грунтовые воды из котлована. Эта технология почерпнута из [3].

Вначале должен быть обеспечен отвод дренажных вод из котлована, для чего устраивают колодец КД-7 с подключением к коллектору дождевой канализации К2 и от него прокапывают траншею до точки колодца КД-6 (см. рис. 25). В траншее устраивают дренаж с щебёночно-песчаной обсыпкой (рис. 33), которая сразу же начинает дренировать участок строительства.

Торец дрены у колодца КД-6 временно накрывают металлической сеткой, с присыпкой щебнем (слой 15 см) и песком (10 см) — защита от заиливания дрены. Котлован вскрывают экскаватором почти до самого дна с недобором 10-12 см (добирают вручную лопатами под нивелир). Эскавацию ведут, расширяя котлован от точки колодца КД-6 в направлении к КД-1 ... КД-5. Перевалив за эти последние две точки, устраивают колодец КД-6, от которого продлевают дрены с обсыпкой к КД-1 и КД-5. Сетку у колодца КД-6 убирают, а у колодцев КД-1 и КД-5 устраивают точно так же. Обратим внимание, что дренаж постепенно развивается в котловане в направлении снизу — вверх, то есть против уклона дрен. Таким образом, часть котлована уже защищена от подтопления дренажом, вода самотёком уходит в К2. Дрены обсыпают с устройством фильтрующей шторы из песка на естественном откосе стенки котлована, чтобы предотвратить оплывание грунта. Размеры шторы показаны слева на рис. 34.

На правой части рис. 34 изображена фундаментная стена, которую начали возводить под защитой дренажа. Снаружи её обмазывают противокapиллярной изоляцией — горячим

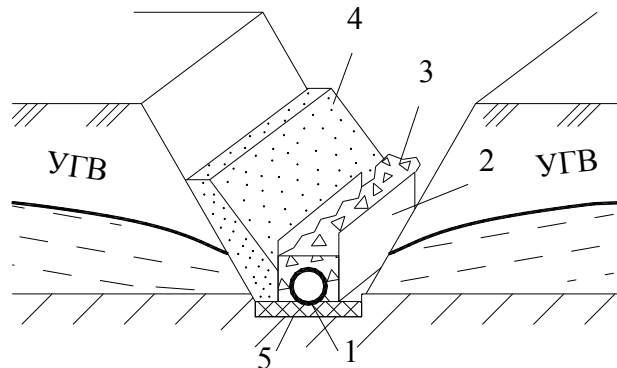


Рис. 33. Устройство дренажной обсыпки:  
1 — дрена; 2 — стальной лист со штырями;  
3 — щебень; 4 — фильтрующая штора (песок);  
5 — глинобетон

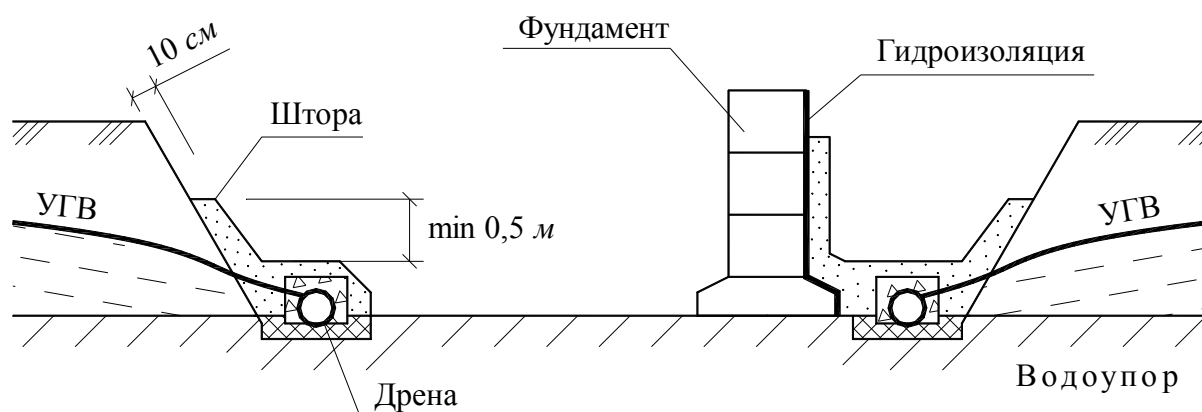


Рис. 34. Устройство дренажа и фундаментов в котловане

битумом за 2 раза. Затем устраивают другую песчаную штору, уже около стены, для улавливания влаги и отвода её в дренаж. Технология устройства шторы такая же, как показано на рис. 33, то есть с применением стального листа, который после обратной засыпки фундаментной пазухи местным грунтом вытаскивают. Таким образом, опалубочный лист используют многократно, что экономит затраты на строительные-монтажные работы.

Вот так, под защитой от подтопления с помощью дренажа, производят работы нулевого цикла по возведению фундаментов здания. Дренаж начал работать уже с момента откопки котлована. На этом примере была показана рациональная технология строительства дренажа.

Рассмотренная технология строительства дренажа, обеспечивающая нормальное проведение работ по устройству фундаментов в котлованах, не всегда выполнима. Обводнённый грунт стенок котлована может оказаться плавунным или текучепластичной консистенции. Образуются языки оплывания грунта в котлован. Это явление встречается повсеместно. Тогда строительство в котловане должно быть защищено или «стеной в грунте» (см. рис. 8), или шпунтом [103], или системами строительного водопонижения. Последние описаны в [16; 29; 47; 62; 63; 76; 103; 234].

При эксплуатации систем и сооружений защиты от подтопления (СЗП) необходимо поддерживать их безотказную работу в течение нескольких десятилетий по обеспечению требуемых норм осушения для городской территории или отдельных зданий, сооружений.

Службы эксплуатации при городских администрациях, дирекциях крупных предприятий и местных самоуправлениях должны проводить следующие работы [15; 87; 102; 190; 214; 216]:

- приём в эксплуатацию систем и сооружений (СЗП);
- уход, надзор, натурные обследования и паспортизацию СЗП;
- ремонты текущие, капитальные и аварийные.

Приём в эксплуатацию систем и сооружений защиты от подтопления производят комиссией с представителями заказчика, строительной организации и служб природоохраны. Проверяют соответствие выполненных строительно-монтажных работ проектным решениям. Оформляют приёмку-сдачу.

Дренажи подлежат уходу и надзору. По данным Р.А. Нагуманова, обследовавшего более 150 горизонтальных трубчатых дренажей городов Южного Урала, «бесхозные» дренажи служат не более 6-7 лет. Затем наступает отказ в их работе, территория застройки снова подтопляется (сообщено в частной беседе, март 1999 г.). Выход из строя дренажей происходит по следующим основным причинам:

- заиливание внутреннего пространства дрен при плохой обсыпке;
- засорение смотровых колодцев при открытых люках;
- разрушение дрен при просадках грунта;
- промерзание дрен, фильтрующих обсыпок и выпусков.

Вертикальные дренажные скважины служат около 6 лет, затем наступает снижение их эффективности водопонижения [8].

Натурные обследования [214] — это экспертно-ревизионная проверка состояния существующих систем защиты от подтопления. Их проводит независимая комиссия в связи с неудовлетворительным функционированием СЗП. Проверяют качество проектирования, строительства и эксплуатации. Выводы комиссии могут содержать указания по составу ремонтно-восстановительных работ или по реконструкции системы (при невозможности ремонта).

Практика эксплуатации дренажных систем [146] показывает, что при ежегодной промывке дренажа в течение первых 2-3 лет его работы в дальнейшем заиливания дрен и фильтрующих обсыпок не происходит.

По данным отечественных натурных обследований [3], исправно обустроенные и ухоженные дренажи могут работать несколько десятилетий без ремонта. В Германии [321] текущие ремонты дренажей проводят один раз в 5 лет, что обеспечивает срок службы дренажа около 30 лет.

Реконструкция систем и сооружений защиты от подтопления может быть вызвана следующими причинами:

- общей реконструкцией города, его центра, районов, микрорайонов, кварталов или групп домов, включая снос старой, ветхой застройки, разуплотнением застройки, созданием лесопарков и зелёных насаждений;
- строительством глубоких коллекторов дождевой канализации К2, что даёт возможность отказаться от станций перекачки дренажных вод;
- полным или частичным отказом эксплуатируемых СЗП;
- моральным износом существующих СЗП в связи с появлением новых и существенно более эффективных, экономичных, энергосберегающих и экологических систем защиты от подтопления застройки.

Реконструкция систем защиты от подтопления — это тоже строительство, но в стеснённых условиях застройки с сохранением элементов существующих систем. Она должна проводиться только при наличии ТЭО и проекта реконструкции. Реконструкция может быть полной или частичной [87].

Технологии реконструкции систем защиты от подтопления в городах разрабатаны недостаточно. Дефицитна малогабаритная техника для проведения работ по устройству дренажей и других систем защиты от подтопления в условиях тесной застройки с обилием существующих сетей водопровода, канализации, теплотрасс, электрокабелей. Поэтому реконструкционные работы содержат большую долю ручного труда.

Теснота застройки принуждает делать траншеи и котлованы с вертикальными креплениями, а часто вообще переходить на закрытые способы прокладки дрен с помощью горизонтального бурения, прокола, продавливания. Такие особенности приводят к значительному удорожанию работ и увеличению их продолжительности. Решению о реконструкции должны предшествовать оптимизационные расчёты по выбору наиболее подходящего варианта проекта реконструкции системы защиты от подтопления.

При реконструкции городской застройки фильтрационные расчеты и моделирование защиты от подтопления значительно усложняются, так как исходная гидрогеологическая информация об участке застройки устаревает вследствие значительных техногенных изменений. В таких условиях весьма актуальными становятся методики автора, изложенные в следующих главах.

### Пример 23. Пластовый дренаж (при реконструкции здания)

На рис. 35 показано устройство пластового дренажа при реконструкции подвала, подверженного подтоплению техногенными грунтовыми водами.

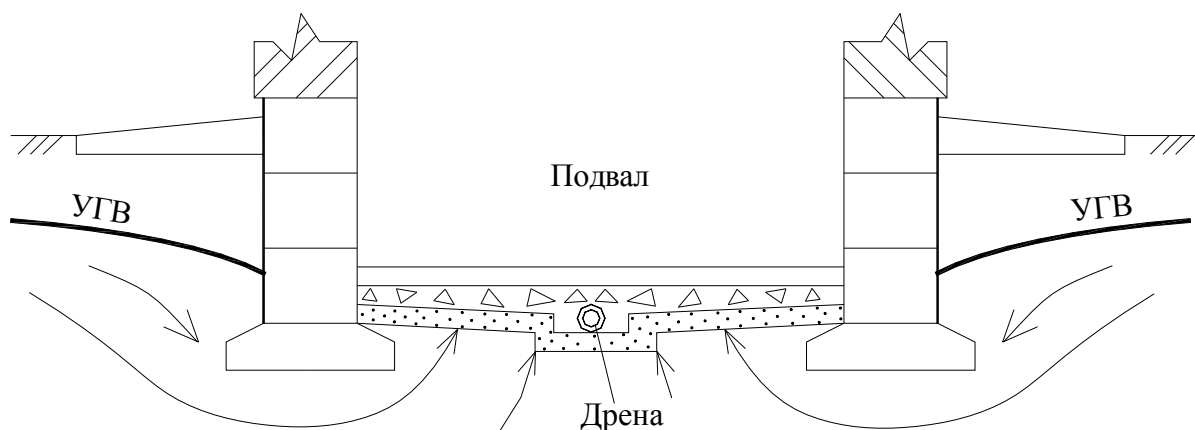


Рис. 35. Пластовый дренаж (реконструкция)

Пол подвала углубляют с уклоном к центру. По грунту насыпают слой песка (min 10 см), в центре укладывают дрена. Затем насыпают слой щебня (min 15 см), который накрывает дрена. Дрена выводят из здания наружу, подсоединяют к смотровому колодцу для стока дренажных вод. Щебень прикрывают рубероидом, делают цементно-песчаную стяжку, а по ней устраивают пол подвала. Таким образом пластовый дренаж можно сооружать и для существующего здания [3].

### Закономерности движения воды и воздуха в пористых средах

Главная цель защиты от подтопления при строительстве состоит в обеспечении положения уровня подземных вод (УПВ) не менее норм осушения [239]. Для подвалов зданий пониженный УПВ должен находиться ниже отметки пола подвала не менее 0,5 метра [208]. В строительных выемках и выработках требуемое понижение УПВ должно приниматься с учетом времени аварийного отключения систем водоотлива и водопонижения, из условий исключения прорывов напорных вод и обеспечения устойчивости прилегающих грунтов [235, п. 18.4]. Главная цель даёт чёткий ориентир для расчёта и моделирования УПВ в технологии городского строительства. Кроме того, нужно определить водопритоки подземных вод в системы водоотлива, водопонижения и дренажа, оценить негативные последствия применения технологических процессов защиты от подтопления на территории застройки. Перечисленные цели можно надёжно обосновать с помощью известных законов движения жидкости и газа в пористых средах [210].

Рассмотрим основные закономерности движения воды и воздуха в пористых средах. Труды по теории фильтрации рассмотрим независимо от срока давности.

Для фильтрационных расчетов применяют следующие основные теории [39; 199; 210]:

- гидравлическая;
- гидродинамическая;
- статистическая.

Эти теории рассматривают движение воды в пористых средах, подчиняющееся закону Дарси. До середины XX века защита от подтопления рассматривалась в рамках фильтрации воды. Последующее развитие технических наук в области влаготеплопереноса и электроосмоса позволило использовать полученные закономерности в технологиях защиты от подтопления. Это связано с тем, что некоторые здания и сооружения — например, элеваторы, музеи, книгохранилища [239] — требуют не только понижения УПВ, но и сушки влажных грунтов основания. Слабопроницаемые глинистые грунты можно осушить лишь специальными способами: вентилированием, вакуумированием, нагнетанием нагретого воздуха, электроосмосом [202].

В главе даны известные закономерности фильтрации воды, воздуха, фильтрационной консолидации грунтов, влаготеплопереноса, электроосмоса, соответствующие дифференциальные уравнения движения. Они приведены в объеме, необходимом и достаточном для разработки надежной защиты от подтопления в городском строительстве. Глава носит справочный характер, дает основу для последующих аналитических выкладок и моделирования.

## § 7. Закономерности фильтрации воды и воздуха

Фильтрацией называют движение жидкости или газа в пористой среде. Под средой подразумевают твёрдую фазу. Общее название для жидкости или газа — флюид [134].

Большинство сред пористые, трещиноватые или трещиновато-пористые: грунты, бетон, кирпич и т.д. Движение жидкости или газа происходит по сообщающимся между собой порам или трещинам. Такие среды называют фильтрующими или проницаемыми. Это некоторые грунты (пески, супеси, суглинки), строительные материалы (щебень, гравий, пористый бетон, кирпичная кладка).

Проницаемость пористой среды надёжно определяют опытным путём в лаборатории или в поле. Наиболее надёжные результаты дают полевые методы, то есть опыты (откачки из скважин и др.), проводимые в натурных условиях на территории будущей стройплощадки. Эти опыты обычно выполняют специализированные изыскательские организации, обладающие необходимым оборудованием и имеющие лицензию на проведение таких работ. В редких случаях проницаемость пористой среды можно рассчитать по ее гранулометрическому составу, например для однородных песков [12].

Водоупором обычно называют грунт, практически не пропускающий воду. Глины при фильтрационных расчетах часто относят к водоупорным, но это водоупор относительный. Наоборот, в механике грунтов при расчете осадок оснований водонасыщенные глины относят к фильтрующим [53; 84; 88; 116; 128; 141; 147; 279; 280; 296]. В дальнейшем, при фильтрационных расчётах и моделировании, водоупором будем называть любую практически непроницаемую твёрдую среду, будь то глина, скала или бетонная стена.

Теория фильтрации при защите от подтопления в городском строительстве рассматривает закономерности фильтрации воды и воздуха с целью проведения количественных расчётов и моделирования по определению:

- положения УПВ при строительстве и эксплуатации защищаемых территорий, зданий или сооружений;
- водоприток в строительные котлованы, траншеи, подземные проходки, системы водопонижения и дренажа;
- движения влаги и воздуха в вентиляционных, вакуумных и пневмо-нагнетательных защитных системах.

Области применения теории фильтрации в городском строительстве перечислены в порядке убывания приоритетов. Главным является определение положения УПВ согласно требованиям СНиП [239]. Основные расчёты и моделирование при защите от подтопления связаны с фильтрацией воды.

Любая пористая среда (рис. 36) состоит из твёрдых частиц и пустых промежутков между ними — пор (или трещин).

Пористостью  $n$  называют отношение объёма пор  $V_{\text{пор}}$  к объёму всего грунта (или материала)  $V_{\text{грунта}}$ :

$$n = V_{\text{пор}} / V_{\text{грунта}}. \quad (10)$$

#### Пример 24. Пористость грунта

Величины пористости грунта обычно лежат в пределах  $n \approx 0,35 \dots 0,45$  [128]. Среднее значение пористости  $n \approx 0,4$ . Например, если песок занимает объём  $1 \text{ м}^3$  (или 1000 литров), то поры в среднем имеют объём около  $0,4 \text{ м}^3$  (или 400 литров).

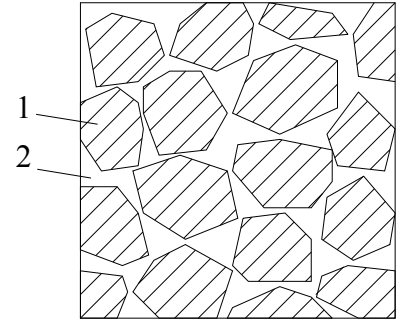


Рис. 36. Образец пористой среды:

1 – твердые частицы; 2 – поры (или трещины)

Коэффициентом пористости  $e$  называется отношение объёма пор  $V_{\text{пор}}$  к объёму твёрдых частиц  $V_{\text{тв.ч}}$ :

$$e = V_{\text{пор}} / V_{\text{тв.ч}}. \quad (11)$$

Величины  $n$  и  $e$  связаны соотношениями:

$$n = e / (1 + e) \quad \text{или} \quad e = n / (1 - n). \quad (12)$$

Отношение свободно вытекшей воды  $V_{\text{воды}}$  к объёму всего грунта (или материала)  $V_{\text{грунта}}$  называют коэффициентом водоотдачи:

$$\mu_{\text{в}} = V_{\text{воды}} / V_{\text{грунта}}. \quad (13)$$

Точнее  $\mu_{\text{в}}$  можно назвать «коэффициент гравитационной водоотдачи».

#### Пример 25. О водоотдаче грунта

Представим, что  $1 \text{ м}^3$  песка полностью водонасыщен, то есть содержит в порах около 400 литров воды. Образец на рис. 36 можно вообразить как кубическую ёмкость с этим песком. Внизу можно поставить сетку и вода будет свободно стекать из песка под влиянием силы тяжести. По такому принципу осушают грунты с помощью различных гравитационных дренажей. Однако из песка вытечет не вся вода, а примерно 200-250 литров. Оставшаяся вода в виде влаги будет удерживаться частицами грунта.

Наоборот, при насыщении грунта (или материала) водой отношение поглощенной воды  $V_{\text{воды}}$  к объёму всего грунта (или материала)  $V_{\text{грунта}}$  называют недостатком насыщения:

$$\mu_{\text{н}} = V_{\text{воды}} / V_{\text{грунта}}. \quad (14)$$

Для большей конкретности коэффициент  $\mu_{\text{н}}$  можно назвать «недостаток гравитационного насыщения».

Величины  $\mu_v$  и  $\mu_n$  примерно равны между собой. Приблизённо можно считать так: сколько грунт впитает воды, столько он и отдаст её [199]. Чем крупнее частицы грунта (или материала), тем лучше его водоотдача. Пористость  $n$  всегда больше, чем  $\mu_v$  и  $\mu_n$ .

В практических расчетах фильтрации подземных вод [208] обычно принимают, что

$$\mu_v = \mu_n = \mu. \quad (15)$$

Н.Н. Веригин назвал данный коэффициент  $\mu$  «гидроёмкость» [40]. У В.А. Мироненко коэффициент  $\mu$  назван «гравитационная ёмкость» [152]. При допущении (15) этот коэффициент можно называть «гравитационная гидроёмкость».

Из сжимаемого грунта вода может вытекать не только под влиянием силы тяжести, но и за счет выдавливания из пор при сжатии грунта. Самым простым бытовым примером является выжимание воды из водонасыщенной поролоновой губки. Так же ведет себя грунт. Когда фундамент здания давит на водонасыщенный грунт основания, то нагрузка от здания вызывает сжатие грунта. Вода без газа и минеральные частицы грунта практически не сжимаемы [296]. Поэтому деформируется скелет грунта в основном за счет переукладки частиц. При этом вода, вытекающая фильтрационным потоком из грунта, освобождает поровое пространство и грунт сжимается. Это уплотнение водонасыщенного грунта называют фильтрационной консолидацией. Уменьшение пористости приводит к еще более сильному уменьшению проницаемости грунта, как минимум в десять раз больше по сравнению с уменьшением пористости [210, с. 39-40].

В гидрогеологии упругая водоотдача пласта проявляется при откачках из скважин, пробуренных на напорные артезианские пласты. Напорный пласт, отдавший воду, сжимается. Обратное насыщение пласта водой через нагнетательные скважины происходит в меньшем объеме, так как в грунтах возникают необратимые деформации сжатия — пластические деформации. Поэтому насыщение водой уплотненного грунта меньше, чем водоотдача [49; 210]. С учетом сказанного такую водоотдачу правильнее называть «упруго-пластическая водоотдача».

В механике грунтов применяют теорию фильтрационной консолидации [53; 84; 88; 116; 128; 141; 147; 279; 280; 296]. Главной целью этой теории является определение осадок фундаментов. В нашей работе теория фильтрационной консолидации использована для оценки снижения проницаемости грунта под фундаментами зданий и сооружений. Рассмотрены полностью водонасыщенные подтопленные грунты, у которых сжимаемость происходит за счет уменьшения порового пространства, а поровая вода практически не сжимаема.



В книге В.А. Мироненко и В.М. Шестакова [153] отмечено о некоторой несогласованности понятий теории фильтрации и механики грунтов, связанных с фильтрацией воды. Например, в определениях, связанных с упруго-пластическим режимом фильтрации. Достаточно сравнить работы [40; 49; 101; 199; 210; 314], чтобы убедиться в этом. Поэтому рассмотрим подробно водоотдачу грунта при упруго-пластическом режиме фильтрации (фильтрационной консолидации).

В подавляющем числе гидрогеологических публикаций содержится упрощенная одномерная предпосылка о том, что водонасыщенный пласт при упруго-пластической водоотдаче сжимается лишь в вертикальном направлении [210]. Это справедливо приближенно для задач откачки жидкости из скважин. При рассмотрении фильтрационной консолидации в механике грунтов первоначально в 1920-30-х гг. К. Терцаги [351] и Н.М. Герсевич [53] использовали такое же допущение. Однако под давлением фундаментов зданий и сооружений грунт чаще всего испытывает плоские и объемные деформации, двух- и трехмерные. Поэтому В.А. Флорин [294; 298] предложил рассматривать объемную деформацию грунта под фундаментами в процессе фильтрационной консолидации. При этом воду он считал практически несжимаемой. Это допущение принято в наших дальнейших расчетах.

Коэффициент упруго-пластической водоотдачи грунта  $\mu_{уп}$  при фильтрационной консолидации по В.А. Флорину [296, с. 166] в гидрогеологических обозначениях [49; 152; 153; 314] можно записать в виде

$$\mu_{уп} = \eta_{уп} M, \quad (16)$$

$$\eta_{уп} = \frac{N \gamma a_c}{(1+e) [1 + (N-1) \xi]}, \quad (17)$$

где  $\eta_{уп}$  — коэффициент, аналогичный гидрогеологическому коэффициенту упругости горной породы [152], но отражающий физический смысл фильтрационной консолидации грунта,  $m^{-1}$ ;  $M$  — мощность водонасыщенного грунта,  $m$ ;  $\gamma$  — удельный вес воды,  $H/m^3$ ;  $a_c$  — коэффициент сжимаемости грунта,  $Pa^{-1}$ ;  $\xi$  — коэффициент бокового давления грунта (безразмерный);  $e$  — коэффициент пористости грунта (безразмерный);  $N$  — число пространственных измерений, например, для плоской в разрезе двумерной задачи  $N = 2$ . Отметим особенность, что для двумерной осесимметричной (профильно-радиальной) задачи с координатами  $r$  и  $z$  следует брать число  $N = 3$ , так как грунт испытывает пространственную деформацию, а не плоскую [296].

Коэффициент упруго-пластической водоотдачи грунта  $\mu_{уп}$  при фильтрационной консолидации аналогичен по размерности коэффициенту гравита-

ционной водоотдачи  $\mu_v$  (безразмерные величины). Физический смысл  $\mu_{уп}$  — отношение объема поровой воды, отжатой из грунта под влиянием дополнительной нагрузки в процессе фильтрационной консолидации при уменьшении избыточного порового давления, к объему грунта.

#### Пример 26. Коэффициент упруго-пластической водоотдачи

Суглинок со средней сжимаемостью  $a_c = 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$ , коэффициентом бокового давления  $\xi = 0,6$  и коэффициентом пористости  $e = 0,8$  в условиях пространственной трехмерной фильтрационной консолидации имеет при  $M = 1 \text{ м}$  коэффициент упруго-пластической водоотдачи по формуле (16)

$$\mu_{уп} = \frac{3\gamma a_c M}{(1+e)[1+2\xi]} = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{(1+0,8)[1+2 \cdot 0,6]} = 7,58 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент гравитационной водоотдачи суглинков по данным [201] может быть в пределах  $\mu_v = 6 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, гравитационная водоотдача данного грунта как минимум на порядок больше, чем водоотдача вследствие фильтрационной консолидации. Однако при сильно сжимаемых грунтах величины  $\mu_v$  и  $\mu_{уп}$  могут быть соизмеримы [49; 152].

Движение жидкости при фильтрации принято рассматривать как сплошной поток, будто бы твёрдых частиц пористой среды нет. Поэтому фильтрационные потоки формально имеют сходство с ламинарными потоками в трубах и каналах. Перечислим элементы фильтрационных потоков.

Свободная поверхность — это граница раздела между полностью водонасыщенной пористой средой и осушенной её частью (рис. 37). На этой границе давление обычно равно атмосферному  $p_{атм}$ . Особенностью является то, что над свободной поверхностью в пористой среде имеется капиллярная зона высотой  $h_k$ , которая не полностью водонасыщена, но где часть влаги удерживается капиллярными силами пор.

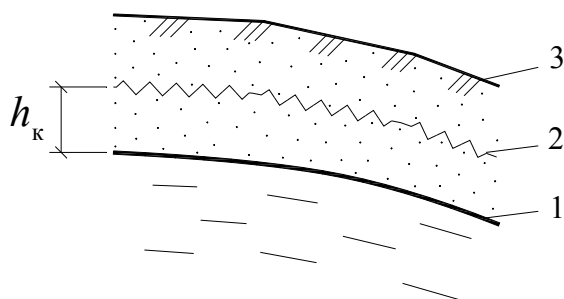


Рис. 37. Фильтрационный поток:  
1 — свободная поверхность (УГВ);  
2 — верх капиллярной зоны;  
3 — поверхность земли

Все фильтрационные потоки делятся на:

- напорные (без свободной поверхности);
- безнапорные (со свободной поверхностью);
- напорно-безнапорные.

### Пример 27. Напорные и безнапорные потоки

Напорный и безнапорный потоки проиллюстрированы на рис. 38, где изображено сечение станции метро мелкого заложения, частично перекрывшее поток грунтовых вод. До и после станции фильтрационный поток является безнапорным, где свободная поверхность есть уровень грунтовых вод (УГВ). Под станцией в слое щебня этот поток превращается в напорный, так как у него исчезает свободная поверхность. Пьезометрическая поверхность напоров в пределах станции показана штриховой линией. Это означает, что снизу грунтовая вода давит на конструкцию, стремится просочиться внутрь. Стрелками показаны линии тока. Под грунтовыми водами залегает водоупор (показан штриховкой).

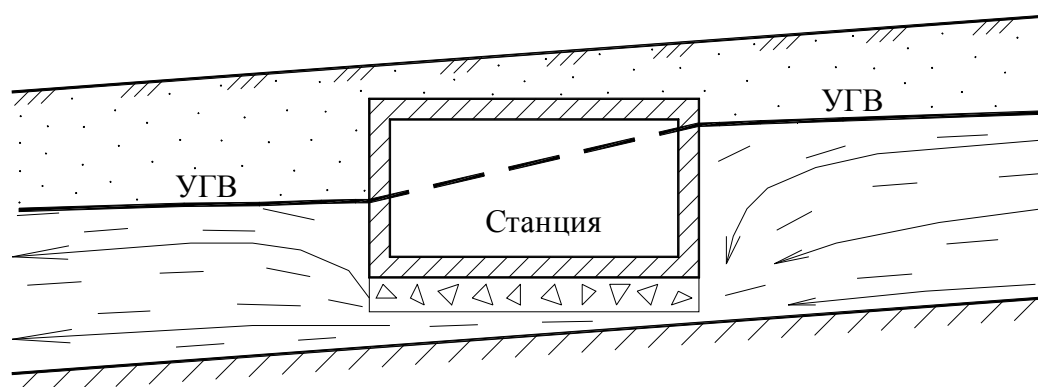


Рис. 38. Поток грунтовых вод и станция метро

Линия тока — это элементарная струйка потока. Каждый фильтрационный поток можно представить состоящим из пучка струек (см. рис. 38). Линии тока изображают идеализированно в виде плавных линий. На самом же деле струйки воды в пористой среде весьма извилисты.

Площадь живого сечения потока  $\omega$  — это площадь поперечного сечения фильтрационного потока, перпендикулярная линиям тока. В теории фильтрации принято считать поток сплошным.

### Пример 28. Живое сечение потока

На рис. 39 показано живое сечение потока площадью  $\omega = 1 \times 1 = 1 \text{ м}^2$ . Обратим внимание, что площадь взята сплошная, и пор, и твёрдой фазы. То есть считают, что вода идёт по всему сечению сплошным потоком. На самом деле вода идёт по порам. То, что в теории фильтрации движение воды относят ко всему поперечному сечению, придает ей сходство с общей гидравликой, механикой жидкости и газа [254; 256].

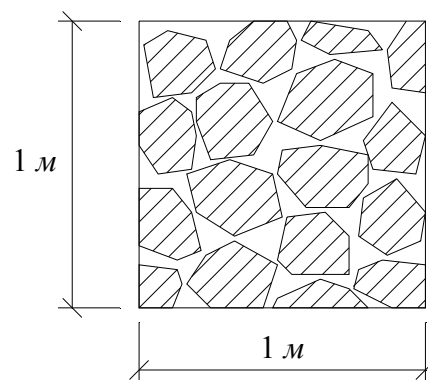


Рис. 39. Живое сечение потока

Фильтрационный расход  $Q$  — это объём воды  $V$ , проходящий за время  $t$  через площадь живого сечения потока:

$$Q = V/t. \quad (18)$$

Фильтрационный расход  $Q$  принято измерять в  $м^3/сут$ .

Скорость фильтрации  $\mathcal{V}$  — это частное от деления фильтрационного расхода на площадь живого сечения:

$$\mathcal{V} = Q/\omega. \quad (19)$$

Скорость фильтрации  $\mathcal{V}$  принято измерять в  $м/сут$ . Скорость фильтрации — это средняя скорость в пределах живого сечения потока. Иногда её называют удельным расходом, что тоже верно по смыслу формулы (19).

Фильтрационный напор  $H$  может быть найден по формулам:

$$H = z + h_p; \quad (20)$$

$$H = z + p_{изб}/\gamma, \quad (21)$$

где  $z$  — вертикальная отметка точки потока, отсчитываемая от горизонтальной нулевой плоскости 0-0 (рис. 40);  $h_p$  — пьезометрическая высота или пьезометрический напор (столб воды над точкой);  $p_{изб}$  — избыточное (манометрическое) давление в точке потока;  $\gamma$  — удельный вес воды. Напор измеряют в метрах по вертикали.

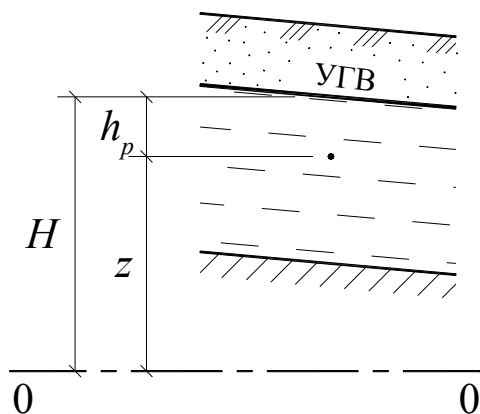


Рис. 40. Фильтрационный напор

На практике чаще всего используют формулу (20), так как составляющие напора  $z$  и  $h_p$  определяют по замерам уровней воды. Формулу (21) используют реже, но ее можно применять для определения давления воды по известной величине напора  $H$ .

На рис. 40 изображен поток грунтовых вод, текущий над водоупорной породой. Обратим внимание, что уклоны поверхности земли, УГВ и водоупора примерно равны. Это довольно типич-

ный случай. Вода в проницаемом грунте над водоупором движется в направлении от большего напора к меньшему. Если точки потока принять на свободной поверхности (УГВ), то их отметки будут напорами. Таким образом, уклон УГВ показывает направление уменьшения напора в грунтовых водах и, следовательно, направление потока грунтовых вод. Это весьма важное свойство УГВ, позволяющее с помощью буровых скважин определять направле-

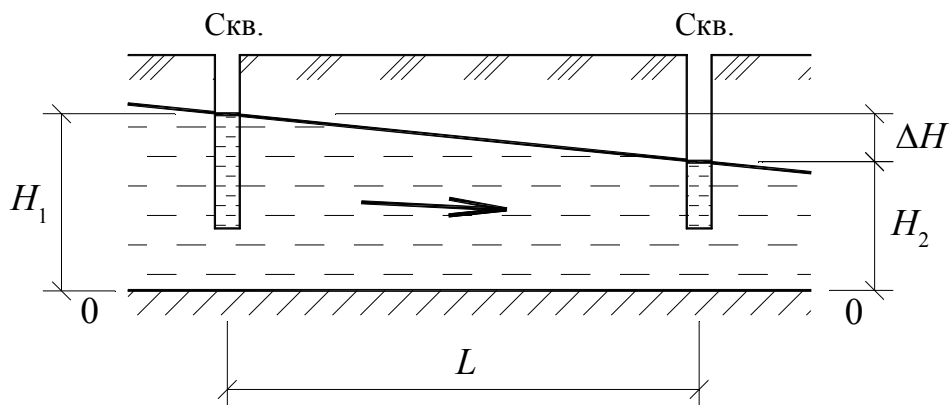


Рис. 41. Поток грунтовых вод

ние подземных потоков (рис. 41). Измеряя уровни воды в скважинах (см. рис. 41) и нивелируя, можно определить направление движения грунтовых вод на местности с плоским поверхностным рельефом. Работа со скважинами составляет основу натурных наблюдений за подземными водами.

На рис. 41 напоры  $H_1$  и  $H_2$  совпадают с мощностью грунтовых вод, так как плоскость отсчета напоров 0-0 совпала с горизонтальной поверхностью — кровлей — водоупора. Такое совмещение 0-0 с водоупором является приближённым приёмом, так как в природе поверхность водоупорных пород до 0,01 включительно можно заменить слабоуклонную поверхность водоупора горизонтальной плоскостью 0-0 [208].

В случае горизонтального водоупора, с которым совмещена плоскость отсчета напоров 0-0 (см. рис. 41), напор  $H$  совпадает с мощностью грунтовых вод  $h$ . Далее, при обозначении напора как  $h$ , будем иметь в виду, что водоупор в основании грунтовых вод горизонтален и через него проведена плоскость 0-0.

#### Пример 29. Горизонтальная поверхность водоупора

В городе Омске при довольно плоском рельефе с уклонами 0,005...0,01 можно считать поверхность водоупора горизонтальной и совмещать с плоскостью отсчёта напоров 0-0.

Движение потока при фильтрации всегда происходит под влиянием разности напоров  $\Delta H$ , от большего напора к меньшему. Например, грунтовые воды, показанные на рис. 41, движутся от участка с напором  $H_1$  к участку с напором  $H_2$ . Таким образом, разность напоров

$$\Delta H = H_1 - H_2. \quad (22)$$

Можно сказать, что  $\Delta H$  является причиной движения воды. Если  $\Delta H = 0$ , то движения воды нет. Это наблюдается, когда УГВ имеет горизонтальное

положение. Величину  $\Delta H$  можно также называть перепадом напоров. Численно разность напоров  $\Delta H$  равна потерям напора  $\Delta H_{\text{пот}}$  при движении воды. Потери напора происходят в фильтрационных потоках вследствие проявления сил трения.

Длиной пути фильтрации  $L$  (м) называют расстояние, проходимое фильтрационным потоком (см. рис. 41).

Пьезометрическим уклоном или градиентом напора  $I$  называют отношение разности напоров  $\Delta H$  (или потерь напора  $\Delta H_{\text{пот}}$ ) к длине пути фильтрации  $L$ :

$$I = \Delta H / L = \Delta H_{\text{пот}} / L. \quad (23)$$

Наличие разности напоров само по себе ещё не означает появление фильтрации в грунте или материале. Для возникновения фильтрационного потока необходимо, чтобы среда обладала проницаемостью.

Подавляющее число фильтрационных потоков происходит в ламинарном режиме [12]. Такие потоки достаточно точно описываются эмпирическим законом Дарси. Например, все расчётные формулы фильтрации в справочном пособии к СНиП [208] основаны на законе Дарси. Тщательные многолетние лабораторные опыты В.М. Павилонского (ВНИИ ВОДГЕО) с разнообразными глинистыми грунтами [182; 342] показали, что закон Дарси соблюдается даже в глинах, а начальный градиент напора отсутствует. Известный австралийский геолог Р.Е. Чепмен (R.E. Chapman) пришел [305], ссылаясь на работы Х.В. Олсена (H.W. Olsen) [340; 341], к тем же выводам, что и В.М. Павилонский. Упомянутые авторы сошлись на мнении, что закон Дарси не имеет нижнего предела, то есть он применим для любых глинистых и песчаных грунтов. Верхний предел закона Дарси (турбулентность) имеет место для крупнообломочных материалов и грунтов [12]. В нашей работе рассмотрены фильтрационные процессы в пределах применимости закона Дарси в песчаных, глинистых грунтах и искусственных материалах (бетонах, кирпиче и т.д.).

Закон Дарси для воды — основной закон фильтрации — связывает скорость фильтрации  $\mathcal{V}$  (м/сут) с коэффициентом фильтрации пористой среды  $k$  (м/сут), разностью напоров (потерями напора)  $\Delta H$  (м) и длиной пути фильтрации  $L$  (м) так:

$$\mathcal{V} = k \Delta H / L \quad \text{или} \quad \mathcal{V} = k I. \quad (24)$$

Закон Дарси в дифференциальной форме имеет вид

$$\mathcal{V} = -k \frac{dH}{dL}, \quad (25)$$

где  $dH$  — приращение напора на бесконечно малом отрезке длины пути фильтрации  $dL$ . Фильтрация происходит от большего напора  $H_1$  к меньшему  $H_2$ , но приращение напора  $dH$  отрицательное, так как напор уменьшается по ходу движения потока, поэтому в дифференциальной записи (25) закон Дарси имеет знак минус.

Коэффициент фильтрации  $k$  — это характеристика проницаемости среды при фильтрации воды. Величина  $k$  имеет размерность скорости. Обычно  $k$  измеряют в  $м/сут$ , не в единицах СИ. При необходимости  $k$  можно измерять в  $м/с$ , но тогда значения  $k$  получаются мелкие, что не очень удобно.

Коэффициент фильтрации  $k$ , определенный при некоторой температуре  $T$ , °С, следует приводить к коэффициенту фильтрации  $k_{10}$  при температуре +10 °С по формуле А. Хазена (Allen Hazen, 1892) [187], которая имеет вид

$$k_{10} = k / (0,7 + 0,03T). \quad (26)$$

Зная величину  $k_{10}$ , можно рассчитать фильтрацию воды при любой температуре, вычисляя  $k$  обратно по формуле (26).

#### Пример 30. Температурная поправка для коэффициента фильтрации

Изыскательская организация провела откачку воды из скважины и определила коэффициент фильтрации водоносного пласта  $k = 7,2$   $м/сут$  при естественной зимней температуре грунтовой воды +5 °С. По формуле (26) был получен

$$k_{10} = k / (0,7 + 0,03T) = 7,2 / (0,7 + 0,03 \cdot 5) = 8,47$$

$м/сут$  и записан в отчет по инженерно-гидрогеологическим изысканиям. Определить, как изменится проницаемость грунта в случае прорыва теплотрассы со средней температурой фильтрующейся воды +95 °С по сравнению с грунтом при естественной зимней температуре грунтовых вод +5 °С.

Обращая формулу (26), находим значение коэффициента фильтрации при температуре +95°С:

$$k_{95} = k_{10} \cdot (0,7 + 0,03T) = 8,47 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot 95) = 30,07$$

откуда следует, что проницаемость фильтрующейся воды из теплотрассы увеличится в

$$k_{95} / k = 30,07 / 7,2 = 4,2 \text{ раза.}$$

Поэтому прорывы теплотрасс весьма опасны с точки зрения подтопления, так как горячая вода, по сравнению с холодной, гораздо легче просачивается через грунт. Это может привести к быстрому подтоплению близлежащих подвалов и погребов.

Закон Дарси для любого флюида (жидкости или газа) связывает скорость фильтрации  $\mathcal{V}$  ( $м/сут$ ) с коэффициентом проницаемости пористой среды  $k_0$  ( $м^2$ ), динамической вязкостью флюида  $\mu_0$  ( $Па \cdot с$ ), разностью приведенных давлений (потерями давления)  $\Delta p_{пр}$  ( $м$ ) и длиной пути фильтрации  $L$  ( $м$ ) [210]:

$$\mathcal{V} = k_0 \Delta p_{пр} / (\mu_0 L). \quad (27)$$

Приведенное давление для флюидов  $p_{\text{пр}}$  в гидрогеологии подробно рассмотрел А.И. Силин-Бекчурин [233]. Величина  $p_{\text{пр}}$  в механике жидкости и газа рассмотрена в [256]. Для газов в величине  $p_{\text{пр}}$  обычно не учитывают силу тяжести вследствие малого удельного веса газа  $\gamma_r$  [12].

Коэффициент проницаемости  $k_0$  ( $\text{м}^2$ ) связан с коэффициентом фильтрации по воде  $k$  ( $\text{м/сут}$ ) такими зависимостями [253 с. 23]:

$$k = 86400 \gamma k_0 / \mu_0 \quad (28)$$

или

$$k = 86400 g k_0 / \nu_{\text{воды}}, \quad (29)$$

где  $\gamma$  — удельный вес воды при температуре  $+10^\circ\text{C}$ ,  $\text{Н/м}^3$ ;  $\mu_0$  — динамическая вязкость воды,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\nu_{\text{воды}}$  — кинематическая вязкость воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Здесь и ниже, если коэффициент фильтрации вычислять стандартно в СИ в  $\text{м/с}$ , то никакие числовые коэффициенты типа 86400 в формулах не нужны. При температуре  $+10^\circ\text{C}$  можно записать простую переводную формулу для коэффициента фильтрации ( $\text{м/сут}$ ):

$$k = 6,49 \cdot 10^{11} k_0. \quad (30)$$

В строительных нормах [242] приводят так называемое сопротивление воздухопроницанию  $R_u$ ,  $\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/кг}$ , которое относят к определенной толщине строительного материала  $\delta$ ,  $\text{м}$ . Его можно пересчитать на коэффициенты проницаемости  $k_0$  ( $\text{м}^2$ ) и коэффициент фильтрации по воде  $k$  ( $\text{м/сут}$ ) с помощью следующих формул [253, с. 23]:

$$k_0 = \delta \nu_{\text{возд}} / (3600 R_u) \quad (31)$$

и

$$k = g \delta \nu_{\text{возд}} / (3600 \nu_{\text{воды}} R_u), \quad (32)$$

где  $\nu_{\text{возд}}$  — кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Газы, в отличие от большинства жидкостей, сжимаемы. Поэтому для газов удобно применять массовую скорость фильтрации [12; 114]

$$W_r = \rho \mathcal{V}, \quad (33)$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ .

Фильтрационный (объемный) расход несжимаемой жидкости ( $\text{м}^3/\text{сут}$ )

$$Q = \mathcal{V} \omega, \quad (34)$$

где  $\omega$  — площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ .

Газы сжимаемы, поэтому для них применяют массовый расход [12; 114],  $\text{кг/сут}$ :

$$G_r = W_r \omega = \rho \omega \mathcal{V} = \rho Q. \quad (35)$$



Рассмотрим трубу, через которую фильтруется воздух под влиянием разности приведенных давлений  $\Delta p_{\text{пр}} = p_1 - p_2$  при постоянной температуре  $T$  (рис. 42). Труба заполнена материалом с проницаемостью  $k_0$ . Длина пути фильтрации  $L$ . Живое (поперечное) сечение фильтрационного потока  $\omega$ . Фильтрация газа подчиняется закону Дарси, то есть происходит в ламинарном режиме [12].

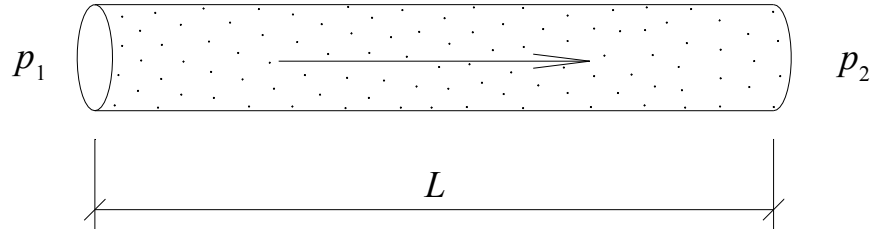


Рис. 42. К фильтрации воздуха

В условиях давлений, соизмеримых с атмосферным  $p_{\text{атм}}$ , воздух можно считать идеальным газом [253]. Поэтому плотность воздуха можно определять по уравнению Б.П. Клапейрона (В.Р. Clapeyron):

$$\rho = p / \beta, \quad (36)$$

где  $\beta = R_{\text{г}} T$  — константа;  $R_{\text{г}}$  — газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К);  $T$  — абсолютная температура воздуха, К.

Так как каждому давлению воздуха соответствует своя плотность, то для вычисления массового расхода воздуха по формуле (35) надо взять среднюю величину

$$\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2 = (p_1 + p_2) / (2\beta).$$

Тогда массовый расход воздуха по (35) с учетом (27) и формулы Клапейрона можно записать после несложных алгебраических преобразований так:

$$G_{\text{г}} = k_0 \omega (p_1^2 + p_2^2) / (2\mu_0 \beta L). \quad (37)$$

Если требуется вычислить не массовый, а объемный расход воздуха  $Q$ , то его надо привести к нормальному атмосферному давлению  $p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$ . Это можно сделать следующим образом. Допустим, вычисляем расход, выходящий из правого сечения трубы при давлении воздуха  $p_2$  (см. рис. 42). По закону Р. Бойля (R. Boyle) и Э. Мариотта (A. Mariotte)

$$p_{\text{атм}} V_{\text{атм}} = p_2 V_2, \quad (38)$$

где  $V_{\text{атм}}$  и  $V_2$  — объемы воздуха соответственно при атмосферном давлении  $p_{\text{атм}}$  и  $p_2$ .

Разделим последнее уравнение на время  $t$  и выразим объемный расход воздуха, приведенный к атмосферному давлению:

$$Q = Q_{\text{атм}} = (p_2 / p_{\text{атм}}) Q_2.$$

Подставим сюда массовый расход по (37), учитывая (35) и (36). Тогда после сокращений получим объемный расход воздуха, приведенный к атмосферному давлению, в виде

$$Q = k_0 \omega (p_1^2 + p_2^2) / (2\mu_0 p_{\text{атм}} L). \quad (39)$$

Если через трубу фильтруется вода под влиянием разности напоров  $\Delta H = H_1 - H_2$ , то объемный расход по закону Дарси для воды (24) с учетом (34) можно записать так:

$$Q = k \omega (H_1 + H_2) / L. \quad (40)$$

Сравнивая (39) и (40), нетрудно заметить, что выражения идентичны, если иметь в виду следующую замену:

$$kH = k_0 p^2 / (2\mu_0 p_{\text{атм}}). \quad (41)$$

Такая аналогия впервые была замечена Л.С. Лейбензоном [125]. При использовании формул (39) и (40) надо учитывать размерности величин.

Для грунтов и материалов характерным является то, что чем крупнее сквозные поры (или трещины), тем больше коэффициент фильтрации. При  $k > 2 \text{ м/сут}$  грунты и материалы считаются хорошо проницаемыми (пески, щебень, гравий, пористый бетон, кирпичная кладка). При  $0,01 < k < 2 \text{ м/сут}$  — слабопроницаемыми (супеси, суглинки). При  $k < 0,01 \text{ м/сут}$  — это относительные водоупоры (например, глины), которые можно осушить лишь с помощью специальных технологий, например электроосмосом [202]. При  $k < 0,001 \text{ м/сут}$  грунт принимают за водоупор при проектировании строительного водопонижения [238, с. 4].

Коэффициенты фильтрации  $k$ , водоотдачи  $\mu_v$ , недостаток насыщения  $\mu_n$ , высота капиллярной зоны  $h_k$  — это фильтрационные характеристики по воде для пористых сред: грунтов, материалов. Наиболее надёжно их определяют опытным путём. При первоначальных ориентировочных расчётах эти характеристики могут быть приняты по литературным данным [12; 13; 199; 201; 273], например, с использованием табл. 5.

Фильтрационные характеристики грунтов для целей защиты от подтопления застройки определяют в ходе инженерно-строительных изысканий. Самым достоверным способом их определения являются опытные откачки из скважин, то есть полевой способ. Менее точным способом являются лабораторные определения по образцам грунтов, взятых в ходе бурения из скважин или откопки шурфов [129, с. 134].

Фильтрационные характеристики пористых сред

Пористые среды (грунты и материалы)	Коэффициент фильтрации $k$ , м/сут	Коэффициент водоотдачи $\mu_v$	Высота капиллярной зоны $h_k$ , м
Водоупорные глины, плотный бетон без швов, толь, рубероид, фанера	Менее 0,01	Менее 0,05	2 – 4 (глины)
Суглинки, штукатурка	0,01 – 0,5	0,05 – 0,1	1 – 2
Супеси, лёссы	0,5 – 2	0,1 – 0,2	1 – 2
Пески (мелко-, средне-, крупнозер- нистые), кирпичная кладка	2 – 50	0,2 – 0,25	0,2 – 0,5
Щебень, гравий, пористый бетон, керамзит, дорнит	50 – 200	0,25 – 0,4	0 – 0,1

Фильтрационные характеристики искусственных материалов определяют обычно лабораторным способом. Полевые определения характеристик искусственных материалов производят крайне редко, например при исследовании бетонных гидротехнических плотин [322].

В городах грунты подвержены сильному влиянию строительной деятельности человека. Возникают искусственные грунты, например, при гидронамыве территории. На стройках остаются погребенными строительный мусор, битый кирпич, которые образуют грунты так называемого культурного слоя. Фундаменты зданий пронизывают и уплотняют грунты оснований.

При насыщении пористой среды частично водой и частично воздухом они взаимно влияют на проницаемость друг друга. Тогда вводят понятие фазовой проницаемости по жидкости  $k_w$  (воде) и по газу  $k_g$  (воздуху) с размерностью  $m^2$  [208]. Можно также называть  $k_w$  — водопроницаемость, а  $k_g$  — воздухопроницаемость. Обзор теории фазовой проницаемости изложен в [210]. Рассмотрим фазовую проницаемость песчаных и глинистых грунтов.

Для охарактеризования фазовой проницаемости флюида вначале надо ввести понятия влажности и степени влажности грунта.

Влажность грунта  $W$  (кг/кг) — это отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы (массовая влажность). Это стандартный термин по ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Обычно влажность  $W$  выражают в %, но допускается и в долях единицы. Иногда  $W$  называют влагосодержанием [208].

Объемная влажность  $w$  — это отношение объема воды в грунте к объему этого грунта, высушенного до постоянной массы [302]. Связаны объемная и массовая влажности такими формулами:

$$w = (1 - n)(\rho_s / \rho) W \quad (42)$$

и

$$w = (\rho_d / \rho) W, \quad (43)$$

где  $n$  — пористость грунта;  $\rho$  — плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [254; 256];  $\rho_s$  — плотность частиц грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_d$  — плотность сухого грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [128].

Для большинства песчаных и глинистых грунтов, анализируя их инженерную петрологию [128], можно приближенно записать:

$$w \approx 2,7(1 - n) W. \quad (44)$$

Гигроскопическая влажность  $W_m$  по ГОСТу — это влажность грунта в воздушно-сухом состоянии, то есть в состоянии равновесия с влажностью и температурой окружающего воздуха.

Величине массовой влажности  $W_m$  соответствует объемная гигроскопическая влажность  $w_m$ , при которой начинается движение воды в порах грунта под влиянием силы тяжести. А.Ф. Лебедев назвал эту величину максимальной молекулярной влагоемкостью [124].

Степень влажности (насыщенности) грунта водой  $G$  — это отношение измеренной влажности грунта  $W$  ( $\text{кг}/\text{кг}$ ) к его влажности в состоянии полного водонасыщения без воздуха  $W_0$  ( $\text{кг}/\text{кг}$ ), то есть [88; 141]

$$G = W / W_0. \quad (45)$$

Диапазон степени влажности грунта:

$$0 \leq G \leq 1.$$

При предельных значениях  $G$  фазовая проницаемость по воде или по воздуху стремится к коэффициенту проницаемости пористой среды  $k_0$  ( $\text{м}^2$ ).

Например, при  $G = 1$  грунт полностью водонасыщен и фазовая проницаемость по воде  $k_w = k_0$ , а по воздуху  $k_g = 0$ . Воздух не может пройти через грунт, у которого поры полностью заполнены водой. Даже при не совсем полном водонасыщении грунта воздухопроницаемость может быть нулевой.

Фазовая проницаемость по воде была изучена С.Ф. Аверьяновым [5], который получил теоретическим путем формулу для коэффициента водопроницаемости грунта, содержащего воздух, в виде

$$k_w = k [(w - w_m) / (n - w_m)]^{3,5}. \quad (46)$$

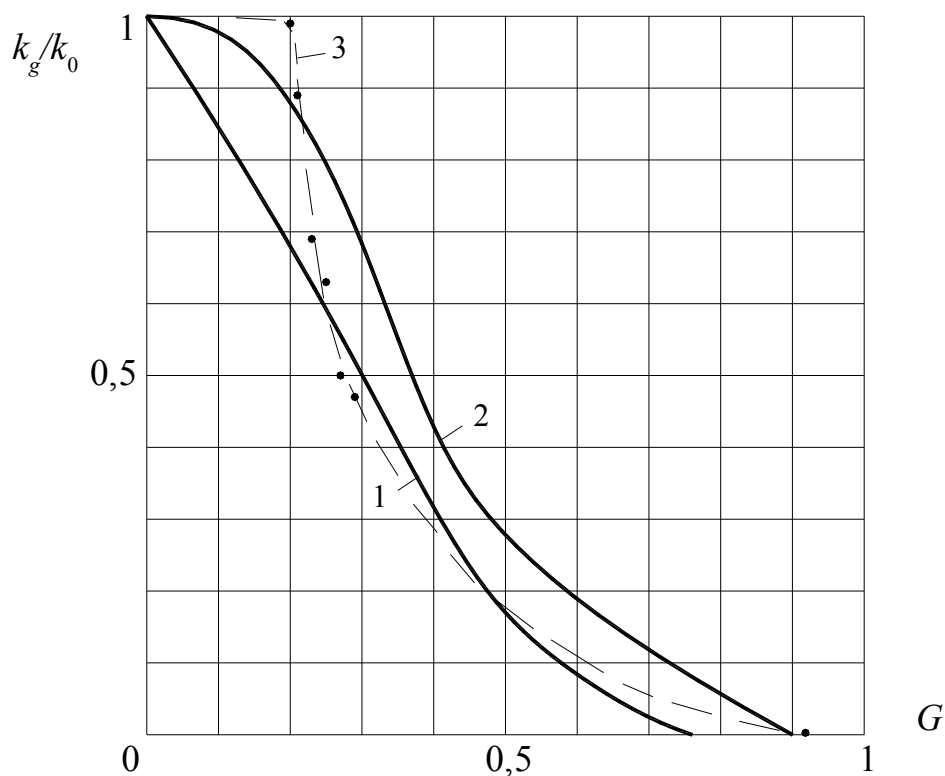


Рис. 43. Зависимость относительной фазовой проницаемости по воздуху: 1 — для глинистых грунтов [208]; 2 — для песчаных грунтов [12; 115]; 3 — опытная кривая с точками для неравномерно увлажненного песка (см. пример 31)

Формула С.Ф. Аверьянова (46) проверена многочисленными лабораторными и полевыми опытами отечественных и зарубежных исследователей [39; 198; 314; 316] и является достоверной.

На рис. 43 показаны зависимости относительной воздухопроницаемости  $k_g/k_0$  от степени влажности  $G$  песчаных и глинистых грунтов. Для сравнения точками показаны результаты опытов автора, кратко изложенных в примере 31.

#### Пример 31. Опыты по воздухопроницаемости влажного песка

В 1990-х годах автор провел опыты в лаборатории гидравлики СибАДИ при участии студентов факультета промышленного и гражданского строительства (ПГС) по определению воздухопроницаемости песка с разной степенью влажности. Опыты состоялись частично на занятиях по гидравлике [254], аэродинамике [253] и механике жидкости и газа [256], а также вне занятий факультативно. Автором был разработан простой, недорогой и достаточно точный прибор (рис. 44), который дает погрешность измерения величин воздухопроницаемости менее 1 %. Прибор позволяет создавать небольшой вакуум, одновременно измеряя объемный расход воздуха, проходящего через образец пористого материала.

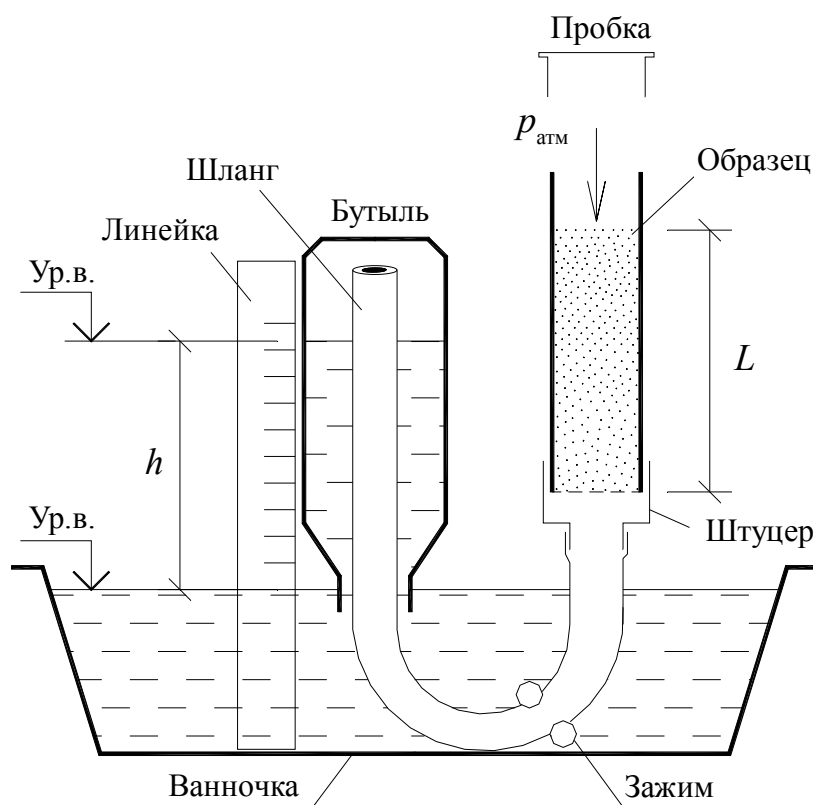


Рис. 44. Прибор для измерения воздухопроницаемости

Для сборки прибора потребовалась стеклянная бутылка с нанесенной шкалой объемов, резиновый шланг с внешним диаметром меньше внутреннего диаметра горлышка бутылки (с зазором), стеклянная трубка, заполненная песком с мелкой сеткой внизу, пробка и штуцер, зажим для шланга, широкая ванночка, резиновая груша. Бутылку и трубку с образцом пористого материала подвешиваются на штатив.

Перепад приведенных давлений при фильтрации воздуха через пористый образец создается вакуумом  $p_v = \gamma h$ , где  $\gamma$  — удельный вес воды;  $h$  — разность уровней воды в бутылке и ванночке. Вначале сухой шланг заводится в бутылку до ее дна. Бутылку переворачивается и подвешивается на штатив так, чтобы горлышко погрузилось под уровень воды в ванночке на 1 см. Воздух из бутылки отсасывается через шланг резиновой грушей, пока уровень воды в бутылке не поднимется до перевернутого дна бутылки, но так, чтобы не переливаться через шланг (вода не должна попадать в шланг). Шланг перекрывается зажимом, присоединяется через штуцер к трубке с образцом пористого материала, на которую сверху надета герметичная пробка (см. рис. 44). Все соединения промазываются пластичным герметиком. Прибор готов к проведению опыта.

При одновременном открытии зажима и пробки воздух стремится пройти через пористый образец в бутылку. При этом уровень воды в бутылке постепенно падает. Данный процесс с учетом закона Дарси для газа (27) можно описать таким исходным дифференциальным уравнением баланса воздуха:

$$\omega_B \frac{dh}{dt} = \omega \frac{k_g}{\mu_0} \cdot \frac{\gamma h}{L},$$

где  $\omega_B$  — площадь внутреннего поперечного сечения бутылки;  $t$  — время;  $\omega$  — поперечное сечение образца;  $L$  — путь фильтрации (см. рис. 44);  $k_g$  — коэффициент воздухопроницаемости образца при определенной степени влажности;  $\mu_0$  — динамическая вязкость воздуха при определенной температуре;  $\gamma$  — удельный вес воды. Так как средний вакуум был около 0,1 м вод. ст. (1 % от  $p_{\text{атм}}$ ), то изменение объемов воздуха по закону Р. Бойля и Э. Мариотта (38) не учитывалось вследствие малой погрешности.

При начальном перепаде уровней воды  $h_0$  (начальное условие) записанное исходное уравнение имеет решение, выраженное относительно коэффициента воздухопроницаемости в виде

$$k_0 = [\mu_0 \omega_B L \ln(h_0/h)]/(\omega \gamma t).$$

Данная формула использована для обработки опытных данных. Она аналогична известной формуле для прибора-трубки Г.Н. Каменского [107, с. 118], которая предназначена для определения коэффициента фильтрации песков.

В качестве образца пористого материала был взят чистый речной песок на отмели Иртыша с эффективным диаметром  $d_{10} = 0,1$  мм и коэффициентом неоднородности  $K_n = 2$  [128, с. 282]. Коэффициент фильтрации песка по воде  $k = 9,98$  м/сут, среднее значение которого определено на приборе Тима [302] из серии опытов. В высушенном состоянии на приборе (см. рис. 44) определен коэффициент проницаемости песка  $k_0 = 1,53 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>, что соответствует  $k = 9,93$  м/сут. Таким образом, проницаемости практически совпали.

В начале опытов песок находился в воздушно-сухом состоянии толщиной  $L = 10$  см. Его воздухопроницаемость  $k_g$  практически равнялась проницаемости  $k_0$ , о чем свидетельствует самая высокая опытная точка на рис. 43. Затем сверху была проимитирована инфильтрация воды в виде капель. Верхний слой песка около 1 см потемнел. Проницаемость резко упала примерно в 630 раз при степени влажности около  $G = 0,92$ . Лишь через 2 суток произошел некий «прорыв», что соответствует на рис. 43 опытной точке при  $G = 0,3$ . Это можно объяснить рассасыванием воды равномерно по толщине песка (цвет его стал равномерным по всей толщине). Величина  $G$  для большей надежности опыта определялась двумя независимыми способами: по объему воды в каплях и взвешиванием образца с трубкой на лабораторных весах. Таким образом, получены опытные точки на рис. 43.

По результатам этих опытов можно сделать интересный вывод, затрагивающий вопросы вакуумного водопонижения с учетом прорыва воздуха в скважины. Пористый материал — грунт — становится практически непроницаемым не от равномерной влажности, а от слоистой. Таким образом, в дождливый период не следует ожидать прорывов воздуха в иглофильтры и вакуумные скважины. При водопонижении в грунтах, плохо отдающих воду (в суглинках, глинах), фильтрация воздуха затруднена наличием большого количества остаточной влаги. Об этом свидетельствует кривая 1 на рис. 43. Интенсифицировать водоотдачу можно дополнительным полем электроосмоса [81].

## § 8. Дифференциальные уравнения фильтрации воды и воздуха

Приведем дифференциальные уравнения фильтрации воды, относящиеся к целям нашей работы. Строго говоря, фильтрация воды в грунтах всегда нестационарная, трехмерная, а скелет грунта имеет склонность к деформации и анизотропии. Кроме того, в воде присутствует воздух, что увеличивает ее сжимаемость [210] и уменьшает проницаемость пористой среды [6; 7]. Однако на практике дифференциальные уравнения фильтрации стремятся по возможности упростить. Так делают, чтобы получить несложные аналитические решения в виде формул, а также при нефизическом моделировании. При этом отбрасывают из рассмотрения не очень существенные особенности процесса фильтрации. Подавляющее большинство решений в теории фильтрации основано на упрощенных, линеаризованных уравнениях.

Классификация дифференциальных уравнений фильтрации изложена с учетом основных трудов по теории фильтрации [210]. Эти уравнения в свое время классифицировали С.Ф. Аверьянов [6; 7], В.И. Аравин и С.Н. Нумеров [12], Я. Бэр и С. Ирмей [39], Н.Н. Веригин [40, 151], И.К. Гавич [49; 50], Н.П. Куранов [117; 118], В.А. Мироненко [152], А.Ж. Муфтахов [156], Н.Н. Павловский [186; 187], П.Я. Полубаринова-Кочина [198; 199], В.С. Усенко [290], В.М. Шестаков [314].

В наиболее общем виде с физическим смыслом дифференциальные уравнения фильтрации вывел и опубликовал в 1922 г. Н.Н. Павловский [187]. Модель явления фильтрации по Н.Н. Павловскому имеет следующие представления:

1. Жидкость в пористой среде может двигаться в любом направлении, что является следствием случайной и крайне беспорядочной величины и формы частиц грунта, а также их взаимного расположения.
2. Дифференциальный объем пористой среды, где происходит фильтрация, рассматривают значительно больших размеров по сравнению с величиной частиц и пор (трещин). Поэтому считают, что в данном объеме существует какое-то одно направление движения жидкости (общее течение).
3. Общее течение происходит между твердыми частицами пористой среды, а также между областями застойных зон жидкости, почти неподвижных.
4. Поры (трещины) гидравлически взаимосвязаны друг с другом, что позволяет использовать общие дифференциальные уравнения для всего потока.
5. Силами инерции при фильтрации можно пренебречь вследствие малости скоростей и хаотического движения жидкости в порах (трещинах).
6. Общее течение при фильтрации обладает свойством неразрывности (непрерывности).

Н.Н. Павловский [187] указал, что эти представления обобщены на основе работ Ж. Буссинеска [330] и Ч. Сливтера [348]. Заслугой Н.Н. Павловского



является то, что он придал модели фильтрации гидромеханический смысл, прибавив к вышеперечисленным представлениям еще три обстоятельства:

- 1) Сопротивление трения при фильтрации жидкости в пористой среде учитывается коэффициентом фильтрации (проницаемости), поэтому не нужно вводить дополнительного сопротивления, зависящего от вязкости жидкости.
- 2) Скорость фильтрации определяется, как расход жидкости, отнесенный к площади живого сечения, перпендикулярного к направлению движения; это сечение включает полную площадь (и пор и твердых частиц). Поэтому скорости фильтрации придается гидромеханический смысл, рассматривая ее как непрерывную функцию времени и координат.
- 3) Закон Дарси может быть записан через фильтрационную силу  $F_\phi$ , отнесенную к единице объема пористой среды, в виде [12; 13; 53; 88; 141; 152]

$$F_\phi = \gamma I, \quad (47)$$

где  $\gamma$  — удельный вес жидкости;  $I$  — градиент напора. Эту фильтрационную силу иногда называют гидродинамическим давлением [53].

Далее Н.Н. Павловский [187], с учетом вышеизложенных представлений и обстоятельств, указал, что гидромеханический смысл модели фильтрации необходим для вывода дифференциальных уравнений движения. При этом надо вместо фильтрующейся жидкости рассматривать «особую жидкость», мысленно откидывая наличие самой пористой среды. Эта «особая жидкость» подвержена силе тяжести. Сила сопротивления на единицу объема может быть найдена по формуле (47). В этой жидкости отсутствуют касательные напряжения. Силы упругости сводятся к нормальным напряжениям. Скорость этой жидкости в дифференциальных уравнениях движения есть скорость фильтрации по формуле (25). Плотность и сжимаемость жидкости совпадают с такими же физическими свойствами для реальной жидкости.

Н.Н. Павловский, используя формулу М.В. Остроградского — Д. Грина, получил наиболее общее дифференциальное уравнение неразрывности для фильтрующейся сжимаемой жидкости в деформируемой пористой среде [187]:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (48)$$

с характеристическими уравнениями, выражающими зависимости плотности жидкости от давления

$$\rho = f(p) \quad (49)$$

и пористости среды от давления

$$n = f(p). \quad (50)$$

Здесь  $\mathcal{V}_x, \mathcal{V}_y, \mathcal{V}_z$  — компоненты вектора скорости фильтрации соответственно вдоль декартовых осей координат  $X, Y, Z$ , где  $Z$  — вертикальная ось;  $t$  — время;  $x, y, z$  — координаты точки.

Скорость фильтрации по закону Дарси можно записать при постоянной плотности жидкости ( $\rho = \text{const}$ ) через избыточные давления в жидкости  $p_{\text{изб}}$  в виде системы компонент вектора скорости фильтрации [187]:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{V}_x &= -k \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} \right); \\ \mathcal{V}_y &= -k \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} \right); \\ \mathcal{V}_z &= -k \frac{\partial}{\partial z} \left( z + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} \right). \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Здесь  $z$  — высота точки над горизонтальной плоскостью 0-0 отсчета напоров (см. рис. 40). Удельный вес жидкости  $\gamma = \rho g$ , а пьезометрическая высота (пьезометрический напор)  $h_p = p_{\text{изб}}/\gamma$ . Тогда (51) переписывается так [187]:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{V}_x &= -k \frac{\partial h_p}{\partial x}; \\ \mathcal{V}_y &= -k \frac{\partial h_p}{\partial y}; \\ \mathcal{V}_z &= -k \frac{\partial}{\partial z} (z + h_p). \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

Так как по (20)  $H = z + h_p$ , то систему (52) можно переписать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{V}_x &= -k \frac{\partial H}{\partial x}; \\ \mathcal{V}_y &= -k \frac{\partial H}{\partial y}; \\ \mathcal{V}_z &= -k \frac{\partial H}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Подставляя компоненты скорости фильтрации из (53) в уравнение (48) при постоянной плотности жидкости ( $\rho = \text{const}$ ), Н.Н. Павловский [187] получил такой вариант уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (54)$$

которое при постоянной пористости ( $n = \text{const}$ ), то есть при несжимаемой пористой среде переходит в уравнение [187]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0, \quad (55)$$

где коэффициент фильтрации переменный и имеет общую зависимость

$$k = f(x, y, z, t). \quad (56)$$

Уравнение (55) можно записать короче, как дивергенцию вектора скорости фильтрации в виде

$$\text{div } \bar{V} = 0. \quad (57)$$

Для однородной изотропной несжимаемой пористой среды ( $k = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ) из уравнения (54) получается уравнение Лапласа, где функцией является фильтрационный напор [187]:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0, \quad (58)$$

которое можно переписать в сокращенном виде

$$\nabla^2 H = 0, \quad (59)$$

где  $\nabla^2$  — оператор Лапласа (лапласиан) [106, с. 173; 67, с. 482]. В декартовых прямоугольных координатах операторы Лапласа имеют вид [14]:

1) для одномерной фильтрации

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad (60)$$

2) для двумерной фильтрации

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \quad (61)$$

3) для трехмерной фильтрации

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (62)$$

В цилиндрических координатах операторы Лапласа выглядят так [14]:

1) радиальная фильтрация

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (63)$$

или

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right); \quad (64)$$

2) осесимметричная (профильно-радиальная) фильтрация

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (65)$$

или

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (66)$$

Следует отметить, что радиальная постановка задачи позволяет сводить двумерную задачу к одномерной, например при расчете совершенного пластового дренажа. Осесимметричная постановка сводит пространственную задачу к двумерной, например для гидродинамически несовершенной скважины. Таким образом, применение цилиндрических координат позволяет понизить размерность задачи на единицу, что упрощает расчеты и моделирование фильтрации.

Уравнение (55) пригодно для описания стационарной напорной и безнапорной фильтрации несжимаемой воды в недеформируемой пористой среде. Оно описывает также и нестационарную жесткую фильтрацию безнапорной потоков со свободной поверхностью. Для этого должно быть добавлено условие на свободной поверхности, например на УГВ. Вообще при наличии зависимости скорости фильтрации от вертикальной координаты  $z$  уравнение (55) относится к так называемой гидродинамической теории фильтрации. Термин «гидродинамическая теория фильтрации» введен П.Я. Полубариновой-Кочиной [198].

Уравнением Буссинеска называют дифференциальное уравнение фильтрации воды со свободной поверхностью, не зависящее от вертикальной координаты  $z$ . Это означает, что уравнение Буссинеска связывают с так называемой гидравлической теорией фильтрации применительно к грунтовым водам и верховодке на водоупорах. Именно в этом смысле в дальнейшем изложении применяется термин «уравнение Буссинеска».

Гидравлическую теорию фильтрации начали применять еще в XIX веке Ж. Дюпюи, Ж. Буссинеск и Ф. Форхгеймер. Эта теория рассматривает фильтрацию, направление которой близко к горизонтальному. При изучении грунтовых потоков воду и пористую среду считают несжимаемыми. Такую фильтрацию называют жесткой [40].

Обобщенное уравнение Буссинеска имеет вид [210]

$$\frac{\partial(\mu H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(H - z_0) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(H - z_0) \frac{\partial H}{\partial y} \right] - \frac{k_B}{M_B} (H - H_B) + \omega, \quad (67)$$

где  $H$  — вертикальная отметка (напор) свободной поверхности УГВ от горизонтальной плоскости отсчета напоров 0-0 (рис. 45);  $x, y$  — декартовы координаты в горизонтальной плоскости;  $\mu$  — гравитационная гидроемкость по (15);  $z_0$  — отметка подошвы слабопроницаемого водоупора относительно плоскости 0-0;  $(H - z_0)$  — мощность грунтовых вод ( $h$ );  $t$  — время;  $k_B$  — коэффициент фильтрации слабопроницаемого водоупора мощностью  $M_B$  (см. рис. 45);  $H_B$  — напор в напорном пласте под водоупором (см. рис. 45);  $\omega$  — инфильтрационное питание грунтовых вод (может быть также с учетом испарения). Напомним, что все напоры отсчитывают от единой плоскости сравнения 0-0 (см. рис. 45).

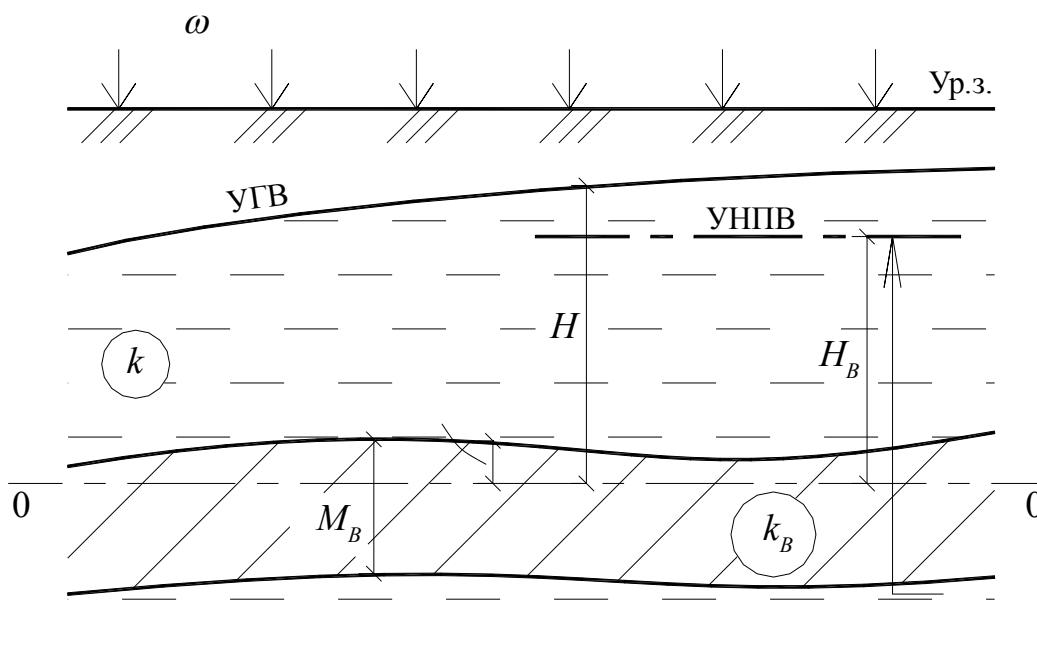


Рис. 45. К обобщенному уравнению Буссинеска

Уравнение Буссинеска (67) с математической точки зрения является нелинейным, так как имеет переменные коэффициенты  $k$  и  $\mu$ . Кроме того, переменными являются мощность грунтовых вод  $(H - z_0)$ , мощность водоупора  $M_B$ , напор в нижележащих напорных водах  $H_B$  и интенсивность инфильтрации  $\omega$ . Это усугубляет нелинейность уравнения (67), поэтому его в большинстве случаев невозможно решить аналитически. Известно очень мало решений уравнения (67) для простейших одномерных задач [210]. Однако нелинейное уравнение Буссинеска (67) можно моделировать с учетом всех переменных факторов.

Уравнение Буссинеска (67) справедливо для потоков грунтовых вод с медленно изменяющейся неустановившейся фильтрацией [169]. В работе [157] А.Ж. Муфтахов показал, что уравнение Буссинеска применимо для практических расчетов, если величина инфильтрации  $\omega$  значительно меньше коэффициента фильтрации грунта  $k$ . Должно соблюдаться условие

$$\omega \ll k. \quad (68)$$

Если поверхность водоупора горизонтальная или близка к таковой (рис. 46), а водоносный грунт является однородным и изотропным, то нелинейное уравнение Буссинеска (67) можно упростить до вида [210]:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + k \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{k_B}{M_B} (h - H_B) + \omega, \quad (69)$$

где  $h$  — одновременно напор и мощность грунтовых вод при горизонтальной плоскости 0-0 отсчета напоров, совмещенной с водоупорной подошвой (см. рис. 46). Остальные обозначения те же, что к уравнению (67).

Упрощенное уравнение Буссинеска (69) все равно нелинейное, поэтому прибегают к его линеаризации [210], то есть к дальнейшему упрощению уравнения с целью получения аналитических зависимостей в виде формул. Линеаризацию уравнения (69) можно применять, когда изменения поверхности УГВ  $\Delta h$  по отношению к естественной мощности грунтовых вод  $h_e$  не превышают 10-25 % [6; 7; 49; 156; 314], что дополнительно исследовано в § 13 в зависимости от точности расчетов.

Наиболее широко в мировой практике применяют два способа линеаризации нелинейного уравнения Буссинеска (67) [210]:

- I способ линеаризации (способ Ж. Буссинеска);
- II способ линеаризации (по Н.А. Багрову и Н.Н. Веригину).

Рассмотрим I способ линеаризации уравнения Буссинеска (способ по Буссинеску). В уравнении (67) нужно заменить переменную мощность грунто-

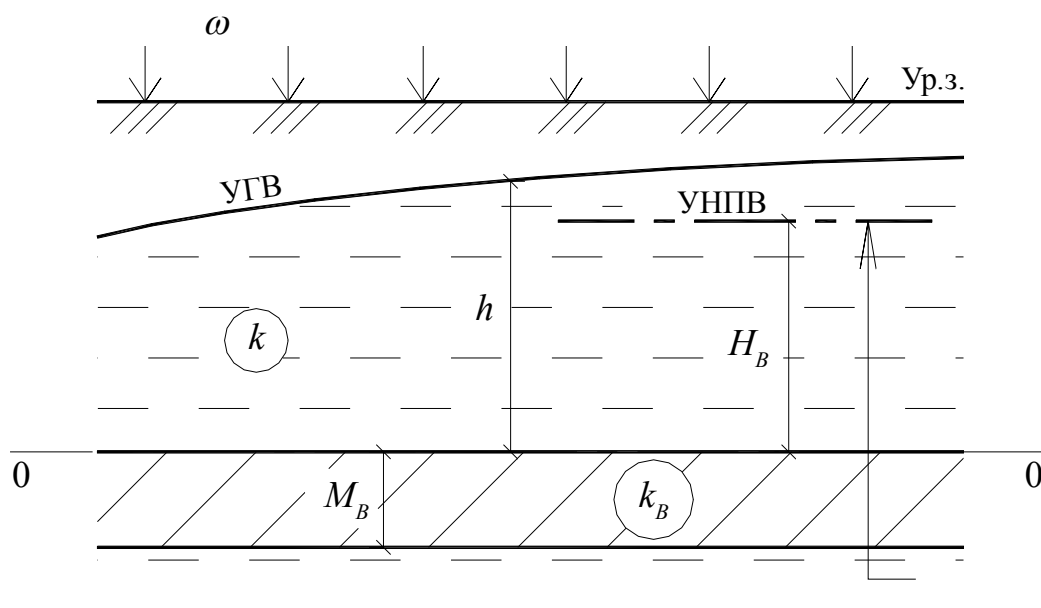


Рис. 46. К упрощенному нелинейному уравнению Буссинеска и линеаризованному уравнению по II способу

вых вод  $(H - z_0)$  на постоянную среднюю мощность водоносного пласта  $h_c$ . Эта замена придает грунтовым водам сходство с напорными водами, имеющими постоянную мощность  $M$ .

Поверхность водоупора может иметь слабый уклон (рис. 47). Если водоносный грунт принять однородным и изотропным, то линеаризованное I способом уравнение Буссинеска (67) можно переписать так [210]:

$$\frac{1}{a_y} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - \frac{k_B}{kh_c M_B} (H - H_B) + \frac{\omega}{kh_c}, \quad (70)$$

где  $a_y$  — коэффициент уровнепроводности грунтовых вод,  $m^2/сут$ ;  $H$  — напор свободной поверхности УГВ, отмеряемый от горизонтальной плоскости 0-0 (см. рис. 47). Остальные обозначения те же, что в уравнении (67).

Среднюю мощность безнапорного водоносного пласта  $h_c$  надо принимать такой, чтобы она обеспечивала наиболее достоверный расчет. Чаще всего [208] величину  $h_c$  принимают равной среднему арифметическому минимальной  $h_{\min}$  и максимальной  $h_{\max}$  мощности водоносного пласта в виде

$$h_c = (h_{\max} + h_{\min})/2. \quad (71)$$

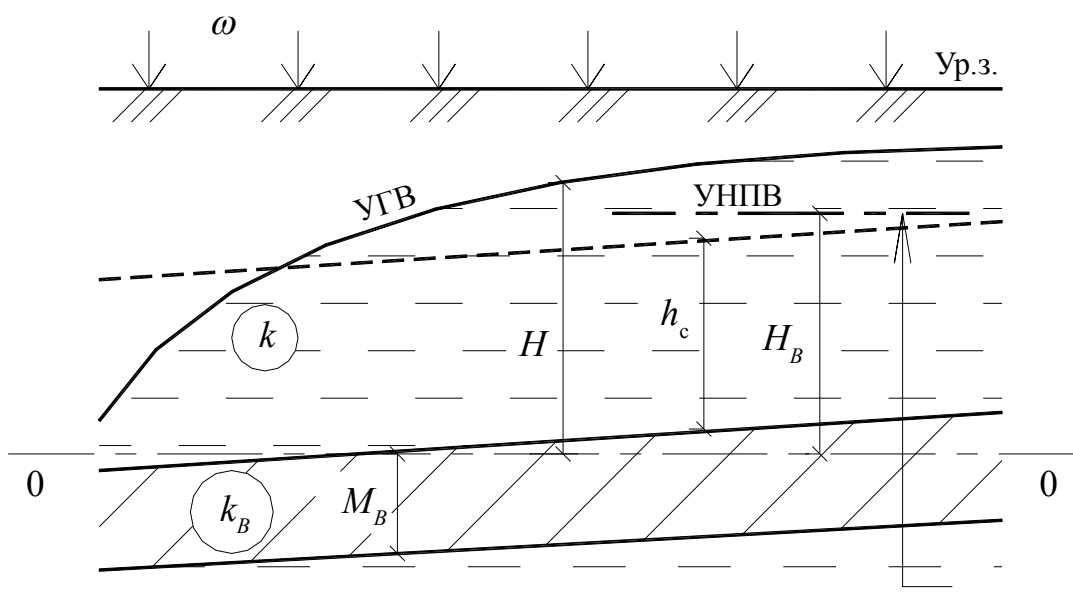


Рис. 47. Схема к линейаризации по I способу

Другие, более точные способы определения  $h_c$  изложены, например, в [6; 45; 151; 205; 208]. Однако следует заметить, что при небольших изменениях УГВ относительно мощности пласта (меньше 10 – 25 %) формула (71) дает неплохие результаты, обычно в пределах инженерной точности.

Коэффициент уровнепроводности грунтовых вод  $a_y$  — это комплексный параметр. Его находят по формуле

$$a_y = k h_c / \mu. \quad (72)$$

Линеаризацию уравнения Буссинеска (69) по II способу предложили независимо друг от друга гидрометеоролог Н.А. Багров в 1937 году и гидродинамик Н.Н. Веригин [41]. Эту линеаризацию применяют при горизонтальном водоупоре (см. рис. 46). Суть линеаризации по II способу состоит в подстановке вида

$$U = H^2 / 2 \text{ или } U = H^2, \quad (73)$$

что однако не избавляет от необходимости введения средней мощности пласта безнапорных вод  $h_c$ . Достоинством линеаризации по II способу является получение в стационарных задачах поверхности грунтовых вод в виде выпуклой вверх параболы Дюпюи. В нестационарных задачах I и II способы линеаризации конкурентоспособны. П.Я. Полубаринова-Кочина [198; 199], а позднее Н.П. Куранов [118] показали, что в задачах подпора УПВ более предпочтительным является I способ линеаризации, а в задачах дренирова-



ния — II способ. В любом случае линеаризация является приближенным приемом, который нужно проверять каждый раз независимым способом, например, моделированием.

Гидравлическая теория фильтрации хорошо описана в книгах П.Я. Полубариновой-Кочиной [198, 199]. Эта теория доминировала в практическом применении теории фильтрации в XIX-XX вв. В рамках гидравлической теории фильтрации работали:

- российские ученые Н.Е. Жуковский, Н.Н. Павловский, С.Ф. Аверьянов, В.И. Аравин, С.Н. Нумеров, Н.Н. Веригин, А.Ж. Муфтахов, Н.П. Куранов, Б.С. Шержуков, В.К. Рудаков, В.А. Мироненко, В.М. Шестаков и многие другие;
- зарубежные ученые А. Дарси, Ж. Дюпюи, Ж. Буссинеск, А. Тим, Ф. Форхгеймер и др.

Гидравлическая теория фильтрации остается до сих пор основной в практических фильтрационных расчетах. Например, она широко использована в стандартных расчетах справочного пособия к СНиП [208].

В 1969-70 гг. Н.Н. Веригин [40, 151] предпринял дополнительные исследования по анализу уравнений фильтрации подземных вод. Он получил интересный результат. Оказалось, что при гидрогеологических прогнозах на срок  $t \leq 30$  лет можно без существенных погрешностей в определении напора (ошибка не более 5 %) использовать линейное дифференциальное уравнение, аналогичное уравнению теплопроводности (уравнению Фурье):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a \nabla^2 H, \quad (74)$$

где  $a$  — коэффициент пьезопроводности или уровнеспроводности, в зависимости от типа фильтрационного потока, соответственно напорного или безнапорного (со свободной поверхностью). При этом Н.Н. Веригин привел и другое ограничительное условие применения уравнения (74):

$$a \leq 10^5 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Оба условия, по времени прогноза  $t$  и коэффициенту  $a$ , практически не ограничивают область применения дифференциального уравнения (74) в реальных пластах подземных вод. Это позволило Н.Н. Веригину с соавторами [151] получить большое количество решений дифференциального уравнения (74) при различных граничных условиях. Полученные в [151] аналитические формулы относятся к линейной теории фильтрации или гидравлической теории. Область применения этих зависимостей определена авторами коллективной монографии [151] для фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем сельского хозяйства. Следует отметить, что многие решения из [151] применимы также и для городского строительства при усло-

вии, что величины изменения УГВ не превышают 10 – 25 % от естественной мощности грунтовых вод [6; 7; 49; 316].

А.Ж. Муфтахов получил общий класс аналитических решений для уравнений в гидродинамической постановке, в изотропных и анизотропных пластах подземных вод [156]. Были разработаны гидродинамические основы прогнозов подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитных дренажей в сложных гидрогеологических условиях. А.Ж. Муфтахов проанализировал свои решения для двухслойного в разрезе водоносного пласта со свободной поверхностью УПВ. При этом А.Ж. Муфтахов применил постановку задач в виде следующих систем дифференциальных уравнений жесткой фильтрации [156]:

а) плоская в разрезе фильтрация

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; i = 1, 2; \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{xi}}; \quad (75)$$

б) осесимметричная в разрезе фильтрация

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_i}{\partial r} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; i = 1, 2; \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{ri}};$$

или [205]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H_i}{\partial r} \right) + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad (76)$$

в) трехмерная фильтрация

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_i}{\partial y^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; i = 1, 2; \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{ri}}. \quad (77)$$

Здесь  $x, y, z$  — декартовы координаты, причем  $z$  по вертикали;  $r$  — горизонтальная цилиндрическая координата;  $H_i$  — фильтрационный напор в  $i$ -ом слое;  $i = 1$  для верхнего слоя;  $i = 2$  для нижнего слоя;  $\gamma_i$  — коэффициент анизотропии для  $i$ -го слоя;  $k_{zi}$  — коэффициент фильтрации в вертикальном направлении для  $i$ -го слоя;  $k_{xi}, k_{ri}, k_{ri}$  — коэффициенты фильтрации в горизонтальном направлении для  $i$ -го слоя.

Условие на свободной поверхности УПВ, находящейся в верхнем слое, было записано А.Ж. Муфтаховым в линеаризованном виде [156]:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{k_{z1}}{\mu_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial z} - \frac{\omega(\eta)}{\mu_1} = 0; z = h_1, \quad (78)$$

где  $\eta$  — обобщенная координата,  $\eta = x$  для плоской в разрезе фильтрации,  $\eta = r$  для осесимметричной;  $\mu_1$  — коэффициент водоотдачи или недостатка насыщения верхнего слоя соответственно при понижении или повышении УГВ;  $\omega$  — инфильтрационное питание водоносного пласта, зависящее от координаты  $\eta$ . Величину  $\omega$  называют также дополнительной инфильтрацией или интенсивностью дополнительной инфильтрации [208]. Обратим внимание, что напор на свободной поверхности записан как  $h_1$ , а не  $H_1$ , то есть он отсчитывается от горизонтальной плоскости 0-0, проведенной через подстилающий грунтовые воды горизонтальный водоупор (см. рис. 41).

Дифференциальные уравнения изотермической фильтрации газа впервые получил Л.С. Лейбензон [125]. Эти уравнения сокращенно можно записать так [19]:

$$\frac{k_0}{2\mu_r n_a} \nabla^2 p^2 = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (79)$$

где  $\nabla^2$  — лапласиан (оператор Лапласа) по формулам (60)-(66);  $k_0$  — газопроницаемость пористой среды ( $m^2$ );  $\mu_r$  — динамическая вязкость газа ( $Па \cdot c$ );  $n_a$  — активная пористость (по газу).

В данном параграфе, как и в последующих, дифференциальные уравнения фильтрации даны без выводов, так как это не входило в задачи исследований, предпринятых в нашей работе. По способам вывода упомянутых исходных дифференциальных уравнений приведены соответствующие библиографические ссылки по ходу изложения.

Тем не менее в дальнейшем изложении при переходе к моделированию фильтрации на компьютере автор применяет особый прием осмысления дифференциальных уравнений фильтрации, связанный с получением формул моделирования методом конечных разностей в электронных таблицах Excel (МКР-Excel). Обычно [59; 227] дифференциальные уравнения служат отправными при получении конечно-разностных уравнений движения. Однако весьма полезным является обратный способ вывода дифференциальных уравнений из конечных разностей. Для этого автор широко использовал интегробалансовый принцип А.А. Самарского [227]. Такая интерпретация исходных дифференциальных уравнений фильтрации придает их осмыслению весьма наглядный физический смысл, помогает в верной исходной постановке задач.

## § 9. Дифференциальные уравнения фильтрационной консолидации

В области механики грунтов Н.М. Герсеванов, В.А. Флорин, П.Л. Иванов и др. решали уравнения фильтрации сжимающихся грунтов. Такие уравнения относятся к теории фильтрационной консолидации, разработанной К. Терцаги [351]. Искомой функцией в них является так называемое поровое давление, которое можно записывать через напор в грунтовых водах  $H$ , так как поровое давление по К. Терцаги есть избыточное давление в грунтовой воде над установившимся гидростатическим давлением в естественном состоянии грунта.

Уравнения фильтрационной консолидации для анизотропного грунта в соответствии с принципом гидроемкости Н.М. Герсеванова [53] можно представить с учетом (17) в следующих вариантах [88; 296]:

1) одномерная консолидация в вертикальном направлении

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)k}{\gamma a_c} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}; \quad (80)$$

2) двухмерная плоская (в разрезе) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+\xi)}{2\gamma a_c} \cdot \left( k_r \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (81)$$

3) трехмерная (пространственная) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a_c} \cdot \left( k_r \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_r \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (82)$$

4) осесимметричная (пространственная, профилно-радиальная) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a_c} \cdot \left( k_r \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{k_r}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right). \quad (83)$$

Здесь  $H$  — напор в грунтовой воде;  $H_0$  — напор от действия дополнительной нагрузки от веса возводимого здания или сооружения;  $e$  — коэффициент пористости грунта;  $a_c$  — коэффициент сжимаемости (уплотнения) грунта;  $\xi$  — коэффициент бокового давления грунта;  $\gamma$  — удельный вес грунтовой воды;  $k_r$  — коэффициент фильтрации грунта в горизонтальном направлении;  $k_z$  — то же в вертикальном направлении;  $r$  — горизонтальная цилиндрическая координата. В данных уравнениях считают, что жидкость не сжимаема и уплотнение происходит за счет уменьшения пористости грунта.

Анизотропность — это неодинаковость физических свойств среды по разным направлениям, например, по разным осям декартовой системы координат. Напротив, изотропность — одинаковость.

В случае «мгновенной» нагрузки от здания и сооружения в изотропных грунтах

$$\partial H_0 / \partial t = 0, \quad k_r = k_z = k. \quad (84)$$

Тогда уравнения (80), (81), (82) и (83) можно записать кратко с помощью оператора Лапласа  $\nabla^2$  [67, с. 482; 106, с. 173] в виде аналога хорошо известного в математической физике уравнения теплопроводности [296]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a \nabla^2 H, \quad (85)$$

где  $a$  — коэффициент пьезопроводности, в данном случае определяемый с учетом (17) зависимостью [296]:

$$a = \frac{k(1+e) [1 + (N-1) \xi]}{N\gamma a_c} = \frac{k}{\eta_{уп}}. \quad (86)$$

Здесь  $N$  — число измерений (1, 2 или 3). В случае осесимметричной консолидации следует брать  $N = 3$ , так как грунт испытывает пространственную деформацию.

Приведенные дифференциальные уравнения в математическом смысле являются нелинейными. Такая особенность возникает вследствие того, что при фильтрационной консолидации происходит сжатие грунта за счет уменьшения объема пор. Так как вода практически не сжимаема, то уплотнение грунта происходит в основном за счет переукладки частиц его скелета. Изменение коэффициента пористости приводит к одновременному изменению коэффициента фильтрации уплотняющегося во времени грунта. Поровое давление внутри воды уменьшается и соответственно фильтрационный напор уменьшается. Процесс фильтрационной консолидации постепенно, с течением времени, затухает. Массив же грунта дает осадку. Изложенный процесс в виде гипотезы впервые был сформулирован К. Терцаги [351].

Доля осадки грунта за счет фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов достигает 90-95 % [128]. Поэтому строительные нормы и правила [235] рекомендуют определять избыточное давление в водонасыщенных пылевато-глинистых и биогенных грунтах методами фильтрационной консолидации. Консолидация неразрывно связана с проницаемостью грунта, поэтому автор рекомендует моделировать изменение коэффициента фильтрации грунтов оснований с помощью МКР-Excel, используя примеры из книг В.А. Флорина [296] и П.Л. Иванова [88]. См. также пример 62.

## § 10. Закон диффузии влаги и дифференциальные уравнения ваготеплопереноса

Закон диффузии Фика для изотермического влаготеплопереноса в пористой среде связывает скорость диффузии  $\mathcal{V}_D$  (м/сут) с коэффициентом диффузии пористой среды  $D_d$  (м<sup>2</sup>/сут), перепадом влажности (вагосодержания) грунта или материала  $\Delta W$  (кг/кг) — при условии небольшого изменения влажности  $W$  — и длиной пути диффузии  $L$  (м) так [75, с. 86; 202, с. 51; 131, с. 432; 132, с. 56; 152, с. 253; 199, с. 508]:

$$\mathcal{V}_D = D_d \Delta W / L. \quad (87)$$

Диффузия влаги в пористой среде происходит от большей влажности  $W_1$  к меньшей  $W_2$ . В зависимости (87) разность влажностей (перепад)

$$\Delta W = W_1 - W_2. \quad (88)$$

Закон диффузии влаги в грунте в форме (87) был использован А.Ж. Муфтаховым, Н.П. Курановым, А.П. Шевчиком и И.М. Бывальцевым для разработки основ проектирования вентиляционного дренажа [37; 162; 202]. Разработанная методика вошла в справочное пособие к СНиП [208].

Диффузия влаги по зависимости (87) относится к концентрационной диффузии, то есть подчиняется закону Фика [131]. Другими разновидностями диффузии влаги в пористых телах являются термодиффузия (эффект Соре) [132, с. 9] и бародиффузия. Термодиффузия проявляется при значительных температурных градиентах, а бародиффузия на практике весьма мала и ее часто не учитывают [278, с. 265].

Самыми простыми являются дифференциальные уравнения изотермической диффузии влаги в пористой среде [131, с. 475]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_d \nabla^2 W, \quad (89)$$

где  $\nabla^2$  — оператор Лапласа [106, с. 173];  $W$  — влажность (вагосодержание) пористого тела, кг/кг;  $D_d$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/сут;  $t$  — время, сут.

В более общем случае дифференциальные уравнения неизотермического диффузионного влаготеплопереноса в пористой среде, следуя А.В. Лыкову [131, с. 475], можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= a_{11} \nabla^2 W + a_{12} \nabla^2 T; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a_{22} \nabla^2 T + a_{21} \nabla^2 W, \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

где  $T$  — температура, °C;  $a_{11}$  — коэффициент концентрационной диффузии влаги по закону Фика,  $m^2/cm$ ;  $a_{12}$  — коэффициент термодиффузии влаги по эффекту Соре,  $m^2/(cm \cdot ^\circ C)$ ;  $a_{22}$  — коэффициент, пропорциональный температуропроводности по закону Фурье с учетом внутреннего испарения,  $m^2/cm$ ;  $a_{21}$  — коэффициент теплопереноса за счет диффузии влаги по эффекту Дюфо,  $m^2 \cdot ^\circ C/cm$ ;  $\nabla^2$  — оператор Лапласа.

Еще сложнее выглядят дифференциальные уравнения неизотермического диффузионно-фильтрационного влаготеплопереноса в пористой среде, которые по А.В. Лыкову [131, с. 479] можно записать в виде такой системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= a_{11} \nabla^2 W + a_{12} \nabla^2 T + a_{13} \nabla^2 P; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a_{21} \nabla^2 W + a_{22} \nabla^2 T + a_{23} \nabla^2 P; \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= a_{31} \nabla^2 W + a_{32} \nabla^2 T + a_{33} \nabla^2 P, \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

где  $P$  — давление пара, образующегося из вскипающей влаги внутри пористого тела при температуре выше 100 °C [56, с. 157]. Такое состояние влажного пористого тела обычно наблюдается в искусственных условиях, например при сушке в электрическом поле высокой частоты, применяемой в пищевой промышленности. В технологии городского строительства по защите от подтопления такие условия практически не наблюдаются. Поэтому в качестве основных могут быть приняты уравнения (89) и (90).

Отметим, что уравнения А.В. Лыкова (90) в двухмерной постановке применены В.И. Федоровым [293] для решения прогнозной задачи влаготеплопереноса в грунте обратной засыпки фундаментных пазух на контакте с естественным грунтом. Система координат была выбрана декартова в вертикальном разрезе. Испарение с поверхности земли В.И. Федоров принял стационарным. Градиенты температуры были осреднены по всему массиву грунта. Расчеты В.И. Федоров выполнил на ЭВМ.

Мы рекомендуем моделировать уравнения (89) и (90) с помощью МКР-Excel. Формулы моделирования можно получить из этих уравнений, применяя конечно-разностные аналоги дифференциальных операторов. Примеры этих аналогов можно найти в справочнике Д.Ю. Панова [188]. Еще лучше, если формулы моделирования вывести с использованием интегро-балансового принципа А.А. Самарского, который широко использован в гл. 4 и 5.

## § 11. Электроосмос и его дифференциальные уравнения

Эффект электроосмоса состоит в том, что при пропускании постоянного электротока через обводнённый грунт или пористый материал вода устремляется к отрицательно заряженному катодному электроду. Например, подсоединив катод к стальной вакуумной скважине в глинистом грунте, а анод — к стальной трубе или профилю, забитому в грунт неподалеку от скважины, при включении сварочного аппарата постоянного тока можно существенно повысить степень осушения и закрепления обводнённого грунта.

Закон электроосмоса связывает скорость переноса влаги  $\mathcal{V}_\circ$  (м/сут) с коэффициентом электроосмотической фильтрации грунта (пористой среды)  $k_\circ$  (м<sup>2</sup>/(В·сут)), разностью потенциалов постоянного тока  $\Delta U$  (В) и длиной пути фильтрации  $L$  (м) так [81; 88; 103; 127; 284]:

$$\mathcal{V}_\circ = k_\circ \Delta U / L. \quad (92)$$

Закон (92) является феноменологическим, так как коэффициент электроосмотической фильтрации  $k_\circ$  надежно определяется лишь опытным путем. Имеются попытки теоретического обоснования электроосмоса, которые описаны в книге [284]. Там же дана подробная библиография по электроосмосу. К.П. Тихомолова [284] рассмотрела электроосмос как физико-химическое явление в системах упорядоченных капилляров: от одиночного капилляра до порошковых многослойных диафрагм. В таком представлении электроосмос имеет значение для изучения локальных эффектов, в основном для промышленных технологий. Напротив, для технологий строительного водопонижения применяют феноменологическую теорию электроосмоса [81; 88; 103; 127], когда коэффициент  $k_\circ$  определяют в ходе инженерных изысканий. Именно эта теория и принята у нас для расчетов и моделирования электроосмотического водопонижения.

По данным Б.П. Горбунова, Б.Ф. Рельтова, Р.Ж. Балли, Б.А. Ржаницына, А.А. Мухина, Р.С. Зиангирова, Л. Казагранде, А. Писковского, Г.М. Ломизе и Г.Н. Жинкина [81], коэффициент электроосмотической фильтрации для различных грунтов находится в пределах  $k_\circ \approx (0,5 \dots 13,0) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (0,43 \dots 11,2) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$ , чаще всего  $k_\circ \approx (3 \dots 5) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (2,6 \dots 4,3) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$ . По В. Кнаупе [103],  $k_\circ \approx (3 \dots 8) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (2,6 \dots 6,9) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$ . Для сравнения приводим значения  $k_\circ$  из практики изысканий ОАО «ОмскТИСИЗ» для 1-й линии Омского метрополитена по четвертичному суглинку павлодарской свиты, который имеет мягко- и текучепластичную консистенцию. Данный суглинок характеризуется значениями  $k_\circ \approx (1,57 \dots 8,78) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (1,36 \dots 7,59) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$ , то есть не имеет аномальных отклонений.



Г.Н. Жинкин показал [81, с. 160], что глинистый грунт (глину, суглинок, супесь) теоретически можно осушить с помощью электроосмоса до остаточной влажности, соответствующей пределу раскатывания (пластичности)  $W_p$ , кг/кг (стандартная влажность по массе). Однако практически снижение влажности грунта до консистенции раскатывания требует больших затрат электроэнергии. Поэтому, по результатам опытов Г.Н. Жинкина [81], при осушении глинистого грунта с помощью электроосмоса целесообразно принимать остаточную влажность

$$W_k = (3W_p + W_T)/4, \quad (93)$$

где  $W_T$  — влажность грунта на пределе текучести, кг/кг.

При расчете и моделировании электроосмотического водопонижения вместо влажности грунта по массе удобнее использовать коэффициент электроосмотической водоотдачи грунта

$$\mu_3 = W_{oe} - W_{ок}, \quad (94)$$

где  $W_{oe}$  — естественная (природная) объемная влажность грунта;  $W_{ок}$  — объемная влажность грунта в конце электроосмотического водопонижения (проектный предел влажности).

Влажность грунта по массе  $W$  (массовая или стандартная влажность по ГОСТ 5180-84) — это отношение массы воды, содержащейся в грунте, к массе сухого грунта (высушенного при температуре 105 °С), кг/кг.

Объемная влажность грунта  $W_o$  — отношение объема воды, содержащегося в грунте, к объему грунта.

Пересчитать массовую влажность  $W$  на объемную  $W_o$  можно с помощью следующего соотношения:

$$W_o = W\rho_{\text{сух.гр}} / \rho, \quad (95)$$

где  $\rho_{\text{сух.гр}}$  — плотность сухого грунта, кг/м³;  $\rho$  — плотность воды, кг/м³.

### Пример 32. Электроосмотическая водоотдача грунта

Определим коэффициент электроосмотической водоотдачи грунта, который был встречен на забое щитовой проходки 1-й линии Омского метрополитена по ул. имени Богдана Хмельницкого. Четвертичный суглинок павлодарской свиты имел мягко- и текучепластичную консистенцию. По данным кустовых откачек из скважин, проведенных ОАО «ОмскТИСИЗ», коэффициент фильтрации данного грунта  $k=0,19$  м/сут, коэффициент гравитационной водоотдачи  $\mu=0,01$ . Грунт водонасыщен со степенью влажности  $G=0,98\dots 1$ , с природной (естественной) влажностью  $W_e=0,26$  кг/кг, влажностью на границе текучести  $W_T=0,32$  кг/кг, влажностью на границе раскатывания  $W_p=0,20$  кг/кг. Плотность сухого грунта  $\rho_{\text{сух.гр}}=1570$  кг/м³, плотность воды  $\rho=1000$  кг/м³.

По формуле (93)

$$W_k = (3 \cdot 0,2 + 0,32)/4 = 0,23.$$

Так как остаточная влажность  $W_k = 0,23$  меньше естественной  $W_e = 0,26$ , то, следовательно, данный грунт можно осушить с помощью электроосмоса.

Определяем объемные влажности по (95):

$$W_{oe} = 0,26 \cdot 1579/1000 = 0,408;$$

$$W_{ок} = 0,23 \cdot 1579/1000 = 0,361.$$

Коэффициент электроосмотической водоотдачи грунта по формуле (94)

$$\mu_s = 0,408 - 0,361 = 0,047.$$

Таким образом, водоотдача грунта при воздействии на него постоянного электрического тока увеличивается почти в пять раз в результате эффекта электроосмоса.

Электроосмотическое водопонижение рекомендуется совмещать с вакуумированием грунта [81; 103]. При наложении полей гравитационных напоров и постоянного электрического тока во влажном грунте происходит фильтрация с суммарной скоростью [80; 103]

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_\phi + \mathcal{V}_s = k\Delta H/L + k_s\Delta U/L, \quad (96)$$

где  $\mathcal{V}_\phi$  — скорость гравитационной фильтрации по закону Дарси;  $\mathcal{V}_s$  — скорость электроосмотической фильтрации;  $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  $\Delta H$  — разность напоров;  $L$  — длина пути фильтрации;  $k_s$  — коэффициент электроосмотической фильтрации;  $\Delta U$  — разность электрических потенциалов (напряжений).

Рассмотрим вначале простейший случай одномерной фильтрации (в декартовой системе координат) при действии двухрядной установки электроосмотического водопонижения для траншеи. На рис. 48 показаны со знаком минус металлические скважины-катоды, из которых притекающая грунтовая вода удаляется с помощью вакуум-насосов или эжекторов. Со знаком плюс показаны металлические стержни-аноды, вбитые в грунт. Под влиянием отсасывающего действия вакуума и электроосмоса происходит эффективное водопонижение и уровень грунтовых вод опускается ниже отметки дна траншеи. В результате грунтовые стенки траншеи не оплывают, что создает благоприятные условия для проведения строительно-монтажных работ в траншее.

В действительности электрический ток между электродами проходит по влажному грунту до значительных глубин, включая водоупор. Однако в рассматриваемой задаче схематизируем протекание электротока лишь по массиву грунта толщиной  $M$  от уровня земли до кровли водоупора (см. рис. 48). По свидетельству В. Кнаупе [103, с. 323], весь период электроосмотического водопонижения значение силы тока, проходящего через грунт, соответствует закону Ома. Это означает, что с момента пуска водопонижительной установ-

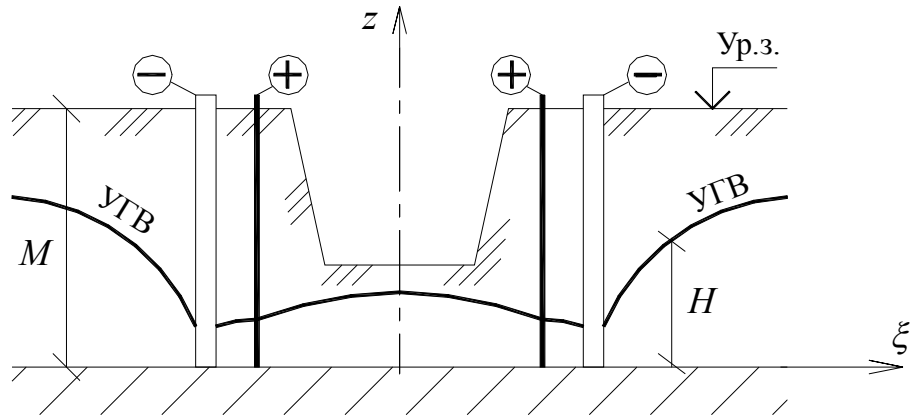


Рис. 48. Электроосмотическое водопонижение:  $\xi = x$  для траншеи в декартовых координатах;  $\xi = r$  для котлована в цилиндрических координатах

ки и источника электроэнергии ток протекает по всему массиву грунта, включая осушенную и обводненную части. Поэтому мы достаточно обоснованно приняли величину  $M$ . Таким образом, поле электрических напряжений (потенциалов)  $U$  в грунте мощностью  $M$  будет стационарным весь период водопонижительных работ, пока включен генератор постоянного тока.

Фильтрация грунтовых вод к скважинам-катодам, наоборот, будет нестационарной. Грунт интенсивно отдает воду с водоотдачей  $\mu_3$ , увеличенной электроосмосом. Движение грунтовых вод со свободной поверхностью (УГВ) при небольшой мощности  $H$  (см. рис. 48) можно описать нелинейным уравнением Буссинеска в рамках гидравлической теории фильтрации.

Запишем систему дифференциальных уравнений нестационарной одномерной (в декартовой системе координат) нелинейной совместной электроосмотической и гравитационной фильтрации в виде

$$\begin{aligned} \mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= k_3 M \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= k \left( H \frac{\partial H}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (97)$$

где  $H$  — напор и одновременно мощность грунтовых вод;  $t$  — время; остальные обозначения уже оговорены.

В случае радиальной в плане фильтрации, например к круговой контурной водопонижительной системе для котлована (см. рис. 48), вместо (97) можно записать аналогичную систему дифференциальных уравнений нестационарной

ционарной одномерной (в цилиндрической системе координат) электроосмотической и нелинейной (по Буссинеску) гравитационной фильтрации так:

$$\begin{aligned}\mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{k_3 M}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right); \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H \frac{\partial H}{\partial r} \right),\end{aligned}\quad (98)$$

где  $r$  — радиальная координата (см. рис. 48); остальные обозначения оговорены.

При плановой фильтрации грунтовых вод по аналогии с (97) можно записать систему дифференциальных уравнений нестационарной двухмерной (в горизонтальной декартовой системе координат) электроосмотической и нелинейной (по Буссинеску) гравитационной фильтрации в виде:

$$\begin{aligned}\mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= k_3 M \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right]; \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= k \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right],\end{aligned}\quad (99)$$

где  $x$  и  $y$  — горизонтальные декартовы координаты; остальные обозначения прежние.

Таким путем можно и дальше продолжить рассмотрение дифференциальных уравнений гравитационно-электроосмотической фильтрации. Однако на этом остановимся, так как записанные уравнения (97) – (99) охватывают достаточно распространенные случаи фильтрации грунтовых вод малой мощности.

Уравнения (97) – (99) сложны для получения аналитических решений, так как они нелинейные. Поэтому целесообразнее электроосмотическое водопонижение с вакуумированием грунтовых вод моделировать в МКР-Excel. В гл. 5 даны два подробных примера 66 и 67 по моделированию электроосмоса. Вначале (пример 66) рассмотрена простая задача определения сопротивления одного электрода в ряду по ортогональной и шахматной схемам. Этот пример иллюстрирует эффективность моделирования электроосмоса с помощью МКР-Excel. В примере 67 показано более сложное моделирование одновременных процессов вакуумирования обводненного грунта с наложением поля электроосмоса для интенсификации водоотдачи.

## Фильтрационные расчеты в городском строительстве

Строительное освоение территорий осложняется процессами подтопления. Технологическое проектирование строительства в таких условиях должно максимально использовать методы теории фильтрации подземных вод, так как основным продуктом технологии защиты от подтопления в большинстве случаев является грунт с пониженным содержанием воды. Это достигается применением средств строительного водоотлива, водопонижения и дренажа. Прогнозирование эффективности их работы наиболее достоверно реализуется с помощью компьютерного моделирования. Однако первоначальные оценки лучше производить аналитическим методом расчета процессов фильтрации по формулам.

Фильтрационные расчеты при защите от подтопления в городском строительстве можно подразделить так [208]:

- 1) схематизационные расчеты;
- 2) обратные задачи;
- 3) прогнозы подтопления;
- 4) расчет защитных мероприятий.

### § 12. Технология фильтрационных расчётов

Фильтрационные расчёты при защите от подтопления в городском строительстве проводят последовательными приближениями. Технологическая блок-схема прогноза подтопления изображена на рис. 49, а расчёта защиты от подтопления — на рис. 50.

Если прогноз подтопления показал, что объект не будет подтоплен, то принимается решение о профилактических мероприятиях, например, о выборе системы водоотлива из котлована поверхностных атмосферных вод, если прогноз составлен для строящегося объекта. При проведенном прогнозе подтопления на период эксплуатации, показавшим, что объект не будет подтапливаться, также предусматриваются какие-либо профилактические меры, например, по устройству окрасочной противокapиллярной гидроизоляции для подземных конструкций. Подробнее о предупредительных мероприятиях см. гл. 1 § 4. Если же объект будет подтоплен, то переходят к разработке защитных мероприятий, например, рассчитывают водоотлив, водопонижение или дренаж (см. рис. 50).

Прогноз подтопления (см. рис. 49) начинают с исследования объекта возможной защиты от подтопления: территории застройки, здания или сооружения. Изучают проектные решения объекта и гидрогеологическую

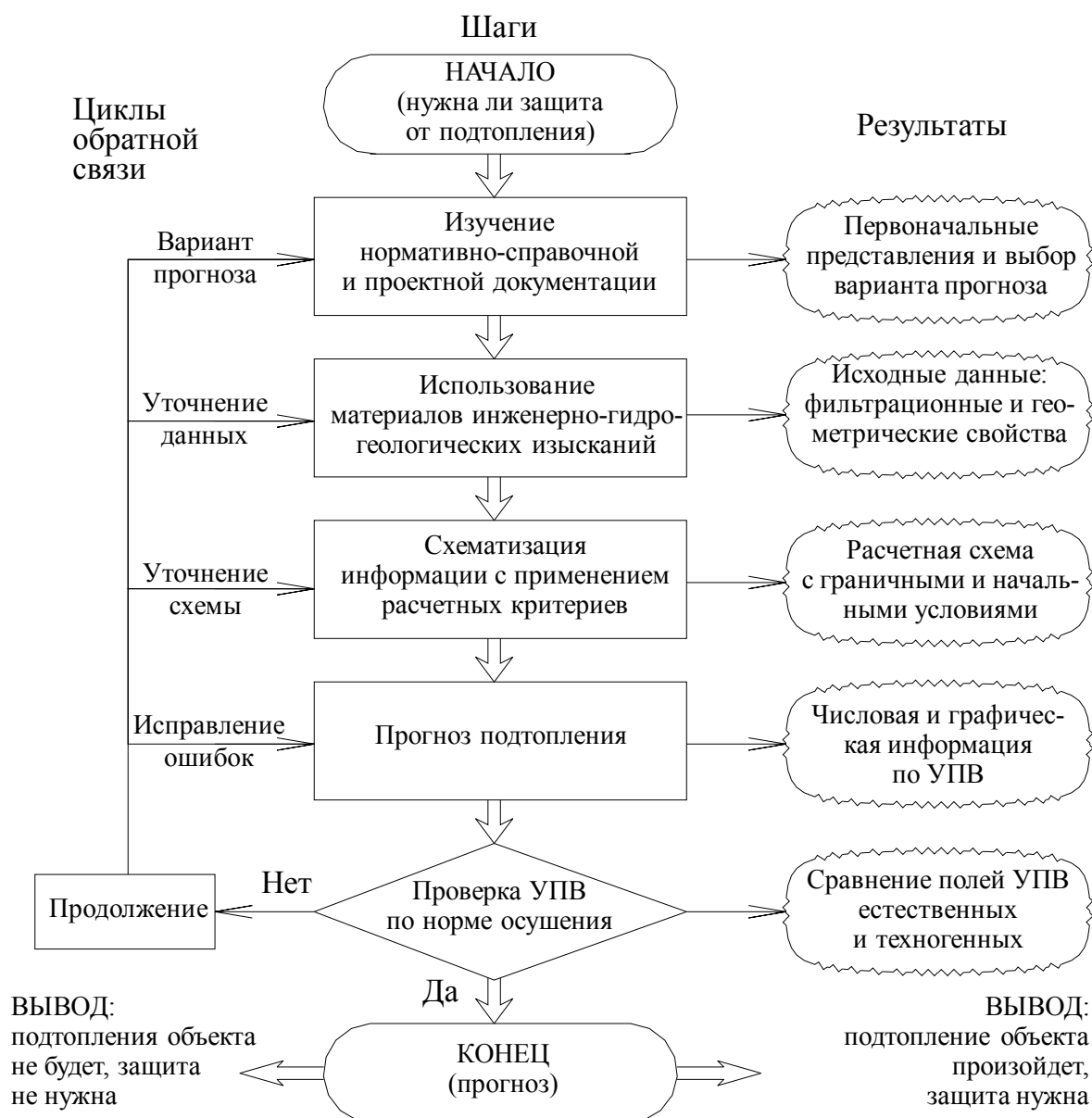


Рис. 49. Технология прогноза подтопления

ситуацию. На этом этапе выбирают вид прогноза подтопления. Основные разновидности прогнозов подтопления следующие [208]:

- прогноз равномерного подъёма УГВ (метод аналогий);
- прогноз верховодки и куполов УГВ;
- прогноз подпора УГВ из водохранилищ и каналов;
- прогноз подпора УГВ зданиями и сооружениями.

Мы считаем целесообразным в сфере городского строительства перед вышеперечисленными прогнозами проводить дополнительный прогноз изменения проницаемости грунтов оснований по нашей методике, изложенной в § 15.

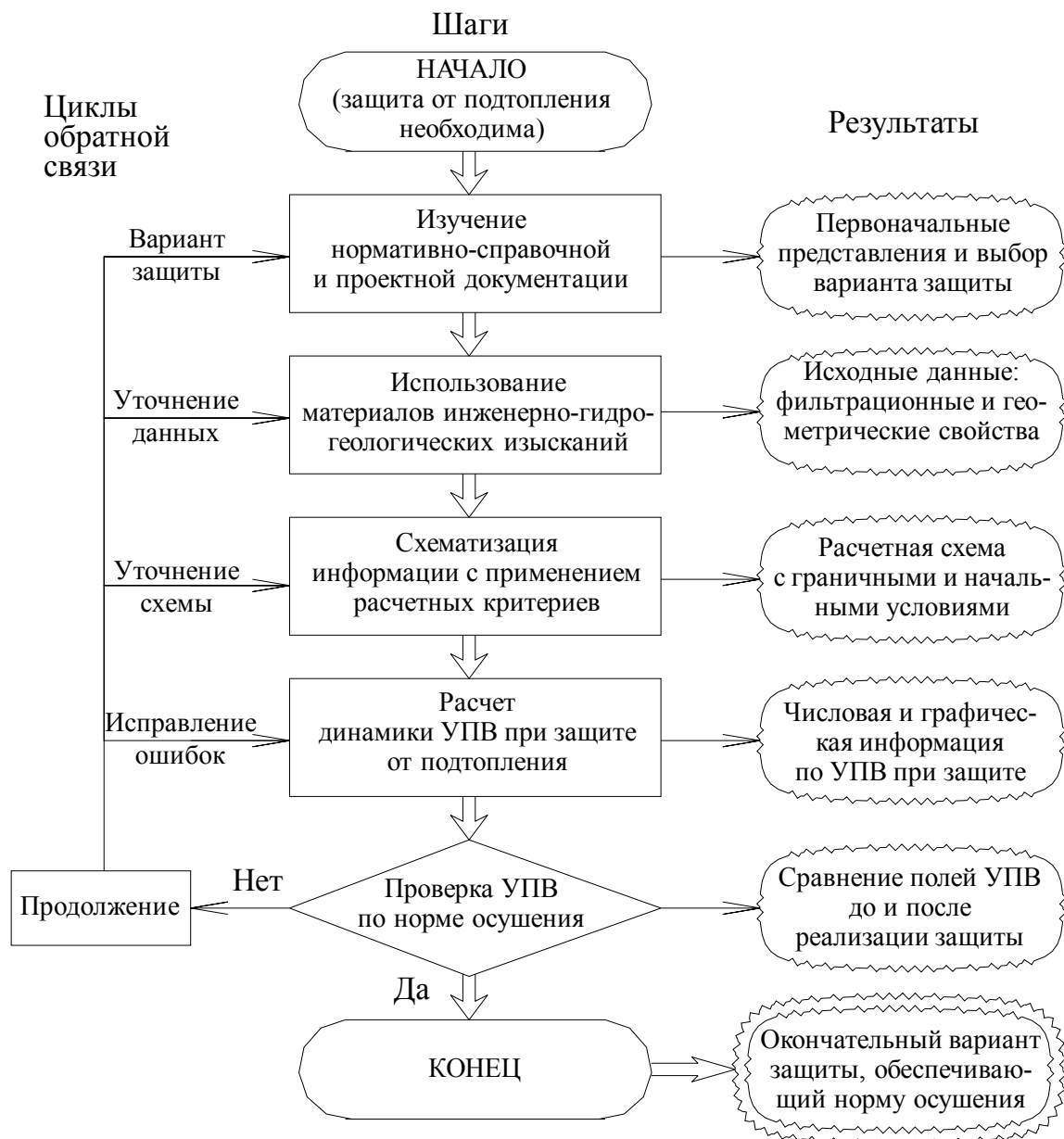


Рис. 50. Технология расчёта защиты от подтопления

Выбор метода прогноза производят по конкретной ситуации. Для территорий застройки прогнозы вначале проводят методом аналогий [52]. Для этого находят аналогичные объекты со сходными природными и техногенными условиями. Вычисляют равномерный подъем УГВ. Например, если получили, что ежегодно подъем УГВ составит конкретную величину, то год подтопления территории застройки определяют по достижению УГВ нормы осушения. При этом необходимо учитывать испарение с поверхности УГВ в условиях техногенного влияния застройки по методике, изложенной в § 2. Технологию выбора метода расчета нагляднее показать на примерах, что рассмотрено в следующих параграфах.

### § 13. Схематизация области фильтрации

Прогнозы подтопления и расчёты дренажных систем с помощью аналитического метода (по формулам) в гидравлической и гидродинамической постановках изложены в [208]. Они позволяют рассчитывать типовые гидро-геологические схемы. С этой целью реальный водоносный пласт подземных вод, залегающих под зданием, должен быть схематизирован, то есть упрощен геометрически, по проницаемостям и т.д. Рассмотрим принципы схематизации, то есть получение расчётных схем.

Область фильтрации — это ограниченный массив проницаемой среды, подлежащий фильтрационному расчету или моделированию. Область фильтрации относят к какому-либо флюиду: воде, воздуху и т.д. При защите от подтопления в городском строительстве чаще всего рассчитывают область фильтрации подземных вод. Другое, расширенное понятие области фильтрации, приведено ниже.

Реальную область фильтрации подвергают схематизации. Процессы подтопления на городских территориях развиваются в различных природных и техногенных условиях. Поэтому схематизации подлежат [208; 314]:

- 1) геометрия водоносных пластов, их отдельных слоев, слабопроницаемых прослоев и водоупоров (абсолютных и относительных) в плане и разрезе;
- 2) фильтрационные свойства области фильтрации (с осреднением коэффициентов фильтрации и водоотдачи грунтов и материалов);
- 3) дополнительное инфильтрационное питание, поступающее сверху в подземные воды и проницаемые грунты, которое может быть распределено по территории равномерно или неравномерно;
- 4) гидродинамические, гидравлические и гидрологические характеристики фильтрационных потоков (направление, мощность, уклоны, зависимость от времени, климатических факторов, возможность применения линеаризации, суперпозиции и др.);
- 5) граничные и начальные условия (общее название — краевые условия).

Основой схематизации природных и техногенных условий являются данные инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, а также опыт строительства и эксплуатации [208].

Границы области фильтрации подразделяют на внешние и внутренние [208].

Внешние границы: реки, озера, водохранилища, овраги, непроницаемые плоскости естественно-геологические (коренной берег на контакте с аллювием и др.) и техногенные (подпорные стенки, метрополитены и др.). Внешние границы оконтуривают область фильтрации в плане и разрезе. Граничные условия могут быть 1-го, 2-го или 3-го рода.



Внутренние границы: зоны с различной проницаемостью в плане и разрезе, мелкие ручьи, дренажи, фундаменты зданий и сооружений, подземные конструкции и т.д. Эти граничные условия также могут быть 1-го, 2-го, 3-го или 4-го рода.

Двухмерные схемы области фильтрации по степени влияния внешних границ подразделяют так [13; 208]:

— плановые (в горизонтальной плоскости) неограниченные, полуограниченные и ограниченные;

— плоские (в вертикальном разрезе) неограниченные по мощности и конечной мощности.

Начальные условия необходимы лишь при решении нестационарных задач. Прежде всего выясняют, какой процесс фильтрации будет преобладать в прогнозный период: нестационарный (зависящий от времени, не установившийся) или стационарный (не зависящий от времени, установившийся). Длительно протекающие процессы часто принимают установившимися [208].

По возможности, стремятся использовать принцип суперпозиции решений [6]. Для этого сложную задачу разбивают на сумму простых задач. Каждую задачу решают отдельно. Окончательный результат получают, суммируя влияние от каждого фактора. Суперпозиция (сложение течений) может быть применена лишь для математически линейных задач, но суперпозицию решений нельзя применять для нелинейных задач [227].

Схематизация при аналитических расчетах — это упрощение реальной области фильтрации до определенного уровня с целью возможности расчета по известным формулам. В какой-то мере при схематизации ситуация подгоняется под существующие расчетные формулы. Как следствие такого огрубления могут возникнуть большие погрешности расчета, когда прогнозируемый результат на самом деле будет сильно отличаться от действительного.

Многие применяемые в настоящее время критерии схематизации для грунтовых вод со свободной поверхностью (УГВ) базируются на линеаризованной гидравлической теории фильтрации [199]. Применимость этой теории для конкретного фильтрационного расчета можно определить с помощью двух критериев: С.Ф. Аверьянова [6] и А.Ж. Муфтахова [156; 208].

По С.Ф. Аверьянову [6, с. 177] возможность применения линеаризации гидравлической теории фильтрации при расчетах грунтовых вод требует, чтобы изменение поверхности УГВ  $\Delta h$  (колебания УГВ по вертикали) по отношению к естественной мощности грунтовых вод  $h_e$  не превышали нескольких десятков процентов. Соблюдение критерия С.Ф. Аверьянова для линеаризации гидравлической теории короче можно записать так:

по уточнению И.К. Гавич [49, с. 109]

$$\Delta h/h_e \leq 0,2...0,3 \quad (100)$$

или, несколько жестче, по В.М. Шестакову [316, с. 230]

$$\Delta h/h_e \leq 0,1 \dots 0,2. \quad (101)$$

Проанализируем в следующем примере, как С.Ф. Аверьянов обосновал критерий линеаризации гидравлической теории, который затем уточнили И.К. Гавич и В.М. Шестаков.

### Пример 33. Критерий линеаризации по С.Ф. Аверьянову

Рассмотрим неустановившийся подпор грунтовых вод, имеющих естественную мощность  $h_e = 7,5$  м при напоре в источнике подтопления  $h_{\pi} = 12,5$  м (рис. 51). Расстояние между двумя вертикальными сечениями по горизонтали  $\Delta x = 100$  м. Коэффициент фильтрации грунта водоносного пласта  $k = 7,5$  м/сут. Напоры  $h$  отсчитываются от горизонтального водоупора, поэтому численные значения напоров и мощностей грунтовых вод совпадают. Градиенты напора (пьезометрические уклоны)  $I_{\pi} = 0,05$  и  $I_e = 0$ , то есть последний нулевой уклон означает, что левое сечение находится на фронте растекания грунтовых вод. Приведенные исходные данные взяты из примера [6, с. 177].

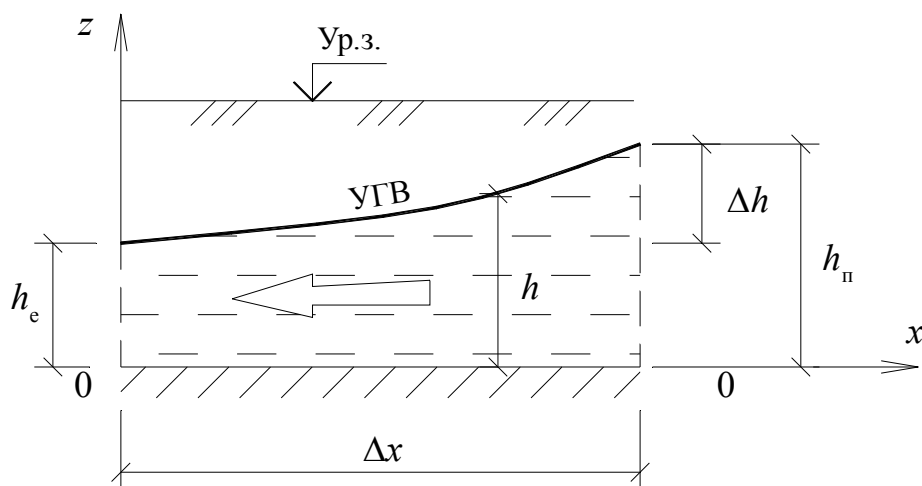


Рис. 51. К обоснованию критерия линеаризации по С.Ф. Аверьянову [6]

С.Ф. Аверьянов [6] использовал нелинейное гидравлическое уравнение Буссинеска для случая нестационарного одномерного движения грунтовых вод, которое можно записать в виде

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\partial h}{\partial t},$$

где  $\mu$  — недостаток насыщения;  $t$  — время; остальное оговорено.

Линеаризация уравнения Буссинеска заключается в замене переменной мощности грунтовых вод  $h$  на постоянную среднюю мощность

$$h_c = (h_{\pi} + h_e) / 2 = (12,5 + 7,5) / 2 = 10 \text{ м.}$$

Это I способ линеаризации по Буссинеску (подробнее см. в § 8).

Тогда линейное (линеаризованное) гидравлическое уравнение записывается из предыдущего в виде

$$\frac{k h_c}{\mu} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Далее С.Ф. Аверьянов записал приращения расходов потока грунтовых вод в конечных разностях. Приращение по нелинейному уравнению, отнесенное к длине потока  $\Delta x$ ,

$$Q_{\text{нелин}} = k \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \approx \frac{k(h_n I_n - h_e I_e)}{\Delta x} = \frac{10(12,5 \cdot 0,05 - 7,5 \cdot 0)}{100} = 0,0625 \text{ м/сут}^3$$

и аналогичная величина по линеаризованному уравнению

$$Q_{\text{лин}} = k h_c \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx k h_c \frac{h_n - h_e}{(\Delta x)^2} = 10 \cdot 10 \cdot \frac{12,5 - 7,5}{100^2} = 0,05 \text{ м/сут}^3,$$

откуда ошибка от использования линейного уравнения вместо более точного нелинейного будет

$$\delta = \frac{Q_{\text{нелин}} - Q_{\text{лин}}}{Q_{\text{нелин}}} \cdot 100\% = \frac{0,0625 - 0,05}{0,0625} \cdot 100\% = 20\%.$$

Заметим, что в данном случае соотношение

$$\Delta h/h_e = 0,667$$

и ошибка 20 % довольно большая. При других соотношениях  $\Delta h/h_e$  получим соответствующие ошибки  $\delta$ :

$\Delta h/h_e$	0,3	0,2	0,1
$\delta$	11,5 %	8,3 %	4,5 %.

Таким образом, критерий С.Ф. Аверьянова по уточнению И.К. Гавич (100) приводит к ошибке от 8,3 до 11,5 %, а по уточнению В.М. Шестакова (101) от 4,5 до 8,3 %.

Заметим, что в линеаризованной постановке расход занижается. Эта ошибка в определении расхода прямо передается на величину коэффициента фильтрации в обратных задачах. Это означает, что при камеральной обработке данных полевых изысканий по откачкам из скважин величина коэффициента фильтрации  $k$ , рассчитанная по формулам линеаризованной гидравлической теории фильтрации, будет, наоборот, завышенной, так как расход принимают по фактическому водопритоку в скважину. Использование искусственно завышенных коэффициентов фильтрации при проектировании водоотлива, водопонижения или дренажа приводит к занижению действительных уровней грунтовых вод, что идет не в запас надежности защиты от подтопления.

Заметим также, что существующая практика по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин [215] использует линеаризованную постановку гидравлической теории фильтрации. Таким образом, эта методика требует дальнейшего совершенствования [243].

Область применения нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации (по Буссинеску) на самом деле достаточно широкая. Например, в гидрогеологических условиях

г. Омска фильтрационные расчеты подтопления и дренирования преимущественно должны использовать нелинеаризованную гидравлическую теорию фильтрации в связи с малой мощностью грунтовых вод (см. пример 4).

Пример 33 позволяет уточнить применение критерия С.Ф. Аверьянова по линеаризации уравнения Буссинеска для грунтовых вод:

1) если требуется обеспечить фильтрационный расчет с погрешностью не более 5 %, то линеаризованные гидравлические решения можно применять при выполнении критерия С.Ф. Аверьянова, записанного так:

$$\Delta h/h_e \leq 0,1; \quad (102)$$

2) если же ошибка расчета не должна превышать 10 %, то критерий С.Ф. Аверьянова следует использовать в виде

$$\Delta h/h_e \leq 0,25. \quad (103)$$

Критерий А.Ж. Муфтахова [156; 208]

$$h_c / \xi \leq 0,1 \quad (104)$$

позволяет определить, можно ли применять для фильтрационного расчета гидравлическую теорию фильтрации или же следует использовать решения гидродинамической (гидромеханической) теории фильтрации с учетом вертикальных составляющих скоростей фильтрации. Здесь  $h_c$  — средняя мощность пласта;  $\xi$  — характерный размер области фильтрации.

Если критерий (104) соблюден, то можно использовать гидравлические решения уравнения Буссинеска для грунтовых вод как линеаризованные, так и нелинейные.

Пример 34. Критерий А.Ж. Муфтахова по гидравлической теории

Проверим критерий (104) на исходных данных примера 33 и рис. 47. Средняя мощность грунтовых вод

$$h_c = (h_n + h_e) / 2 = (12,5 + 7,5) / 2 = 10 \text{ м}$$

и характерный размер области фильтрации

$$\xi = \Delta x = 100 \text{ м},$$

поэтому отношение

$$h_c / \xi = 10 / 100 = 0,1.$$

Критерий (104) соблюден. Следовательно, для фильтрационных расчетов можно применять гидравлическую теорию фильтрации. Использовать более сложную гидродинамическую теорию нет необходимости.

Многие принципы схематизации при аналитических расчётах (по формулам) справедливы для моделирования фильтрации. Фильтрационные модели требуют меньшей схематизации и точнее описывают фильтрацию.

Дадим расширенное определение области фильтрации подземных вод.

Область фильтрации — это фильтрационный поток ниже дневной поверхности земли, связанный с защищаемым объектом, имеющий границы I, II, III, IV рода или условно неограниченный по некоторым направлениям. Для фильтрационного процесса, зависящего от времени (нестационарного, неустановившегося процесса), кроме граничных условий требуется дополнительно задать начальные условия.

Начальные условия для нестационарной задачи обычно задают в виде начального распределения напоров  $H$  в области фильтрации и на ее границах [134]. Чаще всего эти напоры называют естественными напорами, а в грунтовых водах на горизонтальном водоупоре — естественным УГВ (см. рис. 2).

Зоны влияния объекта на поток определяют с помощью нижеприведенных критериев. В ходе фильтрационных расчётов (см. рис. 49 и 50) размеры области фильтрации можно уточнять. Большая часть фильтрационных потоков в городах происходит в почти горизонтальных направлениях. Такие потоки называют плановыми и фильтрацию плановой, или двухмерной в плане, или плоскоплановой [213]. Когда говорят «разрез», то подразумевают вертикальный гидрогеологический разрез.

Граничное условие I рода (ГУ1) — это задание напора на границе области фильтрации. Математически это означает задание известных значений функции на границе и называется граничным условием Дирихле. Напор на границе может быть постоянным или переменным. В случае переменного напора на границе I рода решение может сильно усложниться и даже стать не выражаемым через известные аналитические функции. Тогда имеет смысл переходить к моделированию. В аналитических методах расчета чаще всего на границе I рода задают постоянный напор. Примеры границ I рода: уровень воды в дрене, траншее, котловане, реке, подвале здания и т.д.

Граничное условие II рода (ГУ2) — это задание расхода на границе области фильтрации. Математически это означает задание производной функции на границе (градиента функции) и называется граничным условием Неймана. Расход на границе может быть постоянным или переменным. В случае нулевого расхода через границу II рода имеем абсолютный водоупор — это распространенный случай. Примерами ГУ2 являются поверхность водоупорного грунта, непроницаемая преграда на пути потока подземных вод (метрополитен, сплошной фундамент здания), скважина или траншея с постоянным расходом откачки воды, инфильтрация воды на поверхность УГВ.

Граничное условие III рода (ГУ3) — это задание одновременно напора и расхода на границе области фильтрации, связанных между собой линейной зависимостью. Это математически смешанное граничное условие. Примеры границ III рода: слабопроницаемый прослой, подстилающий грунтовые воды;

закольматированная (заиленная) дрена. Условие III рода может применяться как искусственный прием для гидродинамически несовершенных дрена (зависающих над водоупором), чтобы преобразовать их в условно совершенные дрена, лежащие на водоупоре [158; 159; 265; 313]. Оно было использовано при получении многих решений в [208].

Граничное условие IV рода (ГУ4) — это внутренняя граница между участками области фильтрации с разными фильтрационными характеристиками, на которой ставится равенство расходов и напоров. Примерами границ IV рода являются контакты литологически разных слоев грунта (например, песка с супесью), а также контакты естественного грунта с техногенными включениями (например, свайное поле в потоке грунтовых вод).

Особой границей области фильтрации является свободная поверхность уровня грунтовых вод (УГВ), абсолютное давление на которой обычно равно атмосферному [12, с. 90]:

$$p = p_{\text{атм}}. \quad (105)$$

На УГВ принимают [12, с. 90] условие равенства отметки  $z$  напору  $H$ , отсчитываемому от горизонтальной плоскости 0-0 (см. рис. 40):

$$z = H. \quad (106)$$

### Пример 35. Область фильтрации и граничные условия

В качестве примера области фильтрации с граничными условиями ГУ1, ГУ2 и свободной поверхностью (УГВ) рассмотрим рис. 51.

Справа и слева область фильтрации (например, грунтовые воды в песке) ограничена вертикальными сечениями, в которых известны соответствующие напоры  $h = h_{\text{п}}$  и  $h = h_{\text{е}}$ . Это граничное условие I рода (ГУ1, условие Дирихле), так как на правой и левой границах задана функция — напор  $h$ .

Вниз грунтовые воды не могут просачиваться, так как этому препятствует абсолютный водоупор (например, глина). Так как грунтовая вода не может двигаться по нормали к горизонтальному водоупору, то вертикальный градиент напора

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0,$$

расход через водоупор нулевой. Таким образом, на поверхности водоупора задано граничное условие II рода (ГУ2) — условие Неймана.

Сверху область фильтрации ограничена свободной поверхностью — уровнем грунтовых вод (УГВ) — давлением на которой равно атмосферному. Это особая граница, так как она может быть подвижной. Если фильтрация стационарная (установившаяся), по УГВ принимает фиксированное положение, но это не значит, что вода в грунте не движется. На стационарной наклонной свободной поверхности вода фильтруется вдоль нее, то есть стационарный наклонный УГВ является линией тока. Если наклонный УГВ вогнут вниз (см. рис. 51), то его называют кривой подпора. Если же УГВ выпуклый вверх, то он называется кривой депрессии или кривой спада. Кривые депрессии наблюдаются при работе дренажа (см. рис. 21), систем водопонижения (см. рис. 28, 29).

На стенках траншей, котлованов и скважин возникает участок высачивания высотой  $h_{\text{выс}}$ , когда УГВ приходит выше отметки уровня воды в выемке. Величина  $h_{\text{выс}}$  может быть вычислена по специальным формулам [1; 3; 12, 13; 75; 198; 199; 314] или же найдена с помощью двух- и трехмерного моделирования в вертикальном разрезе.

Рассмотрим геометрию фильтрационных потоков. Двухмерное движение фильтрационных потоков в плане (вид сверху) для упрощения расчётов сводят одномерному:

- линейному (плоскопараллельному);
- радиальному.

Критерием является соотношение длины  $L_1$  и ширины  $L_2$  объекта [208, с. 12]:

$$L_1 / L_2 \geq 5 . \quad (107)$$

Если критерий (107) выполнен, то движение фильтрационного потока принимают линейным (плоскопараллельным), направленным перпендикулярно длине  $L_1$ . Например, двухлинейный дренаж для вытянутых зданий — см. рис. 21 — часто рассчитывают при плоскопараллельной в плане одномерной фильтрации. Если левое соотношение (107) меньше 5, то поток считают радиальным, как к одиночной скважине или круглому в плане котловану. Например, фильтрацию подземных вод в кольцевой дренаж считают радиальной, происходящей со всех сторон — см. рис. 16 и пример 51.

Отметим, что такая схематизация плановых фильтрационных потоков является довольно грубой, но достаточной для первоначальных расчётов. Поэтому она рекомендована справочным пособием к СНиП [208]. Большинство формул в [208] приведено для плоскопараллельной и радиальной плановой фильтрации, то есть для одномерных потоков (исправления [208] см. прил. 5). Исключение представляет лишь расчёт лучевого дренажа [208; 260], где расчётные зависимости приведены для двухмерной фильтрации в плане. Строго говоря, в пределах лучевых дрен формулы двухмерной фильтрации не точны, так как они показывают полную сработку УГВ над дренаем. На самом деле натурные обследования [201] показывают, что над лучевыми дренами образуется нависание УГВ. Поэтому лучевые дренажи надёжнее не рассчитывать, а моделировать как трёхмерные фильтрационные потоки, что продемонстрировано в нашей статье [261].

Прямоугольный в плане объект (очаг подтопления, инфильтрации, кольцевой или пластовый дренаж) при соотношении (107) меньше 5 можно привести к круглому в плане объекту по формуле А.В. Аравина [10] — Н.К. Гириного [57], приведенной в [208, с. 12]:

$$r_0 = \beta (L_1 + L_2) / 4, \quad (108)$$

где  $\beta$  — коэффициент, определяемый по соотношению  $L_2/L_1$ :

$L_2/L_1$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\beta$	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18

Таким образом, мы рассмотрели основы геометрической схематизации реального фильтрационного потока к одномерному в плане. Размеры области фильтрации определим ниже с помощью зон и радиусов влияния.

Процесс подтопления или дренирования может быть рассмотрен нестационарный (неустановившийся), то есть зависящий от времени, или же стационарный (установившийся), не зависящий от времени.

Влияние границы I, II или III рода в течение прогнозируемого периода времени  $t$  можно оценить по формуле И.Е. Жернова и В.М. Шестакова [79, с. 37], вычисляя зону влияния  $L_{\text{вл}}$  плоскопараллельного потока или радиус  $R_{\text{вл}}$  влияния осесимметричного потока с погрешностью 1 см, соответствующей точности инструментов для измерения уровней подземных вод [198, с. 439; 215; 314]. Формула И.Е. Жернова и В.М. Шестакова имеет вид

$$L_{\text{вл}} \approx R_{\text{вл}} \approx 4,5\sqrt{at}, \quad (109)$$

где  $a$  — коэффициент уровнепроводности для безнапорных подземных вод

$$a = kh_c/\mu \text{ или } a = kh_e/\mu, \quad (110)$$

или коэффициент пьезопроводности для напорных подземных вод с мощностью (толщиной) водоносного пласта  $M$ , который находят как

$$a = kM/\mu_y. \quad (111)$$

Здесь  $\mu$  — коэффициент гравитационной водоотдачи;  $\mu_y$  — коэффициент упругой водоотдачи;  $h_c$  — средняя мощность грунтовых вод или верховодки, вычисляемая при расчете по формулам гидравлической теории фильтрации с линеаризацией уравнения Буссинеска по I или II способу (см. § 8);  $h_e$  — естественная мощность грунтовых вод, используется в нелинейных решениях уравнения Буссинеска.

Формула И.Е. Жернова и В.М. Шестакова (109) получена в рамках линеаризованной постановки уравнения Буссинеска, определяемой критериями (102) и (103) в зависимости от наперед заданной точности фильтрационного расчета (5 или 10 %). Наилучшие результаты она дает для напорных пластов с постоянной мощностью, а также для грунтовых вод, но при условии соблюдения критериев (102) и (103).

Однако для грунтовых вод и верховодок малой и нулевой начальной мощности (например при образовании нового техногенного горизонта на территории застройки) формула (109) сильно завышает величину зоны влияния. В



этом случае следует применять формулы для зон влияния, полученные в виде решений нелинейного уравнения Буссинеска. По терминологии П.Я. Полубариновой-Кочиной [198; 199; 200], такие решения называют точными гидравлическими решениями.

В случае образования нового техногенного горизонта грунтовых вод или верховодки зона влияния может быть определена по формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной (188), а также по нашей формуле (206), полученной в § 16 данной работы.

Для растекания куполов можно использовать приближенные формулы (215) и (225) (см. § 16). Зоны влияния при строительном водоотливе, водопонижении и дренаже в грунтовых водах малой мощности можно определить по нашим зависимостям (267) и (278) из § 17.

### Пример 36. Очаг подтопления от затопленного подвала

Определим зону влияния подтопления от затопленного подвала (рис. 52) размером в плане  $12 \times 24 \text{ м}^2$  спустя 1 месяц (30 сут) после аварии на внутренней теплосети. Коэффициент фильтрации грунта  $k = 5 \text{ м/сут}$ , недостаток насыщения  $\mu = 0,05$ . Здание расположено на водоупоре. Глубина воды в подвале  $H_0 = 3 \text{ м}$ . На расстоянии  $B = 150 \text{ м}$  от стены подвала находится подпорная стенка с горизонтальным перехватывающим дренажем. Требуется определить, надо ли включать дренаж в границу области фильтрации как ГУ1, или же границей области фильтрации в рассматриваемый период времени будет контур расширяющегося очага подтопления.

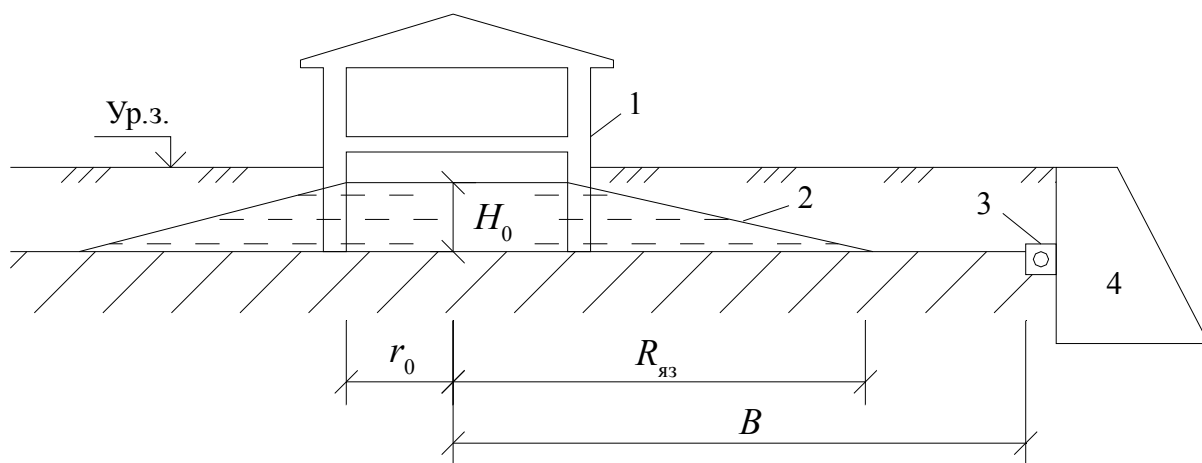


Рис. 52. Распространение очага подтопления из затопленного подвала: 1 — здание с подвалом, затопленным от аварии на теплосети; 2 — язык подтопления, круглый в плане; 3 — горизонтальный дренаж; 4 — подпорная стенка от оползня

Прежде всего, проверяем критерий (107):

$$L_1 / L_2 = 24 / 12 = 2 < 5,$$

следовательно, фильтрация воды в грунте будет радиальной в плане, и вокруг здания начнет расплзаться в стороны круглый очаг подтопления.

Прямоугольное в плане здание приводим к круглому по формуле (108). Так как отношение  $L_2/L_1 = 12/24 = 0,5$  и коэффициент  $\beta = 1,17$ , то радиус круглого здания

$$r_0 = \beta (L_1 + L_2) / 4 = 1,17(24 + 12) / 4 = 10,53 \text{ м.}$$

В формуле (206) из § 16 вначале вычисляем безразмерный временной параметр

$$\tau = \frac{kH_0 t}{\mu r_0^2} = \frac{5 \cdot 3 \cdot 30}{0,05 \cdot 10,53^2} = 81,17.$$

Радиус языка подтопления по (206) получается

$$\begin{aligned} R_{\text{яз}} &= r_0 \left[ 1 + (1,5114 - 0,0461 \ln \tau) \sqrt{\tau} \right] = \\ &= 10,53 \left[ 1 + (1,5114 - 0,0461 \ln 81,17) \sqrt{81,17} \right] = 134,7 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким образом, язык подтопления не достигнет дренажа в течение 1 месяца и дренирования очага подтопления не произойдет. Следовательно, для данного здания лучше было бы иметь собственный дренаж, например, пристенный (см. рис. 20).

Проверим зону влияния по формуле (109), хотя она для данного случая заведомо не подходит, так как для описания процесса фильтрации языка подтопления по водоупору нельзя применять линеаризованную постановку уравнения Буссинеска. Тем не менее вычисляем:

$$\begin{aligned} h_c &= (H_0 + 0) / 2 = (3 + 0) / 2 = 1,5 \text{ м;} \\ a &= kh_c / \mu = 5 \cdot 1,5 / 0,05 = 150 \text{ м}^2 / \text{сут;} \\ R_{\text{вл}} &= 4,5 \sqrt{at} = 4,5 \sqrt{150 \cdot 30} = 301,9 \text{ м.} \end{aligned}$$

Действительно, как уже было сказано, линеаризованная постановка приводит к завышению зон влияния. В данном случае пришлось бы включить дренаж в область фильтрации, что не достоверно, так как на самом деле техногенный водоносный купол не достигнет дренажа.

Схематизация фильтрационного потока по времени определяет, каким считать поток в течение расчетного периода: стационарным (установившимся) или нестационарным (неустановившимся). У идеального стационарного потока положение УПВ не меняется в течение интересующего времени. У нестационарного — наоборот, меняется.

В реальных условиях все фильтрационные потоки являются неустановившимися. Однако нужно различать резкие изменения положения УПВ и, наоборот, — не очень существенные. Работа дренажа в период строительства обычно связана с нестационарной фильтрацией, так как возникают и развиваются кривые депрессии УГВ (при плоскопараллельной фильтрации) или воронки депрессии УГВ (при осесимметричной). Например, в условиях Омска этот период может продолжаться около месяца [206; 255]. В процессе эксплуатации строительного объекта при многолетней работе дренажа вокруг здания возникает постоянное понижение УГВ — воронка депрессии. Этот

период рассчитывают как стационарную фильтрацию, на фоне которой происходят сезонные колебания УГВ (см. рис. 6).

Момент перехода нестационарной фильтрации в стационарную приближенно можно определить сравнительными расчётами по формулам нестационарной фильтрации. Для этого замечают, когда изменение положения УГВ становится несущественным. Согласно [208], несущественным считают изменение положения УГВ не более 5 % от максимального изменения за расчётный период времени.

Критерий 5 % является относительным. Можно отталкиваться и от другого критерия, связанного с точностью измерения УГВ, который зависит от вида измерительного инструмента. Если для замера положения УГВ используют уровнемер-хлопушку, то погрешность составляет около 1 см. В таком случае величина 1 см может быть принята за критерий несущественного изменения положения УГВ [198, с. 439; 215; 314].

В аналитических методах имеются критерии по определению моментов стабилизации потоков для соответствующих типовых расчётных схем. Однако в научной и нормативно-справочной литературе систематизация этих критериев недостаточно четкая и требует совершенствования. При моделировании объектов такие критерии можно найти сравнением стационарной и нестационарной модели. Можно значительно усовершенствовать и систематизировать эти критерии с помощью компьютерного моделирования.

Приведем известные критерии схематизации по времени для наиболее распространённых одномерных типовых расчётных схем (областей фильтрации) при однородном строении водоносного пласта. По аналогии с теорией теплопроводности для линеаризованных фильтрационных задач вводят критерий Фурье (безразмерный параметр времени) [6; 7; 151]

$$\tau = at/\xi^2, \quad (112)$$

где  $\xi = L$  — характерный размер при плоскопараллельной в плане фильтрации;  $\xi = R$  — то же при осесимметричной.

Величину  $t$  при  $\tau = 1$  в (112) С.Ф. Аверьянов [6; 7] назвал «временем стабилизации», подразумевая под  $L$  длину области фильтрации. С.Ф. Аверьянов оговорил [6, с. 190], что «время стабилизации» показывает лишь порядок времени наступления стационарного режима и что «...более точно характер процесса должен быть установлен на основе более внимательного рассмотрения условий питания, оттока и т.д. ...». Было подчеркнуто [6], что рассматриваются малые изменения поверхности УГВ  $\Delta h$  по отношению к естественной мощности грунтовых вод  $h_e$ . Таким образом, С.Ф. Аверьянов рассмотрел время стабилизации лишь для линеаризованных задач гидравлической теории фильтрации (см. § 8).

Н.Н. Веригин [151, с. 15] указал следующие величины безразмерного времени: «С точностью до 5 % режим фильтрации можно считать квазистационарным [то есть близким к установившемуся] при следующих значениях критерия Фурье: для линейной задачи  $\tau \geq 1,4$ , осесимметричной  $\tau \geq 2,5$ , сферической  $\tau \geq 1,4 \dots$ ». Н.Н. Веригин с соавторами [151] рассмотрел линеаризованные постановки гидравлической теории фильтрации.

Рассмотрим осреднение коэффициентов фильтрации. Схематизацию проницаемости пористой среды (осреднение коэффициентов фильтрации  $k$ ) производят в случае неоднородной области фильтрации. Неоднородности могут быть природными, возникающими естественным путём в ходе геологической истории, например наложения литологически разных грунтов: песков, супесей, суглинков и т.д. В городах возникают другие неоднородности пористой среды — техногенные — вследствие устройства фундаментов зданий и сооружений, самих подземных сооружений, а также из-за местного уплотнения грунта под зданиями, сооружениями и около свай. Неоднородности имеют разные уровни значимости.

Понятие «неоднородность» является относительным, связано с масштабом рассмотрения [50], то есть с соотношением размеров области фильтрации и зон неоднородностей. Например, если определяют общее понижение УГВ до нормы осушения в пределах большого городского района, то положение УГВ под отдельными зданиями не детализируется, а район принимают условно однородным. Однако если рассчитывают кривую депрессии УГВ, проходящую через свайное поле или под фундаментами, то конструкции и уплотнённый грунт нужно рассматривать как элементы фильтрационной неоднородности, так как при таком небольшом масштабе рассмотрения они заметно влияют на УГВ [247; 248; 265]. Критерии, связанные с фильтрационной неоднородностью грунтов оснований, порождаемой техногенным влиянием застройки, приведены в § 15 – 17.

Осреднение проницаемости (коэффициентов фильтрации  $k$ ) производят при фильтрации:

- направленной параллельно слоям с разной проницаемостью;
- перпендикулярно слоям с разной проницаемостью;
- с обтеканием отдельных неоднородностей.

Так как при фильтрационных расчётах защиты от подтопления главным является определение положения УГВ, это накладывает отпечаток на способы осреднения проницаемости. Наиболее корректным является осреднение проницаемости при фильтрации параллельно слоям. Для двух других случаев, указанных выше, строго говоря, осреднение делать нельзя, так как это может исказить истинное положение УГВ. Однако это опять связано с масштабом рассмотрения.

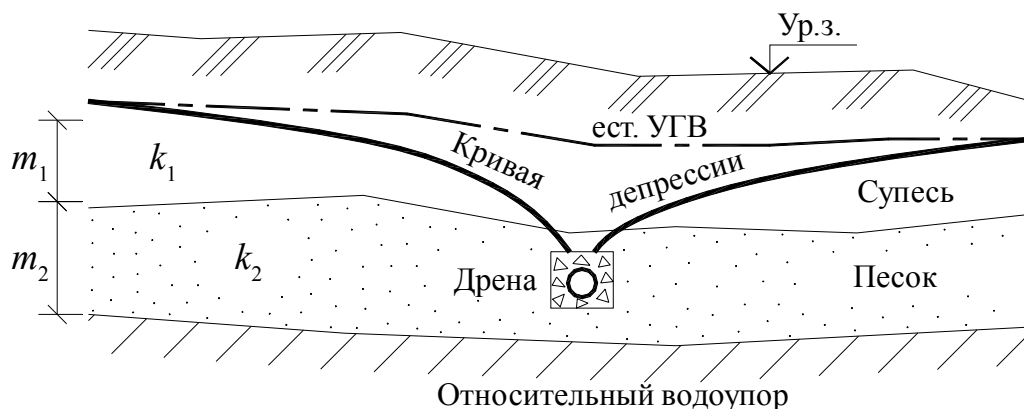


Рис. 53. Несовершенная дрена до схематизации

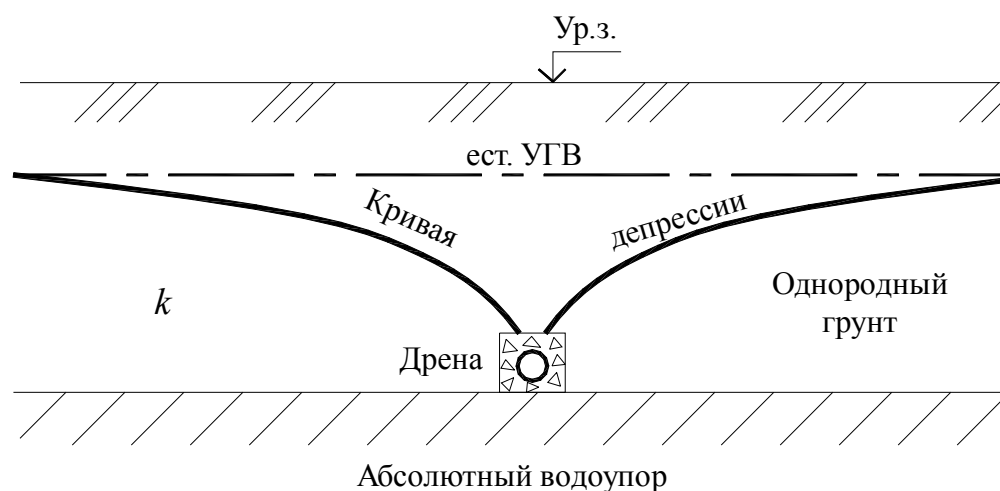


Рис. 54. Совершенная дрена после схематизации

### Пример 37. Об осреднении проницаемости грунта

Если плановые размеры кольцевого дренажа достигают ста метров, а сваи под дренируемым домом имеют сечение 0,3 x 0,3 или 0,4 x 0,4 метра, то можно вполне корректно осреднить коэффициенты фильтрации при обтекании потоком свай и рассматривать свайное поле как массив со средним коэффициентом фильтрации  $k$ .

Другой пример. Вблизи дрен того же кольцевого дренажа параллельно проложен массивный бетонный фундамент под тяжёлое оборудование, перекрывающий фильтрационный поток в дрены. Тогда между фундаментом и дренажом понижение УГВ будет почти полным, а за фундаментом понижение УГВ может и не быть. В этом случае осреднять  $k$  нельзя.

На рис. 53 показана дрена, которая принимает воду, фильтрующуюся через почти горизонтальные слои супеси и песка, с соответствующими коэффициентами фильтрации  $k_1$  и  $k_2$  и средними мощностями  $m_1$  и  $m_2$ . Рис. 53 — это пример реального гидрогеологического разреза.

На рис. 54 показан схематизированный гидрогеологический разрез, полученный на основе реального разреза рис. 53. Относительный водоупор

стал горизонтальным и абсолютным (то есть абсолютно водонепроницаемым), дрена из гидродинамически несовершенной превратилась в совершенную (лежащую на водоупоре), пористая среда идеализирована как однородная со средним коэффициентом фильтрации  $k$ , который получен как

$$k = (k_1 m_1 + k_2 m_2) / (m_1 + m_2). \quad (113)$$

Таким образом, средний коэффициент фильтрации грунта  $k$  для потока, параллельного слоям с разной проницаемостью, вычисляют по общей формуле Г.Н. Каменского [91]:

$$k = (k_1 m_1 + k_2 m_2 + \dots + k_i m_i) / (m_1 + m_2 + \dots + m_i). \quad (114)$$

Формулы (113) и (114) справедливы при соотношении проницаемости отдельных слоёв не более 25 [208]. Например, для (113)

$$k_2 / k_1 \leq 25.$$

Обратим внимание, что при малой мощности грунтовых вод несовершенная дрена (см. рис. 53) может обладать большей водозахватной способностью, чем совершенная дрена, лежащая на водоупоре (см. рис. 54). На это обстоятельство обратил внимание Д. Киркхем [75]. В отечественной гидрогеологической литературе этот вопрос мало освещен. Поэтому значительное внимание в нашей работе уделено грунтовым водам малой мощности, динамика которых нелинейная и существенно отличается от основных положений линеаризованной гидравлической теории фильтрации.

К осреднению  $k$  для фильтрационных потоков, направленных перпендикулярно слоям с разной проницаемостью, при проектировании защиты от подтопления необходимо подходить с осторожностью. Средняя величина  $k$  почти не влияет на расход потока, однако истинное положение УГВ может существенно исказиться — см. пример 37.

Средний коэффициент фильтрации грунта  $k$  для потока, перпендикулярного слоям с разной проницаемостью, вычисляют по следующей формуле [91]:

$$k = (m_1 + m_2 + \dots + m_i) / (m_1 / k_1 + m_2 / k_2 + \dots + m_i / k_i). \quad (115)$$

Таким образом, лучше не осреднять проницаемость пористой среды по (115), а попробовать рассчитать УГВ по формулам, учитывающим неоднородность без осреднения коэффициентов фильтрации. Если аналитические зависимости не получены, то фильтрацию надо моделировать.

Для двумерных и осесимметричных задач средний коэффициент фильтрации грунта  $k$  в случае потока, обтекающего отдельные неоднородности, можно найти как [208]

$$k = (k_1 F_1 + k_2 F_2 + \dots + k_i F_i) / F, \quad (116)$$

где  $F_i$  — площадь  $i$ -го участка с коэффициентом фильтрации  $k_i$ ;  $F$  — площадь области фильтрации, разбитой на  $i$  участков

Для трехмерных задач средний коэффициент фильтрации грунта  $k$  для потока, обтекающего объемные неоднородности, можно найти приближенно:

$$k = (k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_i V_i) / V, \quad (117)$$

где  $V_i$  — площадь  $i$ -того участка с коэффициентом фильтрации  $k_i$ ;  $V$  — объем области фильтрации, разбитой на  $i$  подобластей.

Величину коэффициента водоотдачи  $\mu$  принимают по данным полевых или лабораторных определений. В первом приближении можно воспользоваться литературными данными (см. табл. 5). Закономерности процессов водоотдачи изучены не до конца [177].

Осреднение коэффициентов водоотдачи недостатка насыщения имеет смысл лишь при нестационарных процессах. В водоносных пластах, имеющих неоднородное строение — слоистое, с включениями фундаментов, подземных сооружений и т.д. — водоотдачу можно осреднить лишь приближенно. Наиболее корректно это осреднение можно провести в случае, когда неоднородности имеют плановое расположение. Тогда средний коэффициент водоотдачи

$$\mu = (\mu_1 F_1 + \mu_2 F_2 + \dots + \mu_i F_i) / F, \quad (118)$$

где  $F_i$  — площадь  $i$ -го участка с коэффициентом водоотдачи  $\mu_i$ ;  $F$  — площадь всей области фильтрации, разбитой на  $i$  участков.

В случае слоистого в разрезе пласта осреднять коэффициент водоотдачи при расчёте УГВ сложно, так как в хорошо проницаемых прослоях начинает нарушаться сплошность потока. Кроме того, в ходе инженерных изысканий величины  $\mu$  для каждого прослоя обычно не определяют, а сразу находят средний  $\mu$  на некоторую мощность опробования пласта по вертикали  $M_0$ .

Е.А. Ломакин, В.А. Мироненко и В.М. Шестаков [126, с. 211] предлагают вычислять расчетную водоотдачу как среднюю взвешенную по площадям неоднородностей, то есть как

$$\mu = (F_1 + F_2 + \dots + F_i) / (F_1 / \mu_1 + F_2 / \mu_2 + \dots + F_i / \mu_i), \quad (119)$$

где  $F$  — площадь  $i$ -го участка с коэффициентом водоотдачи  $\mu_i$ .

В.А. Мироненко [276] предложил более сложную формулу для среднего коэффициента водоотдачи

$$\mu = \sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{\mu_i \sum_1^m k_m M_m} / \sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{\frac{k_i M_i}{\mu_i}}, \quad (120)$$

где  $M_i$  — мощность  $i$ -го прослая с коэффициентами фильтрации  $k_i$  и водоотдачи  $\mu_i$ .

Схематизация с применением принципа суперпозиции годится лишь для линеаризованных решений гидравлической теории фильтрации, когда изменения поверхности УГВ  $\Delta h$  малы отношению к естественной мощности грунтовых вод  $h_e$ . При несоблюдении условий (102) и (103) необходимо решать нелинейное уравнение Буссинеска (67). Если условия (102)–(103) соблюдаются, то уравнение (67) можно линеаризовать I или II способом (см. § 8). По А.Ж. Муфтахову [156], изменения поверхности УГВ  $\Delta h$  по отношению к длине области фильтрации грунтовых вод  $L$  не должны превышать 10 %. Тогда можно использовать гидравлические решения. Из общей теории математических моделей [227, с. 23] известно, что принцип суперпозиции справедлив лишь для линейных моделей. Это означает, что при возмущениях уровня грунтовых вод, не превышающих 10-25 % их мощности, общие решения можно найти в виде суммы частных решений.

#### Пример 38. Принцип суперпозиции для двух скважин

Этот принцип заключается в сложении потоков. Поясим примером (рис. 55). Из скважины № 1 выкачивают воду. Если это одиночная скважина, то вокруг неё образуется воронка депрессии 1. То же самое можно сказать и о скважине № 2 и соответствующей воронке депрессии 2. Однако если скважины работают одновременно, то между ними в действительности образуется пониженный УГВ, обозначенный 3 на рис. 55. Таким образом, чтобы найти истинное положение УГВ при работе двух скважин, можно вначале рассчитать воронку депрессии 1. Затем рассчитать воронку 2, но её положение отмерить вниз не от естественного УГВ, а от уровня воронки 1. Тогда получим расчётное положение кривой депрессии 3. Это и есть принцип суперпозиции или сложение течений. Напомним, что его можно применять, если понижение в скважине  $S = \Delta h$  не более 10-25 % от естественной мощности пласта  $h_e$ . По соотношению масштабов на рис. 55 видно, что это условие не соблюдено, то есть в данном случае принцип суперпозиции является слишком грубым приемом.

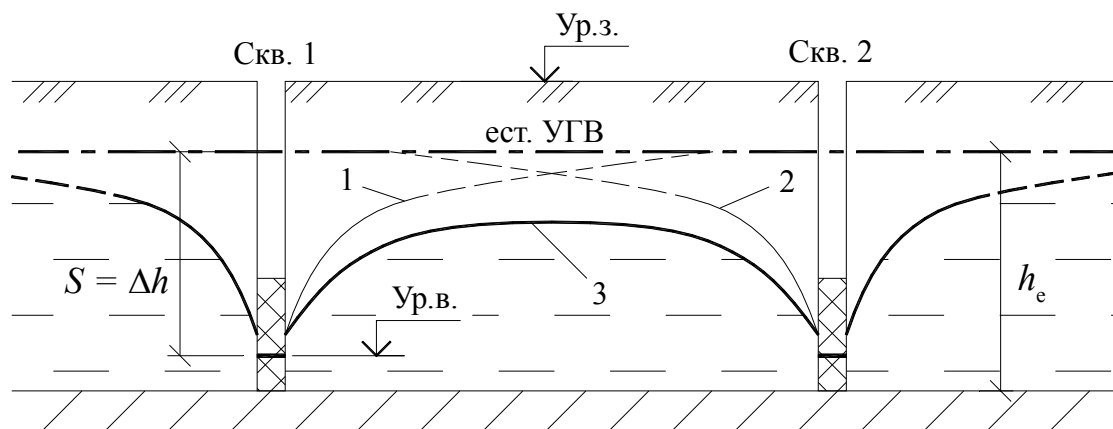


Рис. 55. Принцип суперпозиции (сложение течений)



## § 14. Обратные фильтрационные задачи

Непосредственно к схематизации области фильтрации примыкают так называемые обратные задачи [50].

Классификацию обратных фильтрационных задач в гидрогеологии городов можно принять по И.К. Гавич [49, с. 118]:

- 1) граничные задачи;
- 2) инверсные задачи;
- 3) индуктивные задачи.

С помощью обратных граничных задач определяют неизвестные граничные условия. Например, зная подъем УГВ за определенный промежуток времени, определяют интенсивность инфильтрации  $\omega$ , м/сут [208]. При этом должны быть известны коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$ , а также средняя мощность  $h_c$  грунтовых вод. Использование параметра средней мощности  $h_c$  предполагает линеаризованную постановку исходных уравнений фильтрации. Если же образуется новый техногенный горизонт грунтовых вод на водоупоре, то процесс фильтрации становится нелинейным. В таком случае величина  $h_c$  становится неопределенной, непостоянной во времени. Тогда граничную задачу по определению величины  $\omega$  корректно можно определить с помощью нелинейных моделей фильтрации (см. § 25). В рамках линеаризованной теории фильтрации граничные задачи по определению величины дополнительного инфильтрационного питания  $\omega$  изложены в [208, с. 65-70].

Обратные инверсные задачи предназначены для определения фильтрационных параметров: коэффициентов фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$ . При этом заранее известными величинами являются напоры, уровни и расходы подземных вод, то есть то, что, наоборот, подлежит определению в прямых задачах. Инверсные задачи решают в ходе инженерных изысканий: определяют  $k$ ,  $\mu$  и др. Наиболее достоверно фильтрационные параметры можно определить полевым методом [13] и особенно методом откачки воды из скважин [215]. Обратим внимание, что существующая производственная практика последнего метода [215] использует для грунтовых вод линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации (см. § 8).

Часто линеаризованные решения (см. § 8 и 13) в условиях подтопления городской застройки применить невозможно, что проиллюстрировано в примере 36. Тогда необходимо использовать нелинейные гидравлические решения, так называемые точные решения [210]. Часть этих немногочисленных решений хорошо известна [210]. Нам тоже удалось получить несколько точных решений разработанным методом АДЧМ (см. § 16 и 17).

### Пример 39. Решение нелинейной обратной задачи

Используя данные примера 36, решим обратную инверсную задачу по определению коэффициента фильтрации  $k$  и недостатка насыщения  $\mu$ . Допустим известно (см. рис. 52), что через  $t=15$  сут после затопления подвала язык подтопления растекся с радиусом  $R_{\text{яз}} = 100,5$  м от центра подвала, а через  $t=30$  сут радиус языка увеличился до  $R_{\text{яз}} = 134,7$  м. Например, это может быть известно из наблюдений за появлением подземной воды в существующих колодцах и погребах. Глубина воды в подвале  $H_0 = 3$  м, а приведенный радиус подвала  $r_0 = 10,53$  м (см. пример 36).

Данная задача нелинейная. Поэтому применим нашу точную формулу (206) и составим систему из двух трансцендентных уравнений с двумя неизвестными  $k$  и  $\mu$ , которая решается в MathCAD [224] простым подбором с помощью функций Given и Minerr (рис. 56).

**Решение системы из двух уравнений: обратная инверсная задача**

Начальные значения:      коэффициент фильтрации       $k := 5.000$   
    недостаток насыщения       $\mu := 0.05$

Система уравнений:

Given

$$100.5 = 10.53 \cdot \left[ 1 + \left( 1.5114 - 0.0461 \cdot \ln \left( \frac{k \cdot 3 \cdot 15}{\mu \cdot 10.53^2} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{k \cdot 3 \cdot 15}{\mu \cdot 10.53^2}} \right]$$

$$134.7 = 10.53 \cdot \left[ 1 + \left( 1.5114 - 0.0461 \cdot \ln \left( \frac{k \cdot 3 \cdot 30}{\mu \cdot 10.53^2} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{k \cdot 3 \cdot 30}{\mu \cdot 10.53^2}} \right]$$

Решение:

$$\text{Minerr}(k, \mu) = \begin{pmatrix} 4.939 \\ 0.049 \end{pmatrix}$$

Рис. 56. Решение в MathCAD 2000

В результате мы получили приближенные значения коэффициента фильтрации  $k$  и недостатка насыщения  $\mu$  с погрешностью около 1-2 %. Некоторое отличие от значений  $k$  и  $\mu$  в примере 36 можно объяснить тем, что величины радиусов языка подтопления  $R_{\text{яз}}$  были округлены примерно с такой же точностью.

Целью обратных индуктивных задач является уточнение или получение новых математических зависимостей, описывающих какой-либо процесс фильтрации. Примерами определения таких зависимостей являются формулы (206), (267) и (278), полученные новым комбинированным методом АДЧМ автомодельных движений в сочетании с безразмерным численным моделированием с помощью МКР-Excel, что продемонстрировано в § 16 и 17.

## § 15. Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований

В городском строительстве происходит изменение проницаемости грунтов оснований под зданиями, сооружениями, а также грунтов в целом по территории застройки. Рассмотрим наиболее существенные причины этого явления и покажем, как можно осуществить прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований. Данные задачи относятся к разновидности обратных инверсных задач (см. § 14) и их нужно решать на стадии схематизации области фильтрации (см. § 13).

Проницаемость грунтов естественного и искусственного происхождения, подверженных нагрузке от застройки, более склонна к уменьшению, чем к увеличению, так как деформации грунтов, уменьшение их пористости и коэффициента фильтрации обычно не обратимы [53; 84; 88; 116; 128; 141; 147; 279; 280; 296]. Это физические причины изменения проницаемости. Кроме того, уменьшение проницаемости грунта может происходить в результате химических процессов. Например, при кольматации порового пространства железистыми соединениями. Другой причиной кольматажа пор может быть биологический процесс жизнедеятельности бактерий. Эти процессы интенсивно изучаются научной школой В.С. Алексеева (ВНИИ ВОДГЕО) [51; 194].

Увеличение проницаемости может наблюдаться в случае частичной замены грунта основания подсыпками из несвязных материалов: песок, щебень и т.д. Это изменение проницаемости определяют по коэффициенту фильтрации подсыпки. Процессы суффозии [134] имеют ограниченный характер [89]. Известны случаи увеличения проницаемости грунтов при инфильтрации в грунт химических стоков [52]. В.И. Федоров [293] натурными обследованиями застроенных территорий дальневосточных городов России выяснил, что глинистые грунты нарушенной структуры в обратных засыпках фундаментов и подземных частей зданий и сооружений приобретают развитую сеть макропор. Это приводит к увеличению проницаемости этих грунтов и повышению количества инфильтрующихся атмосферных вод в обратные засыпки. Поэтому некоторые застроенные территории могут подтапливаться даже без утечек из водонесущих коммуникаций, когда в грунтах обратных засыпок формируется новый техногенный горизонт сезонной верховодки или постоянных грунтовых вод. Такой же процесс подтопления, когда пазухи котлованов служат накопителями влаги, был изучен нами при разработке защиты от подтопления Омского метрополитена и окружающей территории в 1992-1994 гг. [206; 207].

Рассмотрим уменьшение проницаемости грунтов оснований в зависимости от нагрузки, степени сжимаемости и водонасыщения грунта, то есть вследствие физических причин.

Уменьшение проницаемости грунтов оснований может произойти по следующим причинам:

- внедрение слабопроницаемых и непроницаемых строительных конструкций в грунт (сваи, шпунт и т.д.);
- динамическое уплотнение грунта в процессе забивки свай;
- консолидационное уплотнение грунта после забивки свай;
- уплотнение грунта под фундаментами сплошного и ленточного типа;
- уплотнение грунта оснований дорог в процессе строительства и эксплуатации;
- уплотнение грунта при строительном водопонижении.

*Зависимость проницаемости грунтов от коэффициента пористости.* Проницаемость глинистых грунтов (супесей, суглинков, глин) при их уплотнении может уменьшаться на несколько порядков больше, чем у песчаных грунтов [80; 84; 88; 202; 296].

Коэффициент фильтрации глинистого грунта, уплотненного статической нагрузкой (например зданием), можно определить по формуле В.Н. Жиленкова [80]:

$$k = k_0 \exp[\beta_s(e - e_0)] , \quad (121)$$

где  $k_0$  — начальный коэффициент фильтрации грунта в естественном залегании;  $e_0$  и  $e$  — коэффициенты пористости грунта соответственно в естественном залегании (до уплотнения) и после уплотнения;  $\beta_s$  — коэффициент уплотнения грунта под статической нагрузкой, зависящий от типа грунта (по нашим расчетам): для супеси  $\beta_s \approx 20$ , суглинка  $\beta_s \approx 10$ , глины  $\beta_s \approx 5$ . Величины  $e_0$  и  $e$  определяют методами механики грунтов. Формулу, аналогичную (121), привел Ю.К. Зарецкий [84], но без конкретизации коэффициента уплотнения грунта.

Более точно, по В.Н. Жиленкову [80], коэффициент

$$\beta_s = 0,2/(W_L - 0,1), \quad (122)$$

где  $W_L$  — граница текучести грунта (верхний предел пластичности). Формула (122) записана нами проще, чем в [80], что практически не влияет на ее результат.

Коэффициент фильтрации глинистого грунта, уплотнённого динамической нагрузкой (например под дорогой), можно определить по формуле Г.И. Черного [307]:

$$k = k_0 \exp \left[ \frac{\beta_D (e - e_0)}{e_0 (e + 1)} \right] , \quad (123)$$

где  $\beta_D$  — коэффициент уплотнения грунта динамической нагрузкой. Для любых глинистых грунтов  $\beta_D \approx 19$  [307].

Формулы (121) и (123) дали неплохое совпадение (по нашим расчетам) с независимыми экспериментальными данными В.М. Павилонского [180; 181] для глинистых грунтов, уплотненными соответственно статическими и динамическими нагрузками.

Расчёты по формуле В.Н. Жиленкова (121) показали, что в зоне уплотнения под ленточными фундаментами (рис. 57) проницаемость глинистых грунтов уменьшается в среднем в 7-8 раз, а максимально — в супесях в 10-20 раз. Эти изменения коэффициента фильтрации под фундаментами нужно учитывать при проектировании защиты от подтопления.

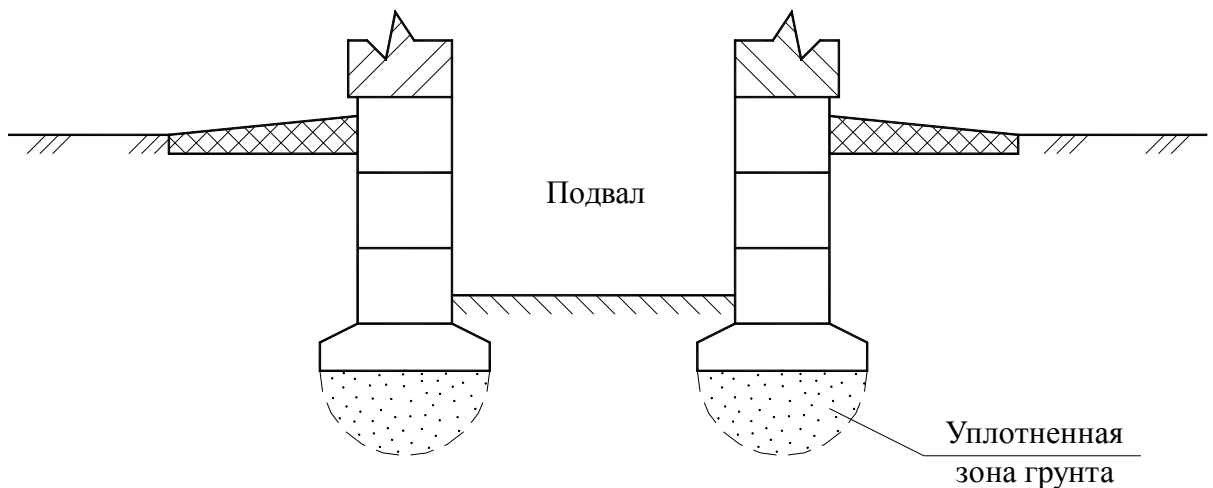


Рис. 57. Уплотнение грунта под ленточными фундаментами

Коэффициент фильтрации уплотнённого песчаного грунта можно определить по теоретической формуле И. Козени [338]:

$$k = k_0[(1+e_0)/(1+e)](e/e_0)^3 \quad (124)$$

или же по эмпирическим формулам: А. Казагранде [108; 280]

$$k = k_0(e/e_0)^2 \quad (125)$$

или К. Терцаги [108]

$$k = k_0 \left( \frac{n - 0,13}{n_0 - 0,13} \right)^2 \left( \frac{1 - n_0}{1 - n} \right)^{1/3}, \quad (126)$$

где  $n_0$  и  $n$  — коэффициенты пористости грунта соответственно в естественном залегании (до уплотнения) и после уплотнения.

Все три формулы по нашей проверке дают близкие значения уменьшения проницаемости песков с разбросом не более 3-7 %, поэтому можно использовать любую из них. Удобнее всего формула А. Казагранде (125).

Проницаемость песчаных грунтов вследствие уплотнения под ленточными фундаментами уменьшается максимум в 1,5-2 раза, что в сравнении с глинистыми грунтами значительно меньше, однако для вычисления положения УГВ может быть учтено в фильтрационных расчётах.

Пример 40. Коэффициент фильтрации уплотненного песка

Определим коэффициент фильтрации песка после уплотнения. Коэффициент фильтрации песка в естественном залегании  $29 \text{ м/сут}$ , а коэффициент пористости  $e_0 = 0,73$ . После уплотнения коэффициент пористости стал  $e = 0,62$ .

Находим по формуле (12) пористость песка до и после уплотнения:

$$n_0 = 0,73 / (1 + 0,73) = 0,422;$$

$$n = 0,62 / (1 + 0,62) = 0,383.$$

По формуле И. Козени (124):

$$k = 29[(1 + 0,73) / (1 + 0,62)](0,62 / 0,73)^3 = 19,0 \text{ м/сут};$$

по А. Казагранде (125):

$$k = 29(0,62 / 0,73)^2 = 20,9 \text{ м/сут};$$

по К. Терцаги (126):

$$k = 29 \left( \frac{0,383 - 0,13}{0,422 - 0,13} \right)^2 \left( \frac{1 - 0,422}{1 - 0,383} \right)^{1/3} = 21,3 \text{ м/сут}.$$

Таким образом, средний  $k = 20,4 \pm 1,23 \text{ м/сут}$ , а разброс значений  $k$  около 6 %. Коэффициент фильтрации песка уменьшился в 1,42 раза.

*Определение изменения проницаемости грунта под сплошными фундаментами.* В грунте оснований под сплошными фундаментами возникают дополнительные напряжения от веса зданий. Грунт уплотняется и его коэффициент фильтрации уменьшается. Это уменьшение происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. При подтоплении грунты насыщены водой, поэтому целесообразно применить теорию фильтрационной консолидации для определения изменения проницаемости грунта под сплошными фундаментами. Родоначальником этой теории является Карл Терцаги [351].

Самым простым случаем является одномерное уплотнение грунта. Оно возможно под центральной частью широких фундаментов при близком залегании кровли слабосжимаемого грунта (рис. 58) и оговорено в строительных нормах [235, с. 8 и 31]. В таком случае максимальный конечный коэффициент пористости сжимаемого грунта  $e_k$  толщиной  $z_c$  под фундаментом можно найти по простой формуле [53; 88; 141; 296]:

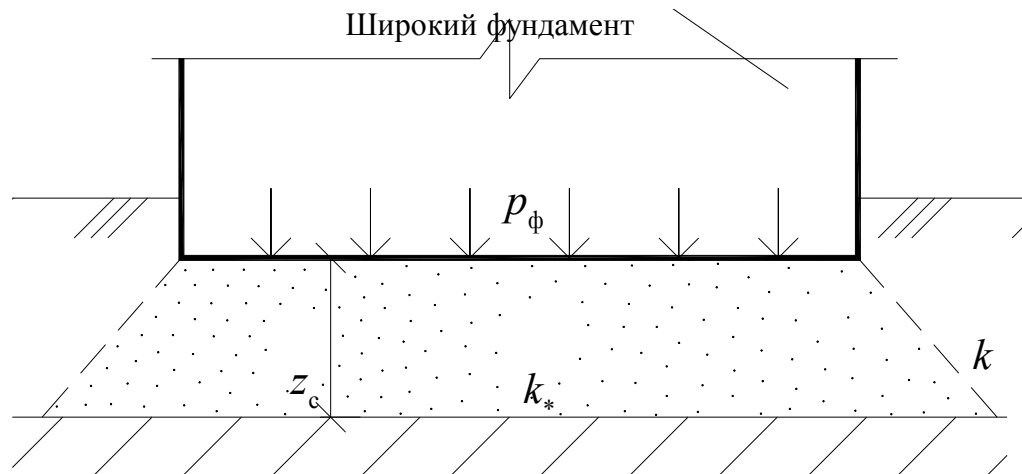


Рис. 58. Уплотнение грунта под широким фундаментом

$$e_k = e_0 - a_c p_\phi, \quad (127)$$

где  $e_0$  — начальный коэффициент пористости;  $a_c$  — коэффициент сжимаемости (уплотнения) грунта;  $p_\phi$  — давление от фундамента, соответствующее начальному поровому давлению  $p_0$  в теории фильтрационной консолидации. Отметим, что рассмотренный случай является предельным, так как соответствует известной схеме [296] мгновенного нагружения фундамента нагрузкой от здания или сооружения.

Конечное значение коэффициента фильтрации  $k_*$  уплотненного под фундаментом грунта при известном из изысканий коэффициенте фильтрации  $k$  в естественном залегании можно определить по формулам В.Н. Жиленкова (121) или Г.И. Черного (123) соответственно для случая статических или динамических нагрузок, действующих на фундамент.

Более сложный случай объемного уплотнения грунта наблюдается под сплошными фундаментами, имеющими конфигурацию в плане в виде полосы, круга или прямоугольника при условии глубокого залегания практически несжимаемого грунта. Соответственно это ленточные, круглые и прямоугольные в плане фундаменты. Под подошвой каждого из перечисленных фундаментов в первую очередь можно определить предельное значение уменьшения коэффициента фильтрации, используя интегральные формулы С.Д. Пуассона (S.D. Poisson, 1812) [14]. Отметим, что формулы известного французского ученого применяли Н.М. Герсегонов [53], В.А. Флорин [296] и др., получая их разными способами.

Начальное поровое давление  $p_0$  в грунтовой воде под ленточным фундаментом или дорогой на основе формулы Пуассона для полуплоскости (рис. 59) можно определить так [53; 296]:

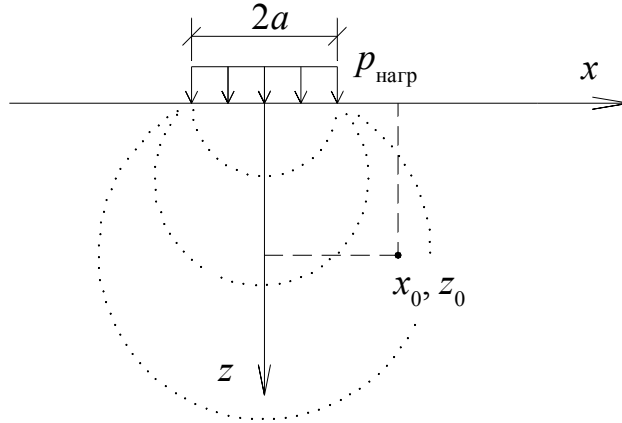


Рис. 59. Уплотнение грунта под ленточным фундаментом или дорогой

$$p_0 = \frac{p_{\text{нагр}}}{\pi} \left( \arctg \frac{x_0 + a}{z_0} - \arctg \frac{x_0 - a}{z_0} \right), \quad (128)$$

где  $p_{\text{нагр}}$  — давление от внешней нагрузки;  $2a$  — ширина полосы;  $x_0$  и  $z_0$  — декартовы координаты точки грунта, где определяют начальное поровое давление (см. рис. 59).

Коэффициент фильтрации уплотненного грунта в точке с координатами  $x_0$  и  $z_0$  при найденном по (128) поровом давлении можно найти по формуле (127), принимая в ней вместо  $p_{\text{ф}}$  величину  $p_0$ .

Начальное поровое давление  $p_0$  в грунтовой воде под круглым в плане фундаментом на основе интеграла Пуассона [14] для полупространства (рис. 60) можно определить по формуле

$$p_0 = \frac{p_{\text{нагр}} z_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r \partial r \partial \varphi}{[r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \varphi + z_0^2]^{3/2}}, \quad (129)$$

где  $p_{\text{нагр}}$  — давление от внешней нагрузки;  $R$  — радиус фундамента;  $r_0$  и  $z_0$  — цилиндрические координаты точки грунта, где определяют начальное поровое давление;  $r$  и  $\varphi$  — переменные интегрирования.

Начальное поровое давление  $p_0$  в грунтовой воде под прямоугольным в плане фундаментом с помощью интеграла Пуассона [14] для полупространства (рис. 61) можно определить так:

$$p_0 = \frac{p_{\text{нагр}} z_0}{2\pi} \int_{-b}^{+b} \int_{-a}^{+a} \frac{\partial x \partial y}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2]^{3/2}}, \quad (130)$$



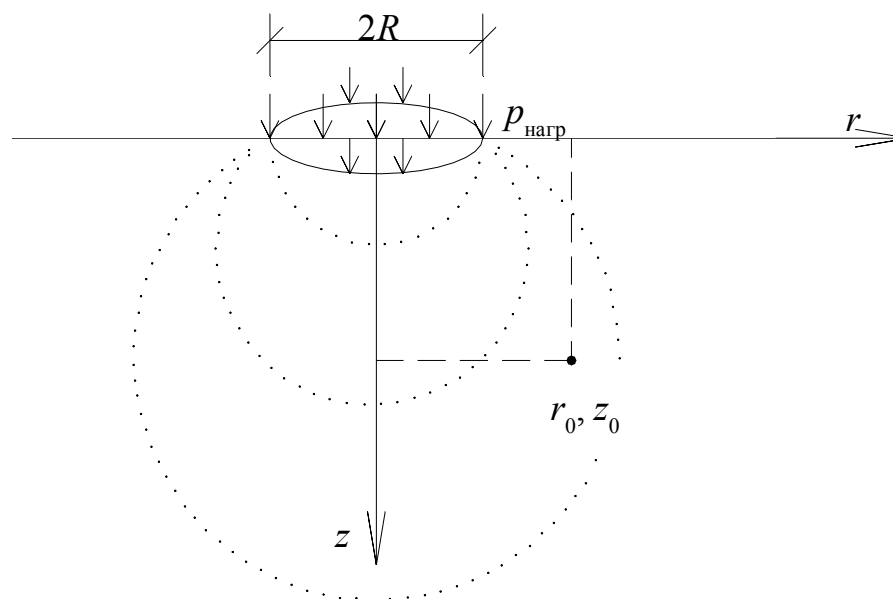


Рис. 60. Уплотнение грунта под круглым в плане фундаментом

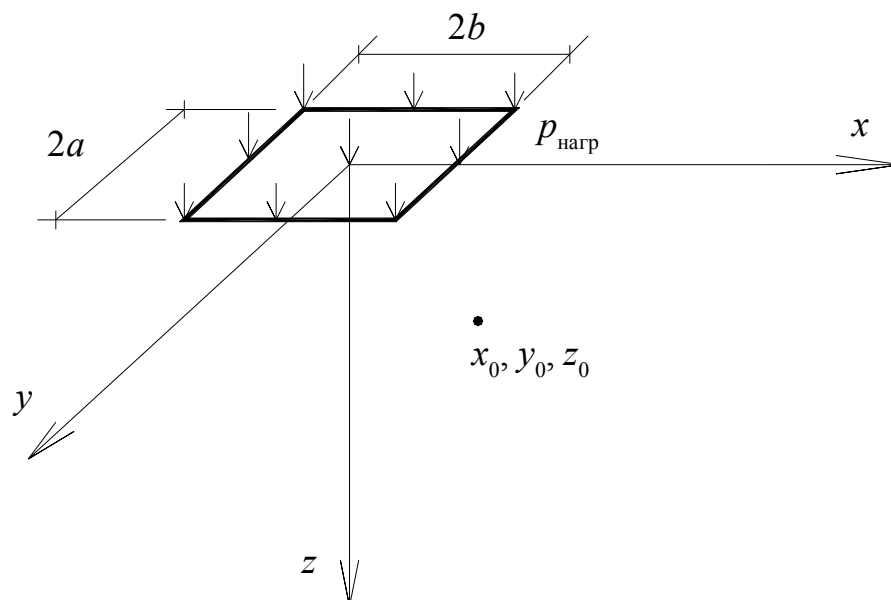


Рис. 61. Уплотнение грунта  
под прямоугольным в плане фундаментом

где  $p_{\text{нагр}}$  — давление от внешней нагрузки;  $2a$  и  $2b$  — длина и ширина фундамента;  $x_0, y_0$  и  $z_0$  — декартовы координаты точки грунта, где определяют начальное поровое давление;  $x, y$  и  $z$  — переменные интегрирования.

Расчет интегралов в формулах (129) и (130) легко реализуется в компьютерной системе MathCAD [224]. Найденные поровые давления  $p_0$  в конкретных точках грунта нужно использовать в формуле (127), принимая в ней вместо  $p_\phi$  величину  $p_0$ . Таким образом можно найти коэффициенты пористости и затем для указанных случаев можно определить предельные значения ко-

эффицентов фильтрации уплотненного грунта в основаниях зданий и сооружений, как было сказано выше, по формулам В.Н. Жиленкова (121) или Г.И. Черного (123).

В более сложных случаях грунтовых оснований и конфигураций фундаментов раньше обычно прибегали к определению начального распределения поровых давлений  $p_0$  с помощью метода ЭГДА [295; 296; 297]. Однако в настоящее время начальное распределение  $p_0$  в грунтовой воде под фундаментами можно гораздо проще и точнее найти с помощью МКР-Excel (см. § 26, пример 62). Кроме того, сложным, вернее непреодолимым для аналитического расчета, является случай многомерной фильтрационной консолидации во времени, когда коэффициенты фильтрации под зданиями и сооружениями уменьшаются постепенно, и нагрузка от здания увеличивается постепенно. Этот реальный сложный случай нестационарного уплотнения грунта тоже можно лишь промоделировать, что рекомендуется выполнять с помощью МКР-Excel.

*Определение изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства.* В 1970-х годах в научной литературе по проблеме подтопления подземными водами территорий застройки появились предложения о необходимости учета барражного эффекта свайных фундаментов — влияния свайных оснований на динамику процессов подтопления. Одну из первых попыток количественно учесть это влияние предприняли специалисты из Гонконга в 1982 г. [344].

Автор исследовал основные особенности влияния свайных фундаментов на процессы подтопления застраиваемых территорий [262; 263]. Результаты, значительно дополненные, в том числе в [251; 258], приведены ниже.

В процессе инженерных изысканий перед строительством объекта немаловажно получить информацию о возможном изменении проницаемости грунта после забивки свай. Это можно сделать по результатам динамических испытаний свай на несущую способность в водонасыщенных глинистых грунтах.

Речь идет об использовании связи порового давления в грунтовой воде и несущей способности свай при ее «отдыхе» после забивки. Попутное использование традиционного метода испытаний свай для оценки изменения проницаемости присвайного грунта выгодно отличается от дорогостоящих фильтрационных исследований этого грунта, так как при последних требуется либо установка пьезометров, либо присвайное бурение и др.

В условиях обводненных слабых грунтов свайные фундаменты стремятся доводить до плотных пород, перерезая водонасыщенные покровные отложения, с целью обеспечения наибольшей несущей способности свай. При заглублении нижнего конца свай в плотные водоупорные породы несущая

способность под острием практически не меняется во времени и увеличение ее после забивки идет по боковой поверхности сваи. Этот известный факт объясняют явлениями тиксотропного упрочнения грунта присвайной зоны и рассасыванием избыточного порового давления в грунтовой воде, окружающей сваю [21; 22; 165].

Несущую способность сваи в период ее «отдыха» после забивки можно выразить в виде

$$P_t = P_0 + \Delta P_t, \quad (131)$$

где  $P_0$  — начальная несущая способность сваи сразу после забивки;  $\Delta P_t$  — приращение несущей способности в момент времени  $t$  после забивки. По окончании «отдыха» величина  $\Delta P_t$  увеличивается до некоторого конечного приращения несущей способности сваи  $\Delta P_k$ , а несущая способность сваи  $P_t$  — до полной несущей способности  $P_n$ .

При забивке свая отесняет в стороны грунт и вокруг нее формируется зона максимально уплотненного грунта радиусом [61]

$$r_c = \sqrt{2} R_{\text{бр}}, \quad (132)$$

где  $R_{\text{бр}}$  — радиус круга, равновеликого площади брутто поперечного сечения сваи.

В процессе забивки давление от вытесняемого сваем грунта значительно превышает его структурную прочность и поэтому можно принять допущение о мгновенном повышении порового давления в грунтовой массе, не содержащей газа. Тогда в соответствии с теорией порового давления К. Терцаги [279] сопротивление сваи по ее боковой поверхности после забивки можно записать как

$$f_t = (\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r, \quad (133)$$

где  $\sigma_r$  — нормальное давление грунта на боковую поверхность сваи;  $p_t$  — избыточное поровое давление на боковой поверхности сваи после забивки в момент времени  $t$  (величина  $p_t$  по окончании «отдыха» сваи уменьшается до нуля);  $\varphi_r$  — угол внутреннего трения грунта;  $C_r$  — сцепление грунта.

Приращение сопротивления сваи по ее боковой поверхности с учетом (133) запишем так:

$$\Delta f_t = [(\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r] - [(\sigma_r - p_0) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r] = (\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r, \quad (134)$$

где  $p_0$  — величина избыточного порового давления сразу после забивки сваи в грунте, примыкающем к боковой поверхности сваи.

С учетом (134) вместо (131) получим

$$P_t = P_0 + ul \Delta f_t = P_0 + ul(\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r, \quad (135)$$

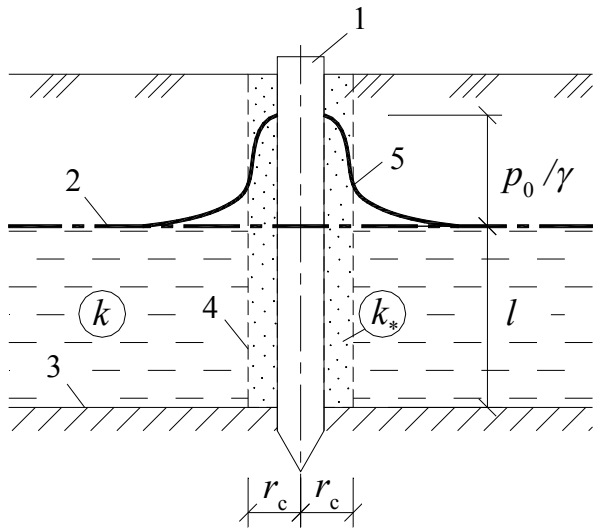


Рис. 62. Повышение порового давления при забивке свай в водонасыщенный грунт: 1 — свая; 2 — естественный УГВ; 3 — водоупор; 4 — максимально уплотненная зона грунта; 5 — пьезометрическая поверхность избыточных поровых давлений

где  $u$  — периметр свай;  $l$  — мощность водонасыщенного слоя грунта, примыкающего к боковой поверхности свай (рис. 62).

Наблюдения [165] показывают, что при забивке свай в водонасыщенные грунты избыточное поровое давление достигает наибольших значений в зоне максимального уплотнения грунта, а вне ее быстро падает с удалением от свай. Эти обстоятельства позволяют схематизировать начальное распределение избыточных поровых давлений у свай в виде купола, прямоугольного в разрезе, с пьезометрической высотой  $p_0/\gamma$  ( $\gamma$  — удельный вес воды), в плано-во-неоднородном пласте. При этом вначале весь купол находится в пределах зоны максимального уплотнения грунта с коэффициентом фильтрации  $k_*$ , значительно меньшим коэффициента фильтрации грунта в естественном залегании  $k$  (см. рис. 62). Коэффициент  $k$  известен из изысканий.

Для ряда свай приближенно можно считать, что растекание куполов происходит только в направлении, перпендикулярном оси ряда. Тогда для описания процесса рассасывания избыточного порового давления в присвайном грунте можно воспользоваться зависимостью для растекания вытянутого в плане купола грунтовых вод в плано-во-неоднородном пласте [263]. Отождествляя опускание центра купола с уменьшением избыточного порового давления на боковой поверхности свай в процессе ее «отдыха», формулу (20) из [263] можно записать для давлений так (с допущением, что коэффициент водоотдачи  $\mu \approx \text{const}$ ):

$$p_t = p_0 \left[ 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1 + 2n}{\sqrt{\eta \tau}} \right];$$

$$\tau = 4a_y t / L^2; \eta = k_*/k; \alpha = (\sqrt{\eta} - 1) / (\sqrt{\eta} + 1), \quad (136)$$

где  $a_y$  — уровнепроводность водоносного пласта;  $\eta$  — относительная проницаемость грунта присвайной зоны;  $L = r_c$  — полуширина купола, равная по величине радиусу сваи с максимально уплотненным грунтом.

С учетом (136), формула (135) после преобразований принимает вид

$$P_t = P_0 + n_1 \Delta P_k + \frac{2n_2 \Delta P_k}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1+2n}{\sqrt{\eta\tau}}, \quad (137)$$

где  $n_1 = 0,3$  и  $n_2 = 0,7$  — коэффициенты, учитывающие долю тиксотропии и порового давления в увеличении несущей способности сваи за период ее «отдыха» [22], причем предполагается, что к моменту времени  $t$  несущая способность сваи за счет тиксотропии уже набрана.

При введении безразмерной величины относительного увеличения несущей способности сваи

$$P(\tau, \eta) = (P_t - P_0 + n_1 \Delta P_k) / (n_2 \Delta P_k) \quad (138)$$

формула (137) переписывается в виде

$$P(\tau, \eta) = \frac{2}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1+2n}{\sqrt{\eta\tau}}. \quad (139)$$

В табл. 6 представлены некоторые значения  $P(\tau, \eta)$ , вычисленные для разных  $\eta$ , и на рис. 63 построено семейство кривых зависимости (139).

Пользуясь результатами динамических испытаний свай на несущую способность и графиком на рис. 63, можно приближенно оценить относительную проницаемость  $\eta$  максимально уплотненной присвайной зоны грунта. Для этого, зная из испытаний

Таблица 6

**Относительное увеличение несущей способности сваи  $P(\tau, \eta)$  после забивки в водонасыщенные грунты**

$\eta \backslash \tau$	10	50	100	250	500
1	0,6547	0,8415	0,8875	0,9287	0,9496
1/10	0,2390	0,7559	0,8630	0,9238	0,9480
1/20	0,0744	0,5990	0,8026	0,9156	0,9458
1/30	0,0242	0,4611	0,7183	0,9013	0,9432
1/40	0,0081	0,3554	0,6317	0,8788	0,9395

$P_0, P_t, \Delta P_k$ , находят  $P(\tau, \eta)$  по (138). Далее эта точка наносится на график на рис. 63. При попадании точки в интервал  $1 < \eta < 1/40$  значение  $\eta$  определяют интерполяцией. Если точка выпала ниже кривой  $\eta = 1/40$  или на ней, то в соответствии с критерием (7) из [263] при расчетах барражного эффекта

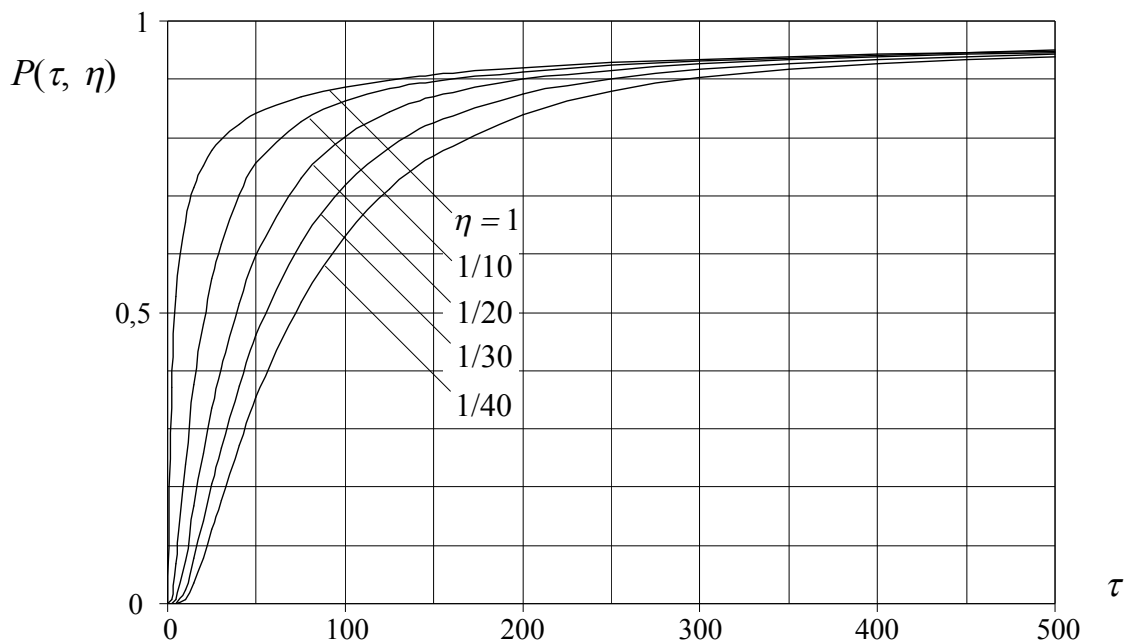


Рис. 63. Зависимость относительной проницаемости максимально уплотненной присвайной зоны грунта при увеличении несущей способности сваи в водонасыщенных грунтах с течением времени

свайных фундаментов допустимо считать присвайную зону максимального уплотнения грунта радиусом  $r_c$  полностью непроницаемой ( $\eta = 0$ ).

Необходимо отметить, что с точки зрения оценки проницаемости максимально уплотненной присвайной зоны грунта дополнительное испытание сваи для определения  $P_t$  лучше всего проводить сразу после завершения процессов тиксотропии, то есть примерно через 8-10 часов после забивки сваи. Для реальных грунтов это соответствует безразмерному времени  $\tau = 75-150$  и, таким образом, используются наиболее представительные участки графиков на рис. 63.

Проанализируем этот процесс изменения проницаемости присвайного глинистого грунта, опираясь на теории упругости и пластичности.

В рамках теории упругости уплотнение грунта забивной свайей было рассмотрено М.И. Горбуновым-Посадовым [61]. Он получил решения для напряжений и перемещений в присвайном грунте. Вокруг сваи была выделена зона вытесненного грунта радиусом  $R_1$ . С учетом уплотнения грунта точное значение

$$R_1 = 4R_{бр}/3. \quad (140)$$

Если бы вытесненный грунт не уплотнился, то он бы занял объем с внешним радиусом по (132), несколько большим  $R_1$ .

Таким образом, вытесненный свайей грунт, перемятый и уплотненный, согласно решению (140), уменьшился в объеме ( $R_1 < r_c$ ). Естественно счи-

тать, что это уплотнение идет за счет уменьшения пористости грунта, а это в свою очередь снижает его проницаемость. Автор работы [61] ограничился определением перемещений двух точек вытесняемого грунта. Первая — первоначально расположенная вдоль оси забиваемой сваи. Вторая — в плоскости боковой поверхности сваи. Учитывая факт интенсивного перемещения и сдвига вытесняемого грунта, можно попытаться определить усредненное значение снижения его проницаемости  $\eta$ .

Объемную деформацию грунта в предположении несжимаемости его минеральных частиц можно записать в виде

$$\Theta = 1 - n_*/n, \quad (141)$$

где  $n$  — начальная пористость;  $n_*$  — пористость уплотненного грунта.

При допущении равномерного уплотнения грунта, вытесненного свайей, отношение  $n_*/n$  можно приравнять отношению площадей колец деформированного и недеформированного грунта, окружающего сваю, с радиусами по формулам (140) и (132). Тогда в пределах радиуса  $R_1$  объемная деформация грунта

$$\Theta = 1 - \frac{\pi(R_1^2 - R_{\text{ср}}^2)}{\pi(r_c^2 - R_{\text{ср}}^2)} = 0,222. \quad (142)$$

Снижение проницаемости уплотненного грунта  $\eta$  определим для случая водонасыщенных глинистых грунтов. Эмпирическую зависимость для этих грунтов, уплотняющихся при динамических воздействиях, получил Г.И. Черный [307]:

$$\eta = \exp(-19\Theta). \quad (143)$$

При  $\Theta = 0,222$  имеем по (143)  $\eta = 1/68$  (проницаемость снижается в 68 раз). Учитывая наш критерий  $\eta = 1/40$  [263], зону радиусом  $R_1$  по (140) можно считать условно водонепроницаемой в задачах, связанных с барражным эффектом свайных фундаментов. К такому выводу приходим, используя решение М.И. Горбунова-Посадова [61] об уплотнении грунта в рамках теории упругости. Но в [61] было отмечено, что вытесняемый свайей грунт испытывает и пластические деформации.

Обратимся теперь к теории пластичности и в ее рамках оценим рассматриваемое явление уплотнения грунта около сваи. Поскольку задача является плоской осесимметричной, то в допущениях теории пластичности аналогичным процессом является расширение кругового отверстия в бесконечной пластинке. Воспользуемся решением В.В. Соколовского [244], применив его для свай в грунте.

Согласно этому решению, радиус уплотненной зоны грунта

$$R_{\pi} = 2,07R_{\text{бр}} \approx 2R_{\text{бр}}. \quad (144)$$

В этой зоне в решении для пластинки [244] считается, что ее толщина  $h$  изменяется от максимального значения на контуре отверстия до постоянной первоначальной толщины  $h_0$  на границе зоны пластической деформации. Характер изменения  $h$  в зоне деформации имеет сложную интегральную зависимость и протабулирован численно в [244]. Переосмысливая деформацию пластинки на деформацию присвайного грунта, будем считать, как и в предыдущей теории упругости, что уплотнение грунта происходит за счет уменьшения порового пространства. Тогда в этом случае нетрудно убедиться, что

$$h_0/h = n_*/n. \quad (145)$$

Используя зависимость (143) Г.И. Черного [307] и данные табл. 1 из книги В.В. Соколовского [244, с. 521], составим табл. 7, в которой  $r$  — радиус в полярной системе координат.

Таблица 7

**Уплотнение присвайного грунта и снижение его проницаемости, согласно теории пластичности**

$r/R_{\text{бр}}$	1,0	1,2	4/3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
$n_*/n$	0,277	0,613	0,712	0,759	0,814	0,867	0,945	1
$\Theta$	0,723	0,387	0,288	0,241	0,186	0,133	0,055	0
$\eta$	$10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	0,029	0,080	0,350	1
$1/\eta$	$10^6$	1667	238	100	34,5	12,5	2,90	1

Анализируя таблицу, приходим к выводу, что решение задачи в пластической постановке дает значения снижения проницаемости присвайного грунта, сопоставимые с результатами упругой задачи. Кроме того, по табл. 7 можно заметить резкое уменьшение проницаемости по направлению к свае.

Таким образом, результаты анализа изменения проницаемости присвайного глинистого грунта в рамках обеих теорий (упругости и пластичности) показали, что проницаемость грунта в пределах радиуса  $r_c$  по (132) уменьшается более чем в 40 раз, поэтому его можно считать водонепроницаемым в фильтрационных расчетах и моделях, связанных с защитой от подтопления в городском строительстве. Рассмотренное уплотнение и снижение проницаемости присвайного грунта относится к процессу строительства.



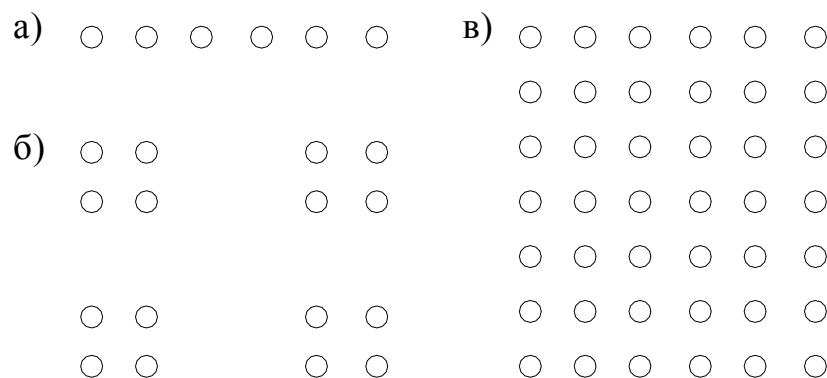


Рис. 64. Схемы расположения свай в плане

Свайные фундаменты уменьшают проницаемость грунтов несколько иначе в сравнении с ленточными. Влияние свай проявляется различно в связных (глинистых или пылевато-глинистых) и несвязных (песчаных) грунтах [262; 263].

В плане сваи размещают в виде свайных рядов, кустов и сплошных свайных полей (рис. 64, а, б, в соответственно).

Из всего числа применяемых в России свай 90-95 % приходится на забивные железобетонные сваи квадратного сечения [176]. При забивке такие сваи уплотняют окружающий грунт. Размер и характер зоны уплотнения около сваи неодинаков в глинистых и песчаных грунтах.

Свайный ряд в глинистых грунтах для фильтрационных расчётов целесообразно заменять условной завесой с уменьшенным коэффициентом фильтрации, учитывающим обтекание круглоцилиндрических тел. Глинистые (пылевато-глинистые) грунты уплотняются непосредственно вблизи сваи (рис. 65) в зоне радиусом  $r_c$ , который можно найти по формуле (132).

В пределах зоны радиусом  $r_c$  коэффициент фильтрации грунта можно считать нулевым, то есть считать сваю с окружающим уплотнённым глинистым грунтом водонепроницаемым цилиндрическим телом с точки зрения расчётов подтопления [258].

На расстоянии от центральной оси сваи больше, чем  $r_c$ , грунт тоже уплотняется и его коэффициент фильтрации уменьшается. По табл. 7 можно заметить, что, согласно теории пластичности, такое уменьшение довольно быстро затухает уже на расстоянии двойного радиуса. Дальнейшее влияние здания на проницаемость грунтов основания проявляется передачей статической техногенной нагрузки посредством фундаментов. Это снижение проницаемости можно промоделировать с помощью МКР-Excel.

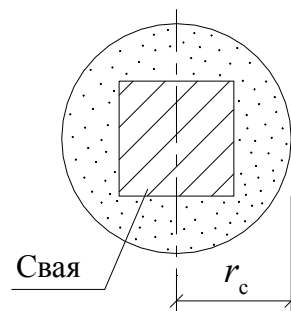


Рис. 65. Свая с зоной максимально уплотненного грунта

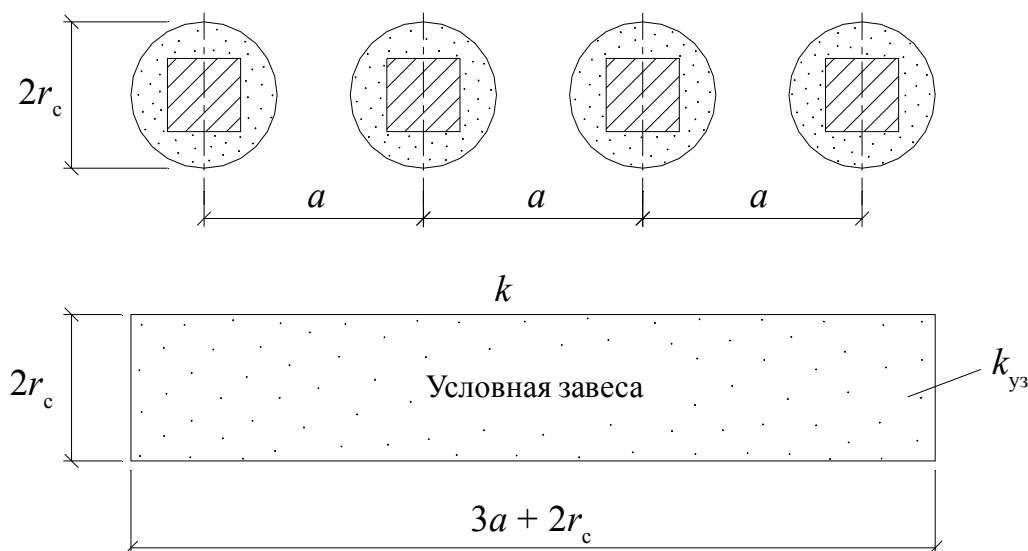


Рис. 66. К определению коэффициента фильтрации условной завесы  $k_{uz}$  в глинистом грунте

#### Пример 41. Зона максимально уплотненного грунта около свай

Определим зону максимально уплотненного грунта около свай радиусом  $r_c$  (см. рис. 65) для свай с поперечным сечением  $40 \times 40 \text{ см}^2$ . Вначале находим радиус круга, равновеликого площади брутто поперечного сечения свай:

$$R_{\text{бр}} = \sqrt{40 \cdot 40 / \pi} = 22,6 \text{ см.}$$

Радиус зоны максимально уплотненного грунта около свай определяем по формуле (132)

$$r_c = \sqrt{2} \cdot 22,6 = 32 \text{ см.}$$

Таким образом, при расчётах подтопления сваю в глинистом грунте надо представлять как вертикальное цилиндрическое водоупорное тело. При близком расположении свай в ряду получается частокол (рис. 66), который может вызвать подпор грунтовых вод.

Свайный ряд в глинистых грунтах для фильтрационных расчётов целесообразно заменять условной завесой с уменьшенным коэффициентом фильтрации, учитывающим обтекание круглоцилиндрических тел [262; 263]:

$$k_{uz} = k \left( 1 + \frac{a}{\pi r_c} \text{sh}^2 \frac{\pi r_c}{a} \right)^{-1}, \quad (146)$$

где  $a$  — шаг свай в ряду (см. рис. 66);  $k$  — коэффициент фильтрации грунта в естественном залегании;  $r_c$  — по формуле (132).

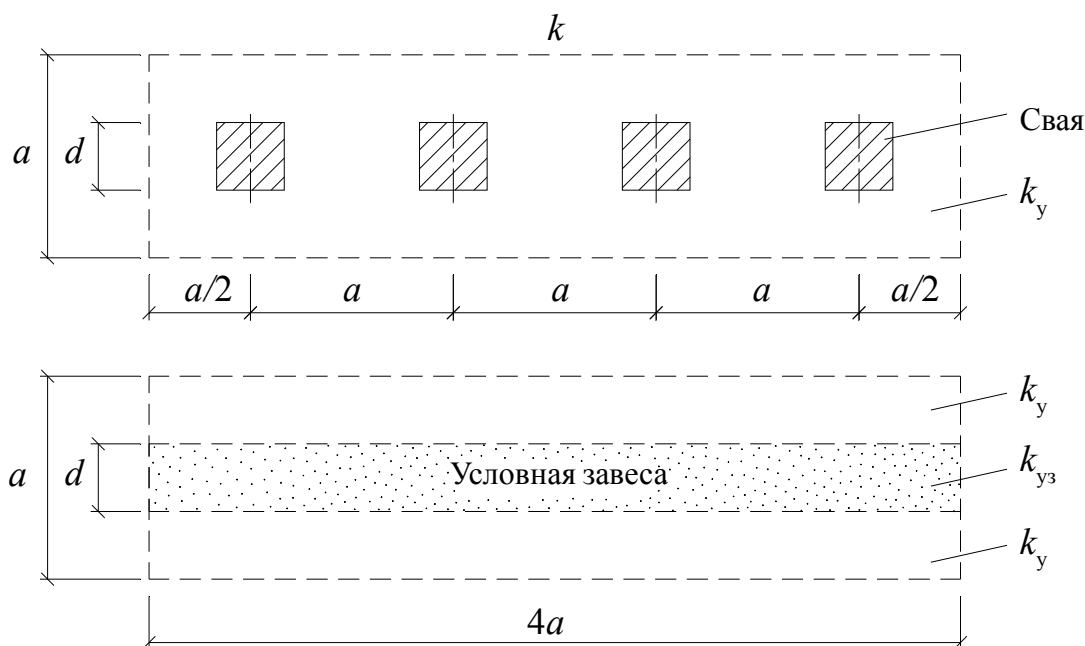


Рис. 67. К определению коэффициентов фильтрации условной завесы  $k_y$  и  $k_{yz}$  в песчаном грунте

В песчаных грунтах (рис. 67) уплотнение не вызывает резкого уменьшения проницаемости, поэтому допустимо считать, что в пространстве между соседними забитыми сваями грунт уплотняется равномерно с некоторого начального естественного значения пористости  $n_0$  до конечного  $n$  [262; 263]:

$$n = (n_0 - N_c F_c / F) / (1 - N_c F_c / F), \quad (147)$$

где  $N_c$  — число свай в ряду;  $F_c$  — площадь поперечного сечения сваи;  $F$  — площадь полосы уплотнения грунта шириной  $a$  (см. рис. 67).

Коэффициент фильтрации уплотнённого песчаного грунта  $k_y$  в полосе шириной  $a$  (см. рис. 67) можно определить по формуле И. Козени (124), А. Казагранде (125) или К. Терцаги (126) по значениям пористостей: естественной  $n_0$  и найденной  $n$ .

Кроме того, свайный ряд в песчаных грунтах нужно заменить условной завесой (см. рис. 67) с уменьшенным коэффициентом фильтрации  $k_{yz}$ , учитывающим обтекание свай квадратного сечения [262; 263]:

$$k_{yz} = k_y \left[ (1 - d/a)^{-1} - \frac{2a}{\pi d} \ln \sin \frac{\pi}{2} (1 - d/a) \right]^{-1}, \quad (148)$$

где  $d$  — размер поперечного сечения сваи (см. рис. 67); остальные обозначения оговорены выше.

Таким образом, сваи в глинистых и песчаных грунтах можно свести к условным завесам с некоторыми коэффициентами фильтрации  $k_{уз}$  и  $k_y$ , меньшими естественного  $k$ . Затем можно провести расчёт с такой завесой или далее осреднить проницаемости, например, найти коэффициент фильтрации всего свайного поля (см. рис. 64). При этом не следует забывать, что чем больше мы осредняем (схематизируем) свойства объекта, тем существеннее огрубляем расчёт УГВ. Моделирование требует меньшей схематизации.

Все приведенные зависимости охватывают изменение проницаемости в основном в период строительства. Однако уплотнение грунта и уменьшение его коэффициентов фильтрации под зданиями и сооружениями продолжает происходить и в последующий период эксплуатации строительных объектов.

*Определение изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий.* Дополнительно к уплотнению присвайного грунта в процессе строительства (по причине забивки свай) добавляется влияние веса строящегося здания, так как свайный фундамент передает нагрузку от здания на грунт основания. Поэтому грунт еще более уплотняется и проницаемость его уменьшается при эксплуатации здания. Рассмотрим, как можно определить это уменьшение проницаемости грунта.

Уплотнение грунтов под сплошным фундаментом и свайным полем описано К. Терцаги. Сравнение вертикальных напряжений, возникающих под зданиями на сплошном фундаменте и на сваях показано на рис. 68 [280].

Распределение вертикальных напряжений под фундаментами, изображенное на рис. 68,а,б, свидетельствует о том, что следует ожидать уплотнение грунта, которое уменьшит его проницаемость. Отметим, что в п. 6.1 СНиП «Свайные фундаменты» [236], при расчете оснований по деформациям, низ условного фундамента рекомендовано проводить через нижние концы висячих свай.

Однако с точки зрения изменения проницаемости в пределах массива грунта со сваями более точной является гипотеза К. Терцаги [280]. Он рекомендовал приближенный прием для расчета предельных осадок свайных фундаментов: на уровне нижней трети длины свай рассчитывать консолидацию «... так, как если бы здание опиралось на этой отметке на гибкую плиту...» [280]. По данным Терцаги, такой прием хорошо подтвердился на практике, особенно для широких свайных полей (см. рис. 68,б). При этом необходимо учитывать вынутый из котлована грунт, если здание с подвалом.

Используем подобный прием для оценки изменения проницаемости грунта в пределах свайного поля при эксплуатации здания. Уплотнение грунта рассмотрим согласно теории фильтрационной консолидации (теории порового

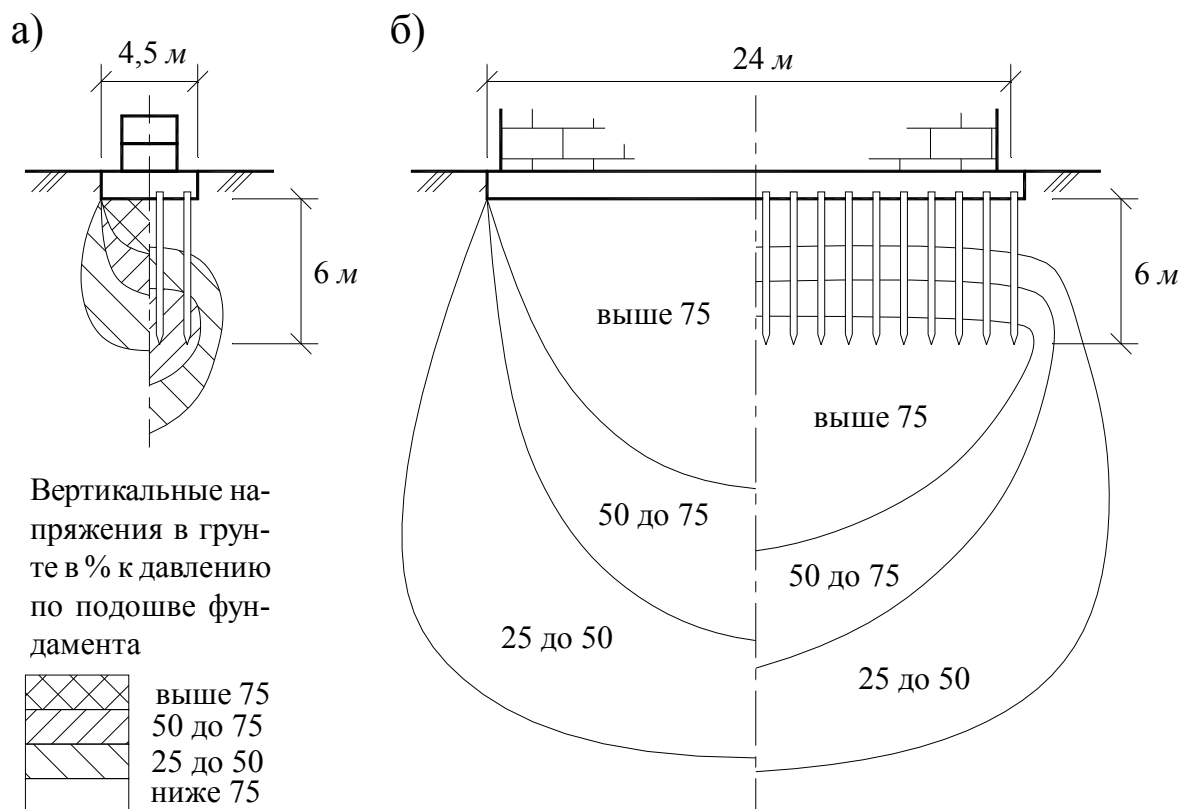


Рис. 68. Вертикальное давление в грунте под фундаментами на висячих сваях по К. Терцаги [280]: а — при небольшой ширине фундамента по сравнению с длиной свай; б — при большой ширине фундамента

давления) [279], которая была использована нами для изучения процессов при забивке свай.

В плане свайное поле можно схематизировать вытянутой полосой, прямоугольником (квадратом) или кругом.

В случае вытянутого здания на сваях имеем свайное поле — полосу. Проведем мысленно на глубине одной трети от низа свай подошву условного сплошного фундамента шириной  $2a$ . Аналогично можно ввести условный сплошной фундамент (см. рис. 68) для прямоугольного или круглого в плане свайного поля. Далее можно применить интегралы Пуассона (128) – (130). Определив по ним начальное распределение порового давления, можно по формуле теории фильтрационной консолидации (127) найти поле коэффициентов пористости, а по (121) — поле коэффициентов фильтрации уплотненного в процессе эксплуатации здания грунта. Эти значения проницаемости грунта основания будут предельными во времени.

Более сложные случаи неоднородных грунтов под зданиями, для сложной плановой конфигурации зданий и т.д. следует моделировать.

## § 16. Прогнозы подтопления в городском строительстве

Основные разновидности прогнозов подтопления перечислены в § 12. Собственно прогнозу предшествует схематизация, которой подвергаются природные и техногенные условия объекта защиты от подтопления. Прогнозные расчёты по формулам проводят для соответствующих расчётных схем — идеализированных (упрощённых) объектов, которые называются областью фильтрации [12].

Схематизации подвергаются: геометрия фильтрационных потоков; фактор времени; коэффициенты фильтрации и водоотдачи. При этом по возможности стремятся использовать принцип суперпозиции решений, предложенный в теории фильтрации Н.Е. Жуковским [82]. Он выражается в раздельном решении задач от разных факторов и последующем суммировании изменения напоров. Однако этот принцип пригоден лишь для задач в линейной постановке. Например, для грунтовых вод суперпозиция решений применима, если изменение напоров не превышает 10-25 % мощности водоносного пласта [6; 7; 49; 316] и 10 % длины области фильтрации по горизонтали [156; 208].

Уровень грунтовых вод (УГВ) в некоторых случаях может почти равномерно подниматься на территории застройки под влиянием дополнительной инфильтрации влаги в грунт вследствие нарушения городом естественного водного баланса грунтов.

*Прогноз равномерного подъема УГВ.* Это самый простой прогноз подтопления, наиболее идеализированный и приближенный. Его применяют для первоначальных расчетов по методу аналогий. Суть его состоит в том, что подъем начального горизонтального УГВ (естественного УГВ) рассчитывается при действии постоянной во времени и пространстве дополнительной инфильтрации влаги. При этом считают, что никакого бокового оттока нет. Однако вертикальное перетекание в нижележащий пласт может иметь место. Задачи подобного рода рассматривали Н.Н. Биндеман, В.С. Усенко, П.Я. Полубаринова-Кочина [200].

При прогнозе без перетекания в нижележащий пласт подъём УГВ  $\Delta h$  (рис. 69) на момент времени  $t$  можно найти по простейшей формуле [178, с. 147]:

$$\Delta h = \omega t / \mu_n, \quad (149)$$

где  $\omega$  — дополнительная инфильтрация влаги, м/сут;  $\mu_n$  — недостаток насыщения.

Величина дополнительной инфильтрации влаги  $\omega$ , поступающей на поверхность УГВ, надежно может быть определена на основе режимных наблюдений на территории застройки путем последующего решения обратных

задач [208] или имитационного моделирования фильтрации. Методика определения  $\omega$  аналитическим способом приведена в [208]. Имитационное моделирование по определению  $\omega$  может быть проведено с помощью МКР-Excel. Отметим, что И.С. Пашковский [316] для орошаемых территорий разработал методику определения  $\omega$  с помощью геофильтрационных моделей системы «зона аэрации — грунтовые воды». В случае отсутствия режимных наблюдений величину  $\omega$  для городских территорий можно определить методом аналогий (табл. 8). Обобщение многочисленных опубликованных натурных обследований показало, что на городских территориях величина  $\omega$  обычно находится в пределах от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$  м/сут [208]. Зоны увлажнения см. на рис. 70.

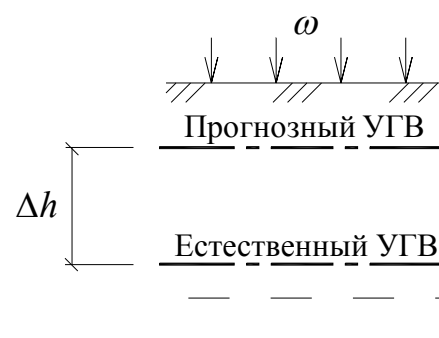


Рис. 69. Прогноз равномерного подъема УГВ

Таблица 8

**Среднегодовая величина дополнительной инфильтрации  $\omega$ , м/сут,  
в зависимости от влажности климата [208]**

Застройка	Зона недостаточного увлажнения	Зона неустойчивого увлажнения	Зона избыточного увлажнения
Малоэтажная	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Многоэтажная	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Индивидуальная	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
Парковая зона	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Город в целом	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$

Величину техногенного дополнительного инфильтрационного питания  $\omega$  в условиях конкретного города можно откорректировать с учетом интенсивности испарения влаги с уровня грунтовых вод  $\varepsilon$ . Для этого можно использовать дифференцированную методику, изложенную в § 2. Результирующее значение модуля питания грунтовых вод на территории застройки выразится как разность между  $\omega$  и  $\varepsilon$ . Летом на открытых площадках модуль питания может принимать отрицательные значения, особенно если УГВ поднялся близко к поверхности земли. Тогда процесс подтопления сезонно приостановится. Однако в стесненных местах застройки, например, с северной стороны домов, во дворах замкнутого «колодезного» типа, даже летом, в условиях жаркого сухого климата, возможен подъем УГВ.

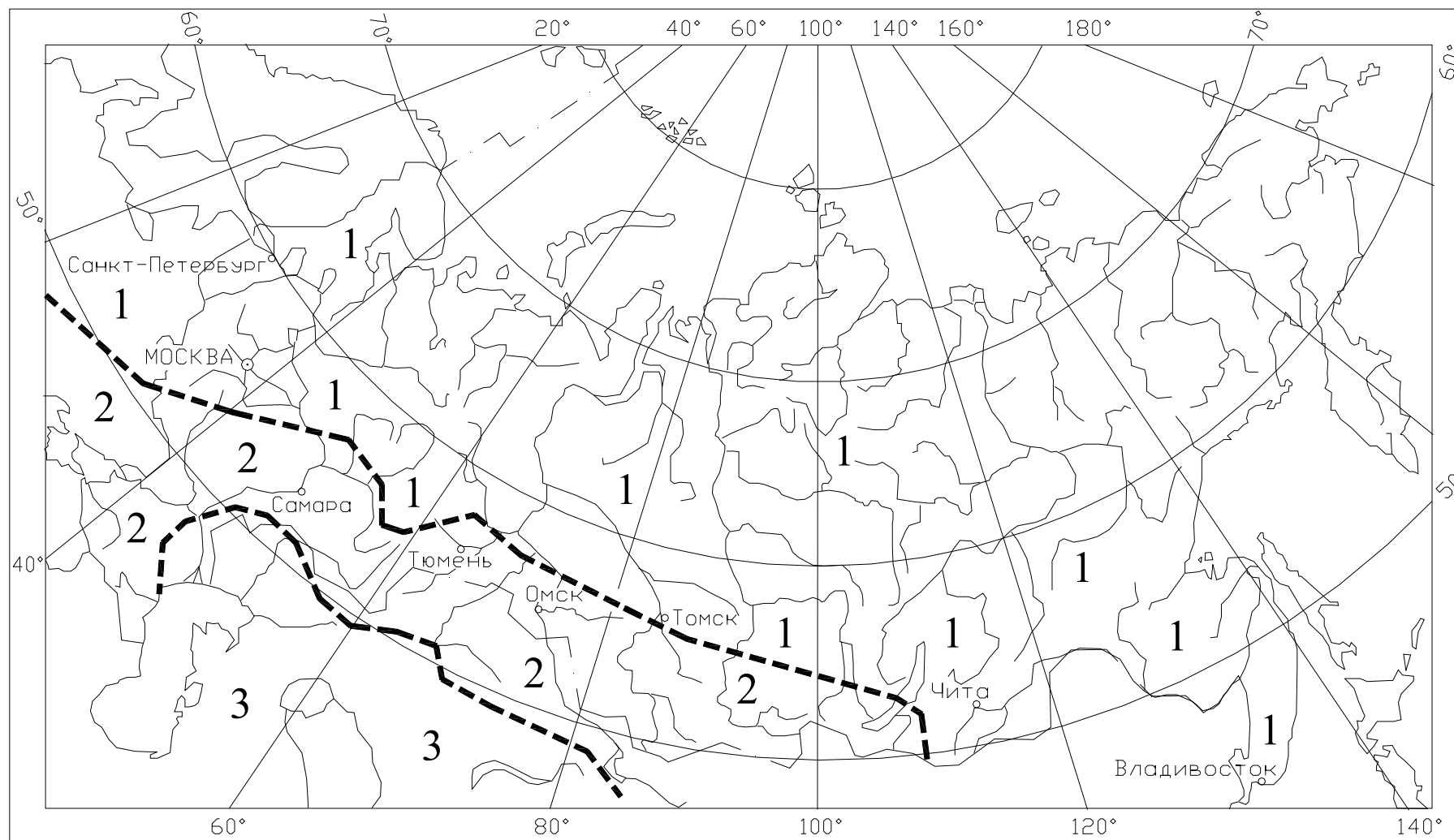


Рис. 70. Зоны увлажнения на территории России и сопредельных стран по В.А. Троицкому [145]:  
1 — избыточного увлажнения; 2 — неустойчивого увлажнения; 3 — недостаточного увлажнения



*Прогнозы верховодки.* Урбанизация территорий приводит к изменению геологической среды. Возникают новые техногенные напластования, и происходят специфические инженерно-гидрогеологические процессы.

#### Пример 42. Верховодка на естественных и техногенных линзах

В Омске с 1960-х годов были освоены путём гидронамыва неудобные затопляемые территории вблизи реки Иртыша. Намыв производился в основном песчанистым речным грунтом [259].

Возникли площадки застройки на намывных территориях. Естественный грунт оказался на глубине от 1 до 5 метров от поверхности земли. Вместе с ним оказались погребенными основания старых сооружений, существовавших до намыва, так как прибрежные территории в окрестностях Омска были селитебными, несмотря на их периодическую затопляемость в период половодья.

Основания погребенных дорог уплотнялись более ста лет, и теперь под слоем намывного грунта они превратились в вытянутые зоны пониженной проницаемости — техногенные линзы. Вблизи рек Иртыша и Оми в пределах полосы до 1-2 километров в инженерной толще 10-20 метров существуют также и естественные геологические линзы из глинистых грунтов с низкой проницаемостью.

Материалы инженерно-геологических изысканий ОАО «ОмскТИСИЗ» показали, что вместо затопления на намывных территориях возникла другая проблема — подтопление подземными водами. Весьма распространен случай образования верховодки на естественных и техногенных линзах.

Исследуем процесс подтопления при образовании куполов верховодки на геологических или техногенных линзах. Рассмотрим прогноз верховодки аналитическим методом.

А.Ж. Муфтахов в 1984 г. и вслед за ним Н.П. Куранов [119] решили класс задач по образованию новых техногенных горизонтов в однородных однослойных пластах и верховодки на слабопроницаемых линзах в линеаризованной постановке. При этом они использовали метод нефтяника Г.П. Гуссейнова (1961 г.), напоминающий известный метод последовательной смены стационарных состояний. Решения получились приближенными, что было оговорено авторами. Нам удалось получить решения для верховодки на слабопроницаемых линзах в 1999 г. [259], несколько более точные. После гидромеханического моделирования верховодки в МКР-Excel выяснилось, что решение можно улучшить. Поэтому задача о верховодке решена заново.

На рис. 71 показана расчётная схема образования купола верховодки на вытянутой линзе вследствие действия инфильтрации влаги интенсивностью  $\omega$  (м/сут). Линза имеет толщину  $m_0$  (м), а слагающий её грунт или материал обладает коэффициентом фильтрации  $k_0$  (м/сут). Ширина линзы  $2L$  (м). Вследствие симметрии на рис. 71 показана лишь половина ширины линзы. Окружающий со всех сторон линзу грунт имеет коэффициент фильтрации  $k$  (м/сут). Мощность (напор) верховодки  $H$  (м) отсчитывается от верха линзы

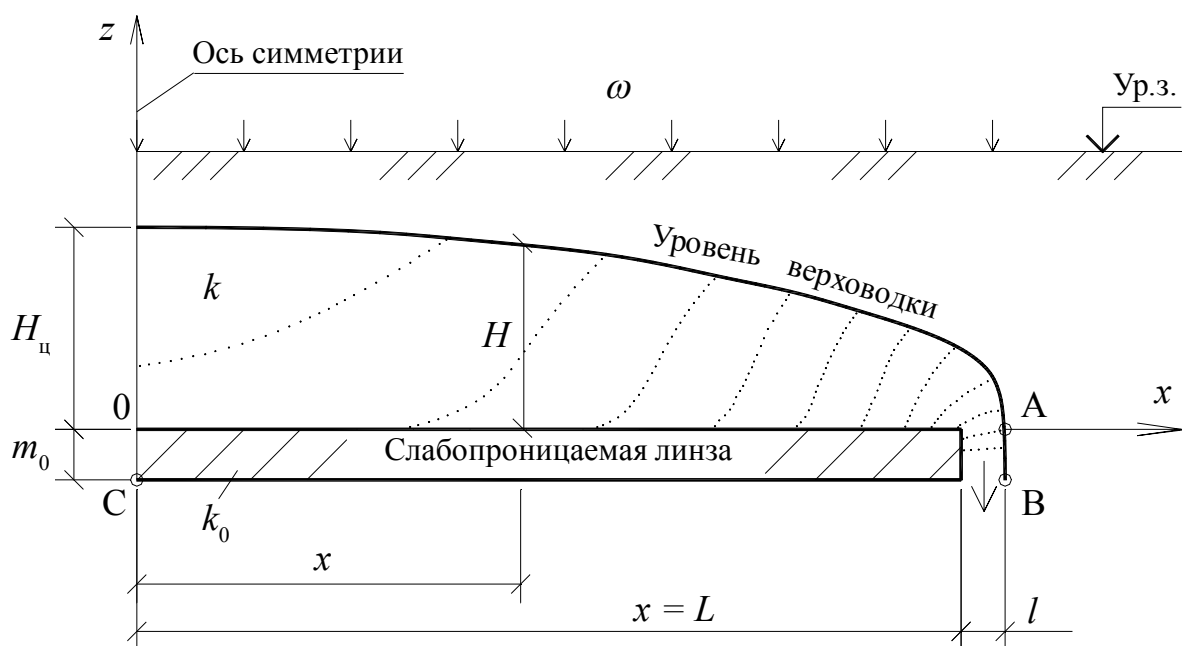


Рис. 71. Схема верховодки на слабопроницаемой вытянутой линзе

(см. рис. 71), что соответствует гидравлической постановке задачи. Следует заметить, что гидравлическая предпосылка Дюпюи о преобладающих горизонтальных скоростях на слабопроницаемой линзе почти не соблюдается. Это заметно по линиям равных напоров, которые получены на двухмерной гидромеханической модели верховодки со свободной поверхностью с помощью МКР-Excel. Линии равных напоров изображены на рис. 71 пунктирными линиями. Ближе к центру линзы они становятся все более горизонтальными, что свидетельствует о преобладающей вертикальной фильтрации воды вниз с перетеканием через линзу. У края линзы при  $x = L$  движение, наоборот, горизонтальное, плавно переходящее в вертикальный сток с края. Эти особенности учтены нами при получении аналитического решения для верховодки.

Условие образования верховодки из инфильтрующейся влаги на слабопроницаемой линзе выглядит в виде соотношения гидрогеологических параметров:

$$k_0 < \omega < k. \quad (150)$$

Положение уровня верховодки стабилизируется, когда приток инфильтрационной влаги компенсируется перетеканием-оттоком вниз через линзу и боковым стоком с краёв линзы.

Найдём аналитическое решение для прогноза максимального уровня верховодки при установившейся фильтрации на вытянутой линзе для типовой расчётной схемы, показанной на рис. 71. В качестве исходных предпосылок фильтрации принимаем выполнимость закона Дарси и гипотезу Буссинеска

[330] о зависимости мощности (напора)  $H$  верховодки лишь от горизонтальной координаты  $x$  (см. рис. 71). В отличие от работы [119], граничное условие на краю линзы поставим с учетом гидромеханических исследований Н.Н. Павловского [186], предпринятых в 1933 г. Так же, как Н.П. Куранов [119] и С.А. Пильдыш [192], считаем, что грунт линзы водонасыщен в любом случае, даже если сверху нет питания и нет слоя верховодки. В таком случае перетекание через линзу будет происходить лишь под влиянием напора (разностей напоров)  $H$  (см. рис. 71). Включать толщину линзы  $m_0$  в эту разность напоров не будем, иначе получится, что при нулевом слое верховодки вытекание из линзы должно происходить под влиянием разности напоров  $m_0$ , что противоречит исходной постановке о водонасыщенности линзы в любом случае. Кроме того, надо учитывать, что стекание с подошвы линзы на отметке  $z = -m_0$  (см. рис. 71) происходит не в атмосферу, а в грунтовый воздух, то есть инфильтрационная влага должна вытеснять этот воздух. Поэтому наша постановка о разности напоров перетекания, равной  $H$ , представляется достаточно физически обоснованной. Отметим, что о сопротивлении грунтового воздуха движению инфильтрующейся влаги ранее упоминалось в работах Н.Н. Веригина [151, с. 159] и И.С. Пашковского [316, с. 155]. Этот факт был проверен нами моделированием в МКР-Excel.

Уравнение баланса в дифференциальной форме для верховодки на слабопроницаемой линзе при наличии инфильтрационного питания интенсивностью  $\omega$  запишем в виде

$$k H \frac{dH}{dx} + \omega dx - \frac{k_0}{m_0} H dx = 0, \quad (151)$$

причем в 1-м члене уравнения (151) учтен баланс входящей и выходящей по горизонтали влаги через сечение на расстоянии  $x$  от оси  $Z$  (см. рис. 71).

Продифференцируем (151) по  $x$  и получим исходное нелинейное уравнение Буссинеска фильтрации влаги (частный случай):

$$\frac{d}{dx} \left( H \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\omega}{k} - \frac{k_0}{k m_0} H = 0. \quad (152)$$

Линеаризуем (152) по II способу Н.А. Багрова и Н.Н. Веригина, применив подстановку:

$$U = H^2. \quad (153)$$

Тогда (152) изменится до вида

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{2k_0}{k m_0 h_c} \left( \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} - U \right) = 0, \quad (154)$$

где  $h_c$  — средняя мощность верховодки, которую определим позднее.

Физический смысл  $h_c$  заключается в следующем. Часть 3-го члена уравнения (152)  $k_0 H / m_0$  является скоростью фильтрации воды через слабопроницаемый прослой толщиной  $m_0$  по закону Дарси. Это утверждение приближенное, так как напор на кровле линзы при  $z = 0$  не равен мощности верховодки (слою воды) над точкой  $x$ . Об этом свидетельствуют наклонные линии равных напоров на рис. 71. Но мы ищем гидравлическое решение, поэтому, обозначив  $H = U / h_c$ , с учетом подстановки (153) получаем (154).

Введем обозначения:

$$\lambda^2 = 2k_0 / (km_0 h_c); \quad (155)$$

$$y = \omega m_0 h_c / k_0 - U. \quad (156)$$

Тогда (154), после несложных выкладок с еще одной заменой переменной, переписывается проще:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \lambda^2 y = 0.$$

Решение этого уравнения в общем виде хорошо известно [92, с. 365]:

$$y = C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) + C_2 \operatorname{sh}(\lambda x),$$

откуда с учетом (156) получим решение в общем виде:

$$U = \omega m_0 h_c / k_0 - C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) - C_2 \operatorname{sh}(\lambda x), \quad (157)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — константы интегрирования, которые можно определить из граничных условий задачи.

Зададим граничные условия. При  $x = 0$  (см. рис. 71) градиент напора по горизонтали равен нулю, здесь ставим граничное условие II рода:

$$dH(0)/dx = 0 \text{ и } dU(0)/dx = 0. \quad (158)$$

Другое граничное условие поставим на краю линзы, где кривая депрессии (уровень верховодки) огибает край линзы с образованием зоны стока шириной  $l$  (см. рис. 71). Очевиден факт, что свободная поверхность верховодки в зоне стока так же, как и над линзой, улавливает инфильтрационный дождь интенсивностью  $\omega$ , падающий сверху. Решение этой задачи с инфильтрацией в гидромеханической постановке (двухмерной в разрезе) неизвестно. Близкую задачу о притоке воды к горизонтальным фильтрам рассматривал Н.Н.Павловский в 1933 г. [186]. А.Ж. Муфтахов (1984 г.) и Н.П. Куранов [119] использовали приближенную аналогию между стоком верховодки с края линзы и фильтрацией через дамбу обвалования в сухой грунт. Поставим гра-

ничное условие I рода — нулевой напор — там, где кривая депрессии (уровень верховодки) пересекает ось  $x$  в точке А (см. рис. 71):

$$x = L + l; \quad H = 0; \quad U = 0. \quad (159)$$

Продифференцируем (157) по  $x$  и получим

$$dU/dx = -\lambda C_1 \operatorname{sh}(\lambda x) - \lambda C_2 \operatorname{ch}(\lambda x). \quad (160)$$

Из (157) и (160) с помощью граничных условий (158) и (159) найдем константы  $C_1$  и  $C_2$ , которые подставим в (157). Затем с учетом обратной подстановки (153) получим решение для напоров (уровней) верховодки на слабопроницаемой вытянутой в плане линзе для любого  $0 \leq x \leq L+l$  в виде

$$H(x) = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch}(\lambda x)}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right] \right\}^{1/2}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0 h_c}}. \quad (161)$$

В частном случае при  $x = 0$  в центре линзы (см. рис. 71) напор

$$H_{\text{ц}} = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[ 1 - \frac{1}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right] \right\}^{1/2}. \quad (162)$$

Величину средней мощности верховодки  $h_c$  определим как среднеинтегральное значение напора  $H$  на длине  $L+l$ :

$$h_c = \frac{1}{L+l} \int_0^{L+l} H dx, \quad (163)$$

где  $H$  — напор по (161). Таким образом, для нахождения  $h_c$  в формулу (163) под знак интеграла надо подставить выражение (161) и проинтегрировать численно. Это легко реализуется в известном компьютерном пакете MathCAD с помощью функций Given ... Find [224]. Значение  $h_c$  находится посредством рекурсии (вычисление величины через саму себя).

Таким образом, формула (161) получена в гидравлической постановке с линеаризацией уравнения Буссинеска по II способу Н.А. Багрова (1937 г.) и Н.Н. Веригина (1949 г.). Особенности в ней является включение ширины стока  $l$  (см. рис. 71) в область питания верховодки за счет инфильтрации, а также постановка граничного условия I рода не на краю линзы, а на краю кривой депрессии стока. Оказалось, что такой прием дает уравнение кривой депрессии, почти совпадающее с уровнем верховодки по данным точного гидромеханического двухмерного моделирования со свободной поверхностью, реализованного с помощью МКР-Excel. При этом получается незначительное занижение уровня, не более 5 %.

Общий расход воды, стекающей и просачивающейся через вытянутую линзу, можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{общ}} = 2\omega(L + l). \quad (164)$$

Расход воды, просачивающейся через вытянутую линзу:

$$Q_{\text{л}} = 2k_0 h_c L / m_0. \quad (165)$$

Коэффициент стока верховодки с края вытянутой линзы:

$$\alpha_{\text{ст}} = (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{л}}) / Q_{\text{общ}}. \quad (166)$$

Ширина зоны стока с края вытянутой линзы (см. рис. 71):

$$l = \alpha_{\text{ст}} \omega (L + l) / k. \quad (167)$$

Формулу (167) для зоны стока можно выразить по-другому:

$$l = \alpha_{\text{ст}} \omega L / (k - \alpha_{\text{ст}} \omega). \quad (168)$$

Расчет по формулам (164) – (168) надо производить последовательными приближениями. Автоматизировать расчет можно в таблицах Microsoft Excel с помощью функции ЕСЛИ(), задавая начальное приближение и запустив циклические итерации через меню

СЕРВИС / ПАРАМЕТРЫ... / ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Решение для напоров (уровней) верховодки на абсолютно водоупорной вытянутой линзе можно получить из нелинейного уравнения (152), так как в нем исчезает последний член при  $k_0 = 0$ . Исходное дифференциальное уравнение в этом случае выглядит как

$$\frac{d}{dx} \left( H \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\omega}{k} = 0. \quad (169)$$

Проинтегрируем (169) и получим выражение

$$H \frac{dH}{dx} = -\frac{\omega}{k} x + C_1,$$

которое тоже проинтегрируем. Тогда получим:

$$\frac{H^2}{2} = -\frac{\omega x^2}{2k} + C_1 x + C_2. \quad (170)$$

Найдем в последних двух выражениях константы интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ , используя граничные условия (158) и (159). Подставив эти константы в (170), получим формулу для напоров (уровней) верховодки на абсолютно водоупорной вытянутой линзе в виде

$$H = \sqrt{\frac{\omega}{k} \left[ (L+l)^2 - x^2 \right]}, \quad (171)$$

а в частном случае при  $x = 0$  в центре линзы (см. рис. 71) напор

$$H_{\text{ц}} = (L+l) \sqrt{\omega/k}, \quad (172)$$

где ширина зоны стока с линзы

$$l = \omega L / (k - \omega). \quad (173)$$

Подставив (173) в (172), получим

$$H_{\text{ц}} = L \left[ 1 + \omega / (k - \omega) \right] \sqrt{\omega/k}. \quad (174)$$

Проверим, переходит ли формула (162) в (172) при  $k_0 \rightarrow 0$ . Для этого к (162) применим правило Лопиталья [193, с. 136], записав так:

$$\lim_{k_0 \rightarrow 0} \left\{ \frac{\omega m_0 h_c \left\{ \text{ch} \left[ \lambda (L+l) \right] - 1 \right\}}{k_0 \text{ch} \left[ \lambda (L+l) \right]} \right\}^{1/2}.$$

Дифференцируя числитель и знаменатель в последнем выражении, получаем в пределе формулу (172), что и требовалось доказать.

Проделана независимая проверка полученных аналитических зависимостей для верховодки на вытянутых линзах с помощью компьютерного моделирования расчетной схемы верховодки (см. рис. 71) методом конечных разностей (МКР). Моделирование проведено по нашей методике [261] с помощью пакета Microsoft Excel. Результаты проверки приведены в следующем примере.

**Пример 43.** Проверка формул для верховодки на вытянутой линзе

Исходные данные:  $\omega = 0,01$  м/сут;  $k = 0,1$  м/сут;  $k_0$  — переменный;  $m_0 = 0,5$  м;  $L = 10$  м. Расчетную схему верховодки см. на рис. 71. Результаты расчета по формулам (161) – (168) и моделирования приведены в табл. 9.

Таблица 9

$k_0$ , м/сут	Расчет по формулам			Результаты моделирования		
	$H_{\text{ц}}, \text{ м}$	$h_{\text{с}}, \text{ м}$	$\alpha_{\text{ст}}$	$H_{\text{ц}}, \text{ м}$	$h_{\text{с}}, \text{ м}$	$\alpha_{\text{ст}}$
0,000001	3,5121	2,7585	0,9995	3,5123	2,7308	0,9995
0,00001	3,4987	2,7484	0,9950	3,5005	2,7220	0,9947
0,0001	3,3678	2,6501	0,9520	3,3854	2,6366	0,9486
0,001	2,3789	1,9105	0,6424	2,4915	2,0500	0,6118
0,005	0,8770	0,7777	0,2410	0,9634	0,8190	0,1833
0,009	0,5167	0,4806	0,1476	0,5539	0,4983	0,1045

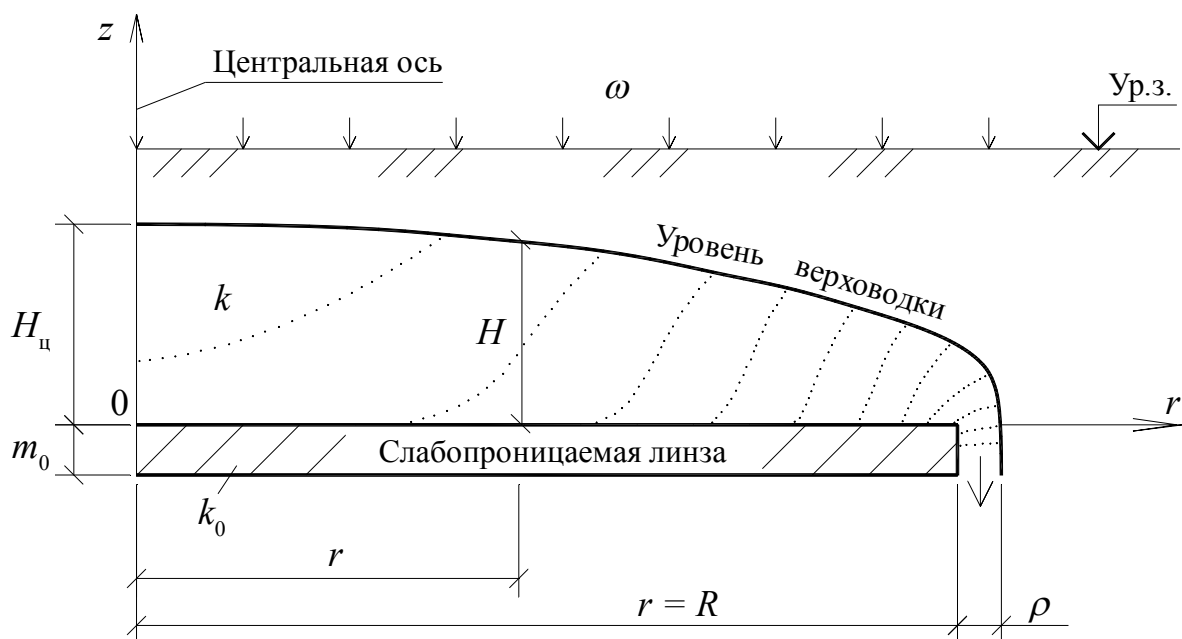


Рис. 72. Схема верховодки на слабопроницаемой круглой в плане линзе

Сравнение результатов свидетельствует о хорошей точности полученных аналитических зависимостей. Некоторое занижение расчетных уровней верховодки можно объяснить общими свойствами гидравлических решений, что исследовано А.Ж. Муфтаховым в 1975 г. [156].

Необходимо отметить, что Н.П. Куранов [119] в рамках гипотезы Буссинеска с линеаризацией по II способу получил зависимости для прогноза верховодки, которые мы проанализировали в [259]. Нам удалось получить более точные решения (161)–(174), которые мы рекомендуем для прогноза верховодки на слабопроницаемых вытянутых линзах. Решение для нестационарной фильтрации верховодки на вытянутой абсолютно водоупорной линзе получено в такой же постановке А.Ж. Муфтаховым в 1984 г. и приведено в справочном пособии к СНиП [208].

Найдём зависимости для прогноза максимального уровня верховодки при установившейся фильтрации на круглой в плане линзе. Типовая расчётная схема изображена на рис. 72.

Эта задача аналогична предыдущей и отличается лишь осевой симметрией. Поэтому все предыдущие физические предпосылки сохраняют силу. Решение получим при менее подробных выкладках.

Исходное нелинейное дифференциальное уравнение стационарной (установившейся) фильтрации верховодки на круглой линзе в гидравлической постановке имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( H \frac{dH}{dr} \right) + \frac{\omega}{k} - \frac{k_0}{km_0} H = 0, \quad (175)$$



где  $r$  — радиальная координата (см. рис. 72); остальные обозначения прежние, как для верховодки на вытянутой линзе.

Граничные условия:

$$r = 0, \quad dH/dr = 0; \quad (176)$$

$$r = R + \rho, \quad H = 0, \quad (177)$$

где  $R$  — радиус линзы;  $\rho$  — зона стока с краев линзы (см. рис. 72).

Решая (175) при условиях (176) и (177), в результате получим выражение для напоров (уровней) верховодки на слабопроницаемой круглой в плане линзе для любого  $0 \leq r \leq R + \rho$  в виде

$$H(r) = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[ 1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0[\lambda(R + \rho)]} \right] \right\}^{1/2}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0 h_c}}, \quad (178)$$

где  $I_0(z)$  — цилиндрическая модифицированная функция Бесселя от мнимого аргумента нулевого порядка 1-го рода [230; 275; 325].

В частном случае при  $r = 0$  напор в центре линзы

$$H_{\text{ц}} = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[ 1 - \frac{1}{I_0[\lambda(R + \rho)]} \right] \right\}^{1/2}. \quad (179)$$

Среднюю мощность верховодки  $h_c$  определим делением объема купола верховодки  $V$  на площадь круга радиусом  $(R + \rho)$ :

$$h_c = \frac{V}{\pi(R + \rho)^2} = \frac{1}{\pi(R + \rho)^2} \int_0^{R + \rho} 2\pi r H dr,$$

где напор  $H$  под знаком интеграла надо брать по (178). Окончательно

$$h_c = \frac{2}{(R + \rho)^2} \int_0^{R + \rho} r H dr. \quad (180)$$

Последняя формула легко рассчитывается в математическом пакете MathCAD [224] с помощью функций Given...Find («Дано...Найти»).

Общий расход воды, стекающей и просачивающейся через круглую в плане линзу, можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{общ}} = \pi \omega (R + \rho)^2. \quad (181)$$

Расход воды, просачивающейся через круглую линзу:

$$Q_{\text{л}} = \pi k_0 h_c R^2 / m_0. \quad (182)$$

Коэффициент стока с края линзы можно определить по формуле (166), принимая в ней  $Q_{\text{общ}}$  и  $Q_{\text{л}}$  соответственно по (181) и (182).

Ширина зоны стока с края круглой линзы (см. рис. 72):

$$\rho = \left[ R^2 + (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{л}}) / (\pi k) \right]^{1/2} - R \quad (183)$$

или с учетом (181) в виде

$$\rho = \left[ R^2 + \alpha_{\text{ст}} \omega (R + \rho)^2 / k \right]^{1/2} - R. \quad (184)$$

Расчет величины  $\rho$  проводят последовательными приближениями.

Напоры (уровни) верховодки на абсолютно водоупорной круглой в плане линзе выражаются как частный случай формулы (178) при  $k_0 = 0$  в виде

$$H(r) = \left\{ \frac{\omega}{2k} \left[ (R + \rho)^2 - r^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (185)$$

Напор в центре круглой линзы при  $r = 0$ :

$$H_{\text{ц}} = (R + \rho) \sqrt{\frac{\omega}{2k}}. \quad (186)$$

Зона стока с круглой линзы:

$$\rho = \left[ R^2 + \omega (R + \rho)^2 / k \right]^{1/2} - R. \quad (187)$$

#### Пример 44. Проверка формул для верховодки на круглой линзе

Исходные данные:  $\omega = 0,01 \text{ м/сут}$ ;  $k = 0,1 \text{ м/сут}$ ;  $k_0$  — переменный;  $m_0 = 0,5 \text{ м}$ ;  $R = 10 \text{ м}$ . Расчетную схему верховодки см. на рис. 72. Результаты расчета по формулам (178) – (184) и моделирования с помощью МКР-Excel приведены в табл. 10. Сравнение показывает, что вышеназванные аналитические зависимости неплохо коррелируются с данными моделирования. Поэтому формулы (178) – (184) рекомендуются для приближенных прогнозов верховодки.

Таблица 10

$k_0$ , м/сут	Расчет по формулам			Результаты моделирования		
	$H_{\text{ц}}, \text{ м}$	$h_{\text{с}}, \text{ м}$	$\alpha_{\text{ст}}$	$H_{\text{ц}}, \text{ м}$	$h_{\text{с}}, \text{ м}$	$\alpha_{\text{ст}}$
0,000001	3,5121	2,7585	0,9995	3,5123	2,7308	0,9995
0,00001	3,4987	2,7484	0,9950	3,5005	2,7220	0,9947
0,0001	3,3678	2,6501	0,9520	3,3854	2,6366	0,9486
0,001	2,3789	1,9105	0,6424	2,4915	2,0500	0,6118
0,005	0,8770	0,7777	0,2410	0,9634	0,8190	0,1833
0,009	0,5167	0,4806	0,1476	0,5539	0,4983	0,1045

Как уже было замечено, предпосылка Дюпюи на слабопроницаемых линзах почти не соблюдается, так как линии тока не горизонтальны. Поэтому гидравлические решения для неустановившейся фильтрации воды на слабопроницаемых линзах получаются слишком грубыми. Прогноз неустановившейся фильтрации верховодки на слабопроницаемых линзах, а также образование новых техногенных горизонтов надежнее моделировать с помощью МКР-Excel (см. § 27).

*Прогнозы подпора уровня подземных вод.* Уровень воды в строительных выемках и выработках (котлованах, траншеях, подземных проходках и др.) может подняться в силу разных причин. Это может произойти из-за наводнения, паводка, сильного ливня, аварийного прорыва водонесущей коммуникации и т.д. После этого вода из выемок и выработок (очагов подтопления) просачивается в прилегающие грунты территории застройки. В результате близлежащие здания и сооружения подтапливаются повышающимся уровнем подземных вод (УПВ) — происходит подпор УПВ.

Подпор УПВ от водоемов проработан в технической литературе достаточно подробно. Прогноз подпора УГВ из водохранилищ и каналов рассматривали В.И. Аравин (1940), Б.К. Ризенкампф (1940), С.Н. Нумеров (1947), Н.Н. Веригин (1947, 1949, 1950, 1970, 1975), Н.Н. Биндеман (1951, 1960), П.Я. Полубаринова-Кочина (1949, 1952, 1969, 1977), С.Ф. Аверьянов (1956, 1982), А.В. Лебедев (1957), А.Р. Цицкишвили (1957), В.П. Недрига (1961), Б.С. Шержуков (1969), С.В. Васильев (1970, 1973, 1975), И.В. Гармонов (1984) и др. При этом было подчеркнуто, что главной стадией подтопления является фильтрация с подпором грунтовых вод. Прогнозы были в основном составлены в рамках гидравлической теории Дюпюи с линеаризацией исходных дифференциальных уравнений фильтрации. Такая постановка предполагала, что изменения УГВ незначительно превышают мощность водоносного пласта, не более 10-25 % [6; 7; 49; 316].

Особой задачей является прогноз подпертой фильтрации из водоема или очага подтопления в сухой грунт на водоупоре, когда отсутствует первоначальная мощность грунтовых вод. Впервые такую задачу поставил Н.Н. Веригин в 1951 г. [42] с особым условием на фронте языка подтопления, приравняв скорость фильтрации по закону Дарси скорости движения фронта, умноженному на недостаток (дефицит) насыщения грунта  $\mu$ . В таком случае градиент напора по горизонтали на фронте языка принимает значения между 0 и  $-1$ . Подобный класс задач рассмотрел Г.И. Баренблатт [18], применив постановку типа мгновенного источника и метод автомодельных движений, предложенный Л.И. Седовым в 1944 г. [231, с. 178-179].

Точное решение этой задачи при нелинейной плоскопараллельной одномерной фильтрации со свободной поверхностью получено П.Я. Полубари-

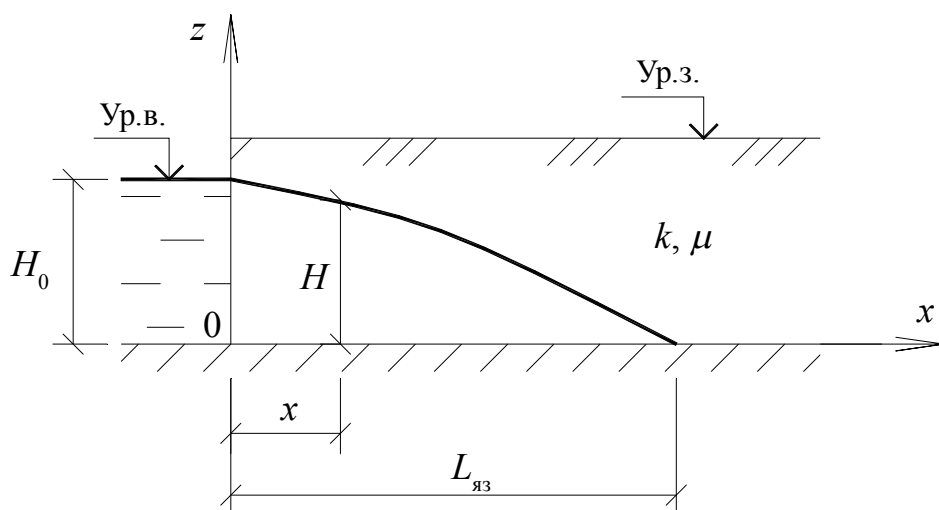


Рис. 73. Язык подтопления (плоскопараллельная фильтрация)

новой-Кочиной в 1952 г. [197] для длины языка подтопления грунтовых вод (рис. 73):

$$L_{\text{яз}} = 1,616 (kH_0 t / \mu)^{1/2}, \quad (188)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  $H_0$  — постоянный напор в источнике подтопления, отсчитываемый от поверхности горизонтального водоупора;  $t$  — время;  $\mu$  — недостаток (дефицит) насыщения грунта.

Точное решение аналогичной задачи при нелинейной радиальной одномерной фильтрации со свободной поверхностью неизвестно. Получим его. Для этого применим свой особый комбинированный метод автомодельных движений в сочетании с численным моделированием МКР-Excel — метод АДЧМ. По его обоснованию первоначально получим формулу (188) для плоскопараллельной фильтрации. Ход рассуждений заимствуем у П.Я. Полубариновой-Кочиной [197; 198; 199].

Исходное нелинейное гидравлическое (по Буссинеску) дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при плоскопараллельном движении воды (см. рис. 73) в частных производных имеет вид

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (189)$$

Граничное условие слева при  $x = 0$  (см. рис. 73) выражает постоянство напора в вытянутом источнике подтопления:

$$H(0, t) = H_0. \quad (190)$$

Другое граничное условие с постоянным нулевым напором ставим на движущемся фронте языка подтопления справа при  $x = L_{\text{яз}}$  (см. рис. 73) в виде

$$H(L_{\text{яз}}, t) = 0. \quad (191)$$

Первоначально грунт не обводнен. Начальное условие при любом  $x > 0$  имеет вид

$$H(x, 0) = 0. \quad (192)$$

Автомодельное решение — это частное решение задачи, когда с помощью специальных подстановок и теории размерностей удастся преобразовать исходное дифференциальное уравнение в частных производных в обыкновенное дифференциальное уравнение [19; 90; 99; 227; 231]. Тогда решить уравнение можно проще.

Введем две подстановки (безразмерные переменные):

$$U = H/H_0; \quad (193)$$

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{2kH_0t/\mu}}. \quad (194)$$

Величину  $\xi$  можно назвать автомодельной переменной.

Тогда уравнение (189) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2U^2}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dU}{d\xi} = 0. \quad (195)$$

Уравнение (195) можно переписать в развернутом виде

$$UU'' + (U')^2 + \xi U' = 0, \quad (196)$$

где штрихом и двумя штрихами обозначены для краткости письма соответственно первая и вторая производные  $U$  по  $\xi$ .

Если в (196) положить  $U = 0$ , то считая  $U'' \neq \infty$ , получается

$$U'(U' + \xi) = 0,$$

откуда, если  $U' \neq 0$ , П.Я. Полубаринова-Кочина получила

$$U' + \xi = 0.$$

В точке  $\xi = C$  имеется пересечение интегральной кривой с абсциссой (рис. 74), то есть  $U = 0$ ;  $U' = -C$ .

Далее П.Я. Полубаринова-Кочина нашла решение (196) в виде ряда, разложив  $U$  по степеням разности  $\xi - C$ , откуда определила  $C = 1,143$ .

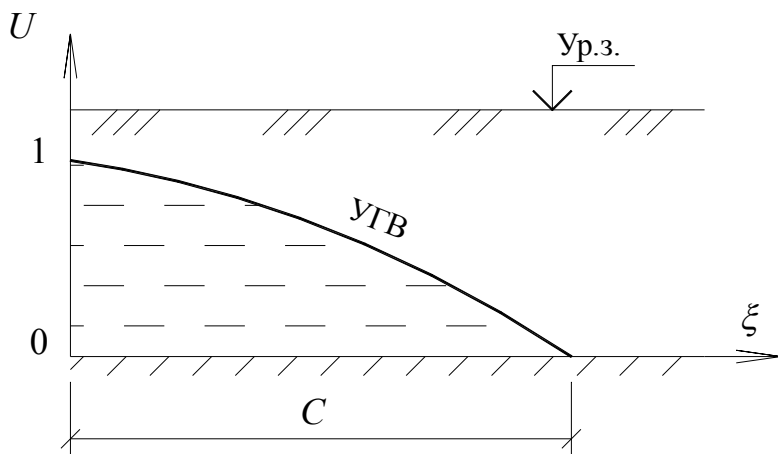


Рис. 74. Линейный язык подтопления в безразмерных координатах

Из (194) при  $x = L_{\text{яз}}$  и  $\xi = C$  П.Я. Полубаринова-Кочина вывела длину языка подтопления в виде (188).

Найдем  $C$  численным моделированием языка грунтовых вод при плоско-параллельной фильтрации, для чего перепишем (195) в конечных разностях (рис. 75), пользуясь справочником Д.Ю. Панова [188, с. 37 и 40]:

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta\xi)^2} + \frac{2\xi_i(U_{i+1} - U_{i-1})}{2\Delta\xi} = 0.$$

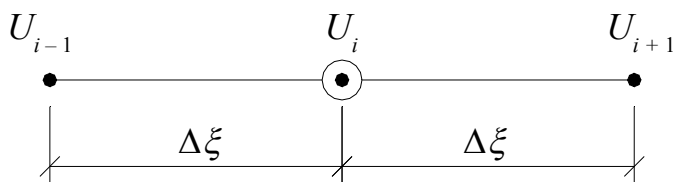


Рис. 75. Безразмерная МКР-сетка в декартовых координатах

Из последнего уравнения получим формулу автомодельного безразмерного моделирования в виде

$$U_i = \left[ (U_{i+1}^2 + U_{i-1}^2) / 2 + \xi_i \Delta\xi (U_{i+1} - U_{i-1}) / 2 \right]^{1/2}. \quad (197)$$

Эту формулу применяем для модели МКР-Excel, которая имеет 233 узла с пространственным шагом  $\Delta\xi = 0,005$ . Правую границу модели с условием I рода  $U = 0$  (ползущий фронт языка) начинаем с приближения  $\xi = 1$ . На левой границе модели ставим тоже условие I рода  $U = 1$ . Сбрав одномерную модель по нашей методике МКР-Excel с помощью формулы (197), нажимаем клавишу F9. Происходит итерационный расчет модели для первого приближения  $C = \xi = 1$ . Затем сдвигаем вправо правую границу модели на несколько шагов и находим следующее приближение коэффициента  $C$ . В

ходе работы по подбору  $C$  сохраняем файл модели на жестком диске (винчестере). При каком-то значении  $C$  счет на модели начинает расходиться, и в ячейках таблицы Microsoft Excel возникает показатель неприемлемого аргумента:

#ЧИСЛО.

Значит предыдущее значение  $C$  есть искомое значение. Таким путем на МКР-модели нами было найдено точное значение коэффициента

$$C = 1,143,$$

что полностью совпало с результатом аналитического способа нахождения  $C$  по П.Я. Полубариновой-Кочиной [197; 198; 199].

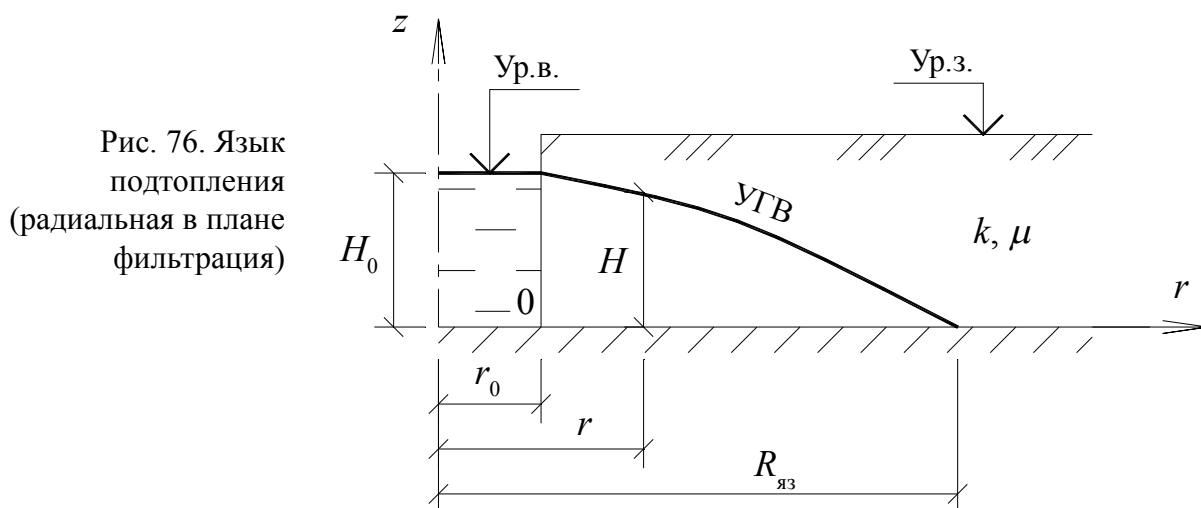
Таким образом, мы обосновали точный комбинированный метод автомобильных движений в сочетании с численным моделированием МКР-Excel (сокращенно метод АДЧМ) для нахождения коэффициента  $C$ , с помощью которого из формулы (194) можно найти длину языка подтопления при плоскопараллельной фильтрации, то есть получить (188).

Найдем с помощью данного комбинированного метода радиус языка подтопления  $R_{\text{яз}}$ , то есть получим точное решение задачи, аналогичной предыдущей, при нелинейной радиальной одномерной фильтрации воды со свободной поверхностью (рис. 76). Такие задачи актуальны для прогноза подтопления от септиков, метантенков, выгребных ям, при аварийном затоплении подвалов домов и т.д. в условиях первоначально необводненных грунтов.

Будем искать радиус языка подтопления (см. рис. 76) в виде

$$R_{\text{яз}} = r_0 + C_R \sqrt{2kH_0 t / \mu}, \quad (198)$$

где  $C_R$  — коэффициент, который определим с помощью показанного комбинированного метода; остальные обозначения прежние.



Исходное нелинейное гидравлическое (по Буссинеску) дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при радиальном в плане движении воды (см. рис. 76) в частных производных имеет вид

$$\frac{k}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (199)$$

где  $r$  — горизонтальная радиальная координата; остальные обозначения прежние.

Для получения автомодельного решения применим безразмерные подстановки (193) и

$$\eta = \frac{r}{\sqrt{2kH_0 t / \mu}}. \quad (200)$$

Тогда из (199) получим обыкновенное дифференциальное уравнение в безразмерных переменных:

$$\frac{d^2 U^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{dU^2}{d\eta} + 2\eta \frac{dU}{d\eta} = 0,$$

которое перепишем в конечных разностях (рис. 77):

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta\eta)^2} + \frac{U_{i+1}^2 - U_{i-1}^2}{2\eta_i \Delta\eta} + \frac{2\eta_i (U_{i+1} - U_{i-1})}{2\Delta\eta} = 0.$$

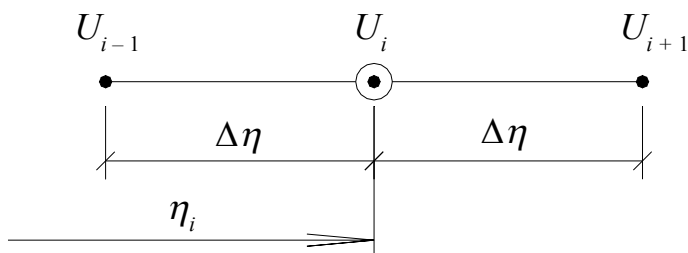


Рис. 77. Безразмерная МКР-сетка в радиальных координатах

Из последнего уравнения получим формулу автомодельного безразмерного моделирования в МКР-Excel в виде

$$U_i = \left[ \left( U_{i+1}^2 + U_{i-1}^2 \right) / 2 + \eta_i \Delta\eta (U_{i+1} - U_{i-1}) / 2 + \Delta\eta (U_{i+1}^2 - U_{i-1}^2) / (4\eta_i) \right]^{1/2}. \quad (201)$$

В процессе моделирования по формуле (201) обнаружено, что в радиальной задаче коэффициент  $C_R$  не является величиной постоянной, а зависит от продолжительности процесса подтопления. Замечено, что с течением време-



ни  $C_R$  несколько уменьшается (примерно на 10 % от первоначального значения), то есть процесс радиального расползания языка подтопления не совсем автомодельный.

Введем дополнительные безразмерные величины. Критерий Фурье (безразмерное время):

$$\tau = at/r_0^2; \quad a = kH_0/\mu. \quad (202)$$

Безразмерные пространственные координаты:

$$\bar{r} = r/r_0; \quad \bar{R}_{\text{яз}} = R_{\text{яз}}/r_0. \quad (203)$$

Тогда из (198) можно выразить

$$C_R \sqrt{2} = (\bar{R}_{\text{яз}} - 1) / \sqrt{\tau}. \quad (204)$$

Моделированием с помощью МКР-Excel на основе формул (201) и (204) получена табл. 11.

Таблица 11

$\tau$	$\bar{R}_{\text{яз}}$	$C_R \sqrt{2}$	$\tau$	$\bar{R}_{\text{яз}}$	$C_R \sqrt{2}$
1	2,5098	1,5098	11	5,6468	1,4011
2	3,0903	1,4781	12	5,8402	1,3973
3	3,5310	1,4613	13	6,0221	1,3929
4	3,8980	1,4490	14	6,1984	1,3893
5	4,2136	1,4372	15	6,3672	1,3858
6	4,5025	1,4299	16	6,5309	1,3827
7	4,7631	1,4223	17	6,6911	1,3803
8	5,0055	1,4162	18	6,8429	1,3772
9	5,2344	1,4115	19	6,9917	1,3746
10	5,4457	1,4059	20	7,1378	1,3725

Данные этой таблицы обработаны с помощью средства «Мастер диаграмм» Microsoft Excel. В результате получена эмпирическая формула

$$C_R \sqrt{2} = 1,5114 - 0,0461 \ln \tau, \quad (205)$$

обладающая высоким коэффициентом корреляции 0,9997.

На основе (198) и (205) получено точное решение для радиуса круглого в плане языка подтопления:

$$R_{\text{яз}} = r_0 [1 + (1,5114 - 0,0461 \ln \tau) \sqrt{\tau}]; \quad \tau = kH_0 t / (\mu r_0^2). \quad (206)$$

Кривые подпора УГВ при растекании языков подтопления в первоначально необводненных грунтах удобнее и проще моделировать с помощью МКР-Excel, так как данный процесс подтопления нелинейный.



Граничное условие I рода слева при  $x = 0$  на контакте грунта с источником подтопления

$$H(0, t) = H_0. \quad (210)$$

Начальное условие

$$H(x, 0) = H_e. \quad (211)$$

Умножим (207) на  $\partial x$  и проинтегрируем от 0 до  $L_t$ . Тогда получим

$$\frac{\partial}{\partial t} [\Theta - H_e L_{яз}] = \frac{k}{\mu} \left[ H(L_{яз}, t) \frac{\partial H(L_{яз}, t)}{\partial x} - H(0, t) \frac{\partial H(0, t)}{\partial x} \right], \quad (212)$$

где

$$\Theta = \int_0^{L_t} H(x, t) dx.$$

Решение ищем в виде многочлена

$$H(x, t) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (213)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  — коэффициенты, зависящие от времени.

Подставим (213) в граничные условия (208)–(210):

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0^2 &= H_0; \\ a_0 + a_1 L_{яз} + a_2 L_{яз}^2 &= H_e; \\ a_1 + 2a_2 L_{яз} &= 0, \end{aligned}$$

откуда найдем коэффициенты

$$a_0 = H_0; a_1 = -2(H_0 - H_e)/L_{яз}; a_2 = (H_0 - H_e)/L_{яз}^2,$$

затем решение (213) перепишем в виде

$$H(x, t) = H_0 - 2(H_0 - H_e)x/L_{яз} + (H_0 - H_e)(x/L_{яз})^2. \quad (214)$$

Используем (214) в (212), откуда получим формулу для определения действительной длины языка подтопления:

$$L_{яз} = \left\{ 6kH_0^2 t / [\mu(H_0 - 3H_e)] \right\}^{1/2}, \quad (215)$$

которую (по данным нелинейного моделирования с помощью МКР-Excel) следует применять при соблюдении условия

$$H_e/H_0 \leq 0,3. \quad (216)$$

Вблизи фронта языка кривую подпора УГВ можно аппроксимировать асимптотой (см. рис. 78). Найдем приведенную зону подпора там, где

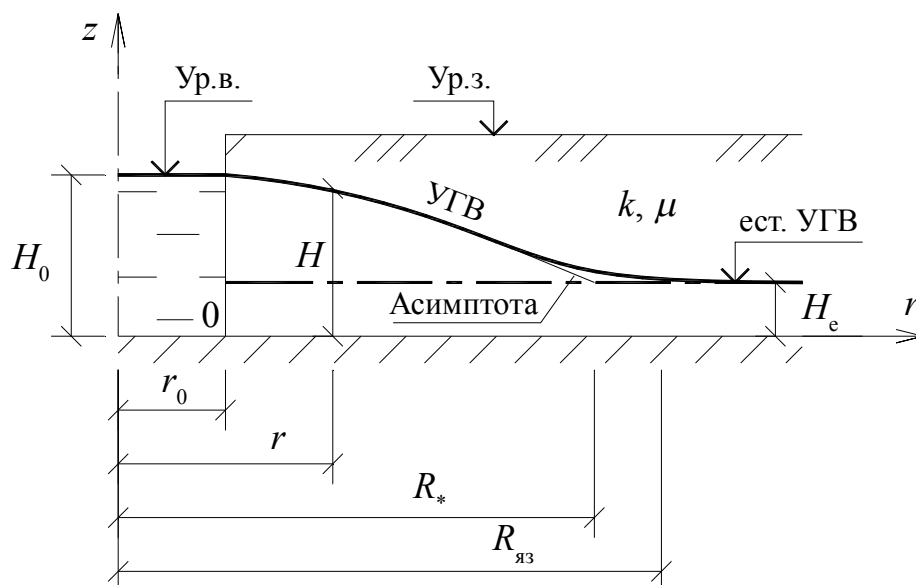


Рис. 79. Круглый в плане язык подтопления  
на маломощных грунтовых водах

асимптота пересекается с естественным УГВ. Величину  $H_e$  в (214) считаем достаточно малой и отбросим ее. Тогда запишем (214) приближенно так:

$$H(x, t) \approx H_0 \left[ 1 - 2x/L_{яз} + (x/L_{яз})^2 \right].$$

Подставим сюда  $H(x, t) = H_e$  и  $x = L_*$ , откуда найдем приведенную зону подпора в виде

$$L_* = L_{яз} \left( 1 - \sqrt{H_e/H_0} \right). \quad (217)$$

Заменим в (214)  $L_{яз}$  на  $L_*$ . Тогда кривую подпора при  $0 \leq x \leq L_*$  можно рассчитать по формуле

$$H(x, t) = H_0 - 2(H_0 - H_e)x/L_* + (H_0 - H_e)(x/L_*)^2. \quad (218)$$

Если условие (216) не соблюдается, то при  $0,3 < H_e/H_0 \leq 0,8$  подпор следует моделировать, а при  $H_e/H_0 > 0,8$  можно использовать аналитические зависимости С.Ф. Аверьянова [6; 7] и Н.Н. Веригина [151] для расчета подпора от каналов с полубесконечной областью фильтрации.

Рассмотрим случай круглого в плане источника подтопления радиусом  $r_0$  с постоянным напором  $H_0$ , от которого распространяется подпор грунтовых вод в виде языка подтопления (рис. 79). Расчет подпертой фильтрации при малой мощности грунтовых вод в этом случае актуален, например, при прогнозах подтопления в ходе строительства метантенков, септиков и других объектов водного хозяйства, имеющих компактные размеры в плане.

Исходное нелинейное дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при радиальном движении воды и наличии маломощных грунтовых вод (см. рис. 79) аналогично (199) и имеет вид

$$\frac{k}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (219)$$

Граничные условия:

$$H(R_{\text{яз}}, t) = H_e; \quad \partial H(R_{\text{яз}}, t) / \partial r; \quad H(r_0, t) = H_0. \quad (220)$$

Начальное условие:

$$H(r, 0) = H_e. \quad (221)$$

Здесь  $R_{\text{яз}}$  — действительный радиус фронта языка подтопления; остальные обозначения см. на рис. 79.

Эту нелинейную задачу решим, как и предыдущую, приближенным методом интегрального баланса [23]. Умножим (219) на  $2\pi r \partial r$  и проинтегрируем от 0 до  $R_{\text{яз}}$ . Тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [2\pi \Theta - H_e 2\pi R_{\text{яз}}^2] = \frac{2\pi k}{\mu} \left[ R_{\text{яз}} H(R_{\text{яз}}, t) \frac{\partial H(R_{\text{яз}}, t)}{\partial r} - \right. \\ \left. - r_0 H(r_0, t) \frac{\partial H(r_0, t)}{\partial r} \right], \end{aligned} \quad (222)$$

где

$$\Theta = \int_0^{R_{\text{яз}}} r H(r, t) dr.$$

Решение уравнения (219) ищем в виде

$$H(r, t) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2, \quad (223)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  — коэффициенты, зависящие от времени.

Подставим (223) в граничные условия (220):

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 r_0 + a_2 r_0^2 &= H_0; \\ a_0 + a_1 R_{\text{яз}} + a_2 R_{\text{яз}}^2 &= H_e; \\ a_1 + 2a_2 R_{\text{яз}} &= 0, \end{aligned}$$

откуда найдем коэффициенты

$$a_0 = H_e + \frac{R_{\text{яз}}^2 (H_0 - H_e)}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2}; a_1 = -\frac{2R_{\text{яз}} (H_0 - H_e)}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2}; a_2 = \frac{H_0 - H_e}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2},$$

которые подставим в (223) и получим

$$H(r, t) = H_e + (H_0 - H_e) \left( \frac{R_{\text{яз}} - r}{R_{\text{яз}} - r_0} \right)^2. \quad (224)$$

Подставим (224) в (222) и после выкладок получим формулу для нахождения в неявном виде действительного радиуса языка подтопления  $R_{\text{яз}}$  (зоны кругового подпора):

$$t = \frac{\mu}{12r_0 k H_0} \left[ \frac{R_{\text{яз}}^3}{3} - \frac{7r_0^3}{3} + r_0 R_{\text{яз}}^2 + \frac{r_0^4}{R_{\text{яз}}} - 2r_0^3 \ln \left( \frac{R_{\text{яз}}}{r_0} \right) \right]. \quad (225)$$

Заметим, что  $H_e$  не вошло в формулу, то есть при маломощных грунтовых водах эта величина в явном виде почти не влияет на подпор.

Нелинейное моделирование рассматриваемой задачи с помощью МКР-Excel показало, что кривая подпора в радиальной задаче близка к прямой линии. Поэтому вместо (224) для расчета кривой подпора УГВ от круглого источника подтопления лучше применять следующую формулу:

$$H(r, t) = H_e + (H_0 - H_e) \left[ (R_* - r) / (R_* - r_0) \right], \quad (226)$$

где приведенный радиус языка подтопления (по асимптоте) можно определить так:

$$R_* = R_{\text{яз}} (1 - H_e / H_0), \quad (227)$$

причем величину  $R_{\text{яз}}$  надо определять из (225).

Таким образом, в формулах (226)–(227) первоначально полученная параболическая зависимость была заменена на линейную с учетом действительной формы кривой подпора, полученной нелинейным моделированием МКР-Excel. Следует отметить, что В.М. Шестаков в книге [316] при аналитическом исследовании налива в удлиненный котлован (траншею) применил подобный прием. Он решал задачу тоже методом интегрального баланса. Для безнапорного потока вод, фильтрующихся из котлована по слабопроницаемому водоупору, В.М. Шестаков гипотетически принял линейное распределение глубин потока [316, с. 165].

В ходе моделирования отмечена интересная особенность конечной длины языка подтопления при малой мощности грунтовых вод, когда  $H_e / H_0 \leq 0,3$ . Погрешность формул (225)–(227) не превышает 5-10 %.

*Прогнозы куполов грунтовых вод.* Купола грунтовых вод на территории застройки образуются при очаговой инфильтрации. Фундаменты и подземные сооружения уплотняют грунты застройки. Кроме того, эти конструкции сами являются слабопроницаемыми включениями. Все это может ускорять процесс подтопления, поэтому прогноз подтопления с куполами надо делать с учетом изменившихся фильтрационных свойств грунтов оснований.

Закономерности динамики куполов грунтовых вод под застройкой изложены в нашей кандидатской диссертации 1987 г. [262]. После этого автор провел дополнительные исследования, которые приведены в данной монографии. Уточнены границы применения решений в зависимости от критерия Фурье  $\tau$ , добавлены графики областей учета зон неоднородностей. Оказалось, что вполне можно обходиться асимптотическими решениями, если исходная постановка задачи допускает линеаризацию.

При эксплуатации зданий и сооружений возможно образование купола (бугра) грунтовых вод в их основании вследствие аварийных утечек из водонесущих коммуникаций. В последующем происходит растекание этого купола.

Для определения положения свободной поверхности УГВ на любой момент времени необходимо решить задачу нестационарной фильтрации о растекании купола в плано-неоднородном пласте. Фильтрационные характеристики водоносного пласта в городах в пределах здания и вне его являются различными.

Начальную форму купола в вертикальном разрезе можно принять в виде прямоугольника. В плане предполагается его начальное расположение в пределах зоны грунта с измененными фильтрационными характеристиками. Достаточно точно размеры этой зоны можно совместить с плановыми размерами здания или сооружения. В разрезе возможную зону уплотнения и уменьшения проницаемости грунта под зданием следует определять по рекомендациям § 15.

Динамика растекания вытянутых и круглых в плане куполов различна [71; 198; 199; 205; 217]. Поэтому растекание куполов в пределах застройки изучено в настоящей работе отдельно для каждой из вышеупомянутых плановых конфигураций куполов.

Рассмотрим водоносный пласт однослойный, изотропный, со свободной поверхностью, начальной мощностью  $h_e$  и в плане неограниченный. Участок пласта под зданием является зоной неоднородности.

Растекание вытянутого в плане купола грунтовых вод в плано-неоднородном однослойном пласте (рис. 80) рассмотрено в рамках линейной гидравлической теории [262], то есть в предположения независимости горизон-

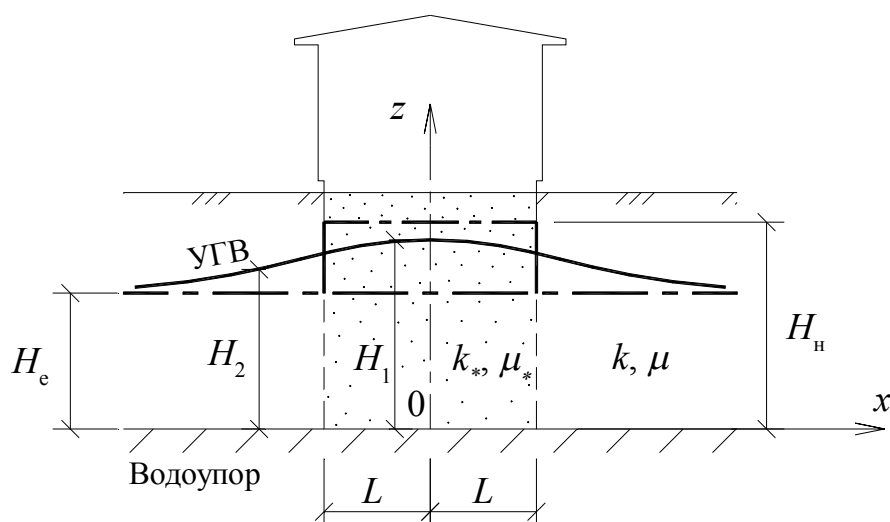


Рис. 80. Растекание вытянутого в плане купола грунтовых вод в основании здания или сооружения

тальных составляющих скорости фильтрации от вертикальной координаты. Для решения таких задач прогноза уровня грунтовых вод по рекомендациям Н.П. Куранова [118] предпочтительно применять дифференциальные уравнения фильтрации с линеаризацией по I способу. Эту задачу мы перерешали заново с учетом новых компьютерных средств.

Исходная система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad |x| \leq L; \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad |x| \geq L; \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k. \end{aligned} \quad (228)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) &= H_n; \quad H_2(x, 0) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial x = 0; \\ \eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial x} &= \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial x}; \quad H_1(L, t) = H_2(L, t); \quad H_2(\infty, t) = H_e. \end{aligned} \quad (229)$$

Здесь  $k$  и  $\mu$  — коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта в естественном залегании;  $k_*$  и  $\mu_*$  — коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта, суммарно учитывающие непроницаемые включения и уплотнение грунта под зданием или сооружением (см. § 15);  $a$  — коэффициент уровнеспроводности;  $h_c$  — средняя мощность водоносного пласта; остальные обозначения см. на рис. 80.



Применив к системе уравнений (228) и крайевым условиям (229) прямое и обратное преобразования Лапласа по времени [73; 74; 98], получим решения в виде [262]

$$H_1 = H_n - \frac{(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L - x}{2\sqrt{\eta at}} + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L + x}{2\sqrt{\eta at}} \right]; \quad (230)$$

$$H_2 = H_e + \frac{\bar{\mu}\sqrt{\eta}(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2nL}{2\sqrt{\eta at}} - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2L(n+1)}{2\sqrt{\eta at}} \right], \quad (231)$$

где

$$\alpha = -\left(1 - \bar{\mu}\sqrt{\eta}\right) / \left(1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}\right).$$

В формулы (230) – (231) входит  $\operatorname{erfc}(z)$  — дополнительный интеграл вероятности, специальная функция [275].

Наиболее неблагоприятной точкой купола является его центральная часть, поэтому приводим важные частные асимптотические решения для центра купола.

Применим безразмерный параметр времени (критерий Фурье) для плоскопараллельной фильтрации:

$$\tau = at/L^2. \quad (232)$$

В начальный период времени растекания вытянутого купола при  $\tau \leq 3,1$  в неоднородном пласте с погрешностью менее 5 % можно применять асимптотическое решение для центра купола ( $x = 0$ ):

$$H_1 = H_n - \frac{2(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\eta \tau}}. \quad (233)$$

Опускание центра вытянутого купола ( $x = 0$ ) в неоднородном пласте для любого момента времени можно рассчитать с погрешностью менее 4 % по другому асимптотическому решению:

$$H_1 = H_n - \frac{2(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{2n+1}{2\sqrt{\eta\tau}}. \quad (234)$$

Опускание центра вытянутого купола ( $x = 0$ ) в однородном пласте ( $\eta = 1$ ) для любого момента времени можно рассчитать по формуле [199]

$$H_1 = H_e + (H_n - H_e) \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\tau}}, \quad (235)$$

где  $\operatorname{erf}(z)$  — интеграл вероятности (или функция ошибок), который связан с дополнительным интегралом вероятности так [275]:

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z).$$

Отметим, что функции  $\operatorname{erf}(z)$  и  $\operatorname{erfc}(z)$  встроены в электронные таблицы Microsoft Excel, причем в русской версии Excel они известны соответственно как  $\Phi\text{ОШ}(z)$  и  $\text{Д}\Phi\text{ОШ}(z)$ , то есть как функция ошибок и дополнительная функция ошибок.

Заметим, что наша формула (233) переходит в формулу (235) в случае однородного пласта. Сводка формул по расчету растекания полосообразных (вытянутых в плане) куполов грунтовых вод в планово-однородных пластах приведена в [208]. В книге [151] даны формулы В.К. Рудакова по расчету растекания куполов в планово-неоднородных пластах, охватывающие случаи, свойственные гидромелиоративным системам на сельскохозяйственных полях. Они могут быть полезны для прогнозов подтопления в городском строительстве. Эти формулы получены в рамках линейной гидравлической теории фильтрации.

На рис. 81 над сплошными кривыми показаны области, где с погрешностью менее 5 % в сторону занижения УГВ можно не учитывать уменьшение проницаемости водоносного пласта, например, под влиянием уплотнения от свайных фундаментов и от их наличия в пласте. Пунктирная кривая соответствует расчетной погрешности 10 %. Величина  $\eta = k_*\mu/(k\mu_*)$ , где индекс звездочка «\*» показывает фильтрационную характеристику уплотненной зоны грунта со сваями, под ленточными фундаментами и т.д. Величина  $2L$  соответствует ширине полосообразного (вытянутого) купола грунтовых вод, под которым произошло уплотнение грунта. Если точка  $\eta$  попала под кривую (ниже кривой), то необходимо учитывать изменение фильтрационных характеристик под зданием или сооружением и рассчитывать УГВ по формулам (230)–(234).

Следует помнить, что пренебрежение процессами снижения проницаемости грунтов в городах приводит к занижению прогнозного УГВ, то есть

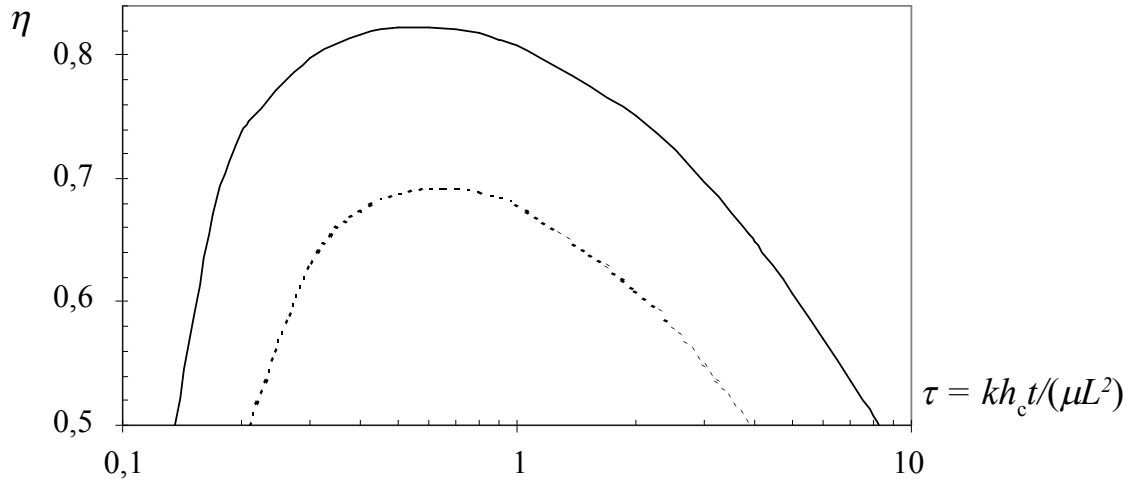


Рис. 81. Область учета снижения проницаемости при растекании вытянутого в плане купола грунтовых вод

идет не в запас надежности прогнозов подтопления. График на рис. 81 позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние техногенных изменений городской гидрогеологической среды проявляется при нестационарных процессах фильтрации подземных вод и особенно в период, соответствующий временному параметру  $\tau$  порядка единицы.

Отметим также, что при  $\tau \geq 128$  с погрешностью не более 5 % любой полосообразный (вытянутый) купол в неоднородном пласте с параметрами  $\eta = 1 \dots 0,5$  можно считать растекшимся.

Растекание круглого в плане купола грунтовых вод в планово-неоднородном однослойном пласте (рис. 82) рассмотрим при условии выполнимости линейной гидравлической теории фильтрации [6].

Процесс растекания круглого купола можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r} &= \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; & r \leq R; & \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; & r \geq R; & \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k. \end{aligned} \quad (236)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} H_1(r, 0) &= H_n; \quad H_2(r, 0) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial r = 0; \\ \eta_0 \frac{\partial H_1(R, t)}{\partial r} &= \frac{\partial H_2(R, t)}{\partial r}; \quad H_1(R, t) = H_2(R, t); \quad H_2(\infty, t) = H_e. \end{aligned} \quad (237)$$

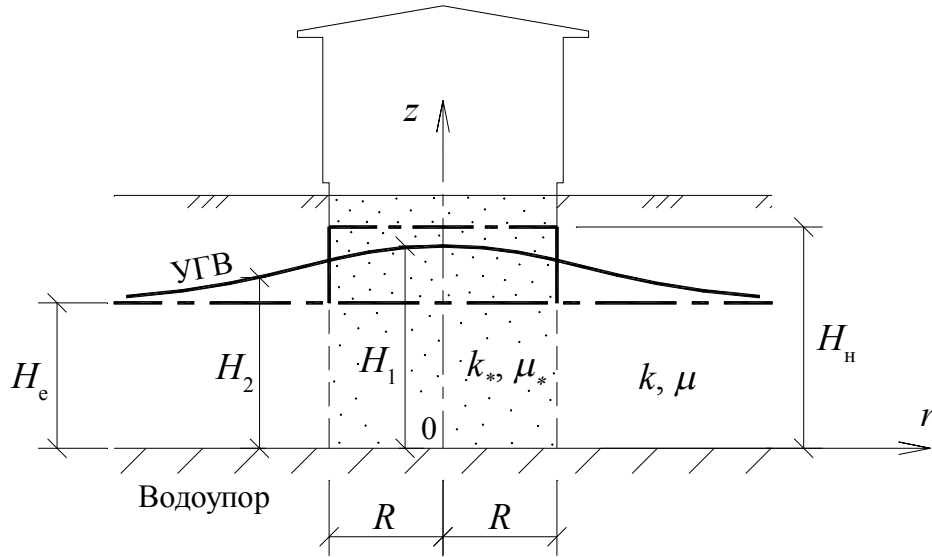


Рис. 82. Растекание круглого в плане купола грунтовых вод в основании здания или сооружения

Применив к системе уравнений (236) и краевым условиям (237) прямое и обратное преобразования Лапласа по времени [73; 74; 98], получим решения в виде [262]

$$H_1 = H_e + \frac{4(H_n - H_e) \bar{\mu} \sqrt{\eta a}}{\pi^2 R} F_{H1}; \quad (238)$$

$$H_2 = H_e + \frac{2(H_n - H_e) \bar{\mu} \sqrt{\eta}}{\pi} F_{H2}, \quad (239)$$

где несобственные интегралы

$$F_{H1} = \int_0^\infty \frac{J_0(vr/\sqrt{\eta a}) J_1(vR/\sqrt{\eta a}) \exp(-v^2 t)}{v^2 [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv;$$

$$F_{H2} = \int_0^\infty \frac{J_1(vR/\sqrt{\eta a}) [Y_0(vr/\sqrt{a}) \psi(v) - J_0(vr/\sqrt{a}) \varphi(v)] \exp(-v^2 t)}{v [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv,$$

в которых

$$\varphi(v) = J_0(vR/\sqrt{\eta a}) Y_1(vR/\sqrt{a}) - \bar{\mu} \sqrt{\eta} J_1(vR/\sqrt{\eta a}) Y_0(vR/\sqrt{a});$$

$$\psi(v) = J_0(vR/\sqrt{\eta a}) J_1(vR/\sqrt{a}) - \bar{\mu} \sqrt{\eta} J_1(vR/\sqrt{\eta a}) J_0(vR/\sqrt{a}).$$

$J_0(z), J_1(z), Y_0(z), Y_1(z)$  — функции Бесселя действительного аргумента [275]. Эти функции встроены в электронные таблицы Microsoft Excel. Несобственные интегралы лучше вычислять в специализированных программах, например в MathCAD. Отметим, что аналогичные в математическом отношении решения получены в теории теплопроводности твердых тел [97].

Приведем важные частные асимптотические решения для центра купола, так как это наиболее неблагоприятная точка подтопления. Введем безразмерный параметр времени (критерий Фурье) для радиальной в плане фильтрации

$$\tau = at/R^2. \quad (240)$$

В начальный период растекания круглого купола при  $\tau \leq 0,9$  с погрешностью не грубее 5 % можно применять асимптотическое решение для центра купола ( $r = 0$ ):

$$H_1 = H_n - \frac{2(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \exp\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right). \quad (241)$$

При  $\tau > 0,9$  (конечная стадия растекания купола) опускание центра купола ( $r = 0$ ) можно рассчитать по формуле

$$H_1 = H_n - (H_n - H_e) F_{\text{ц}}(\tau, \eta), \quad (242)$$

где  $F_{\text{ц}}(\tau, \eta)$  — функция, определяемая по графику на рис. 83.

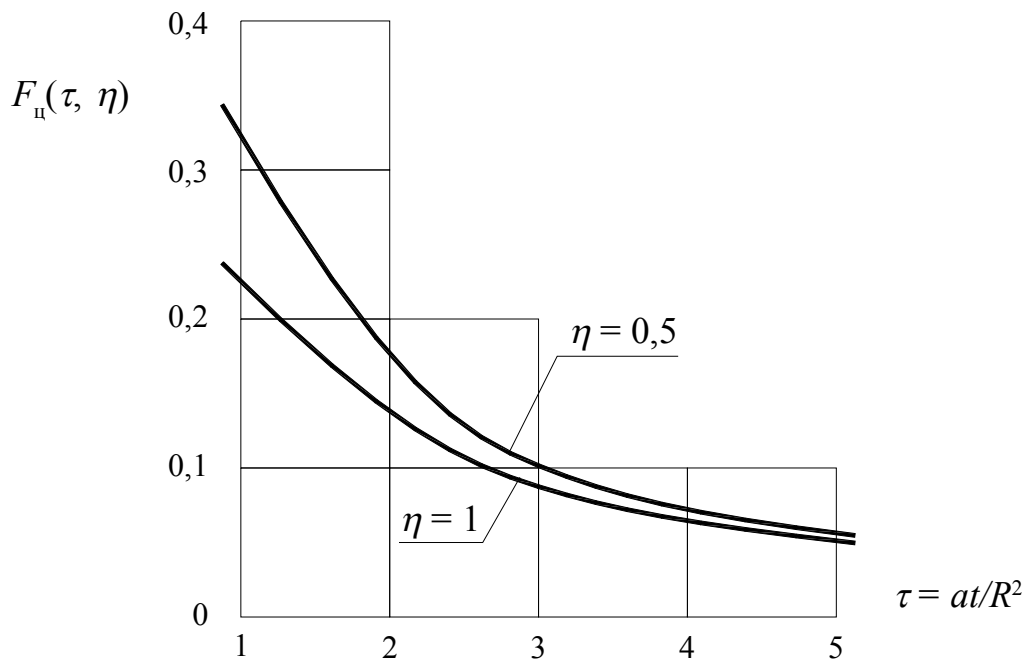


Рис. 83. К расчету опускания центра круглого купола

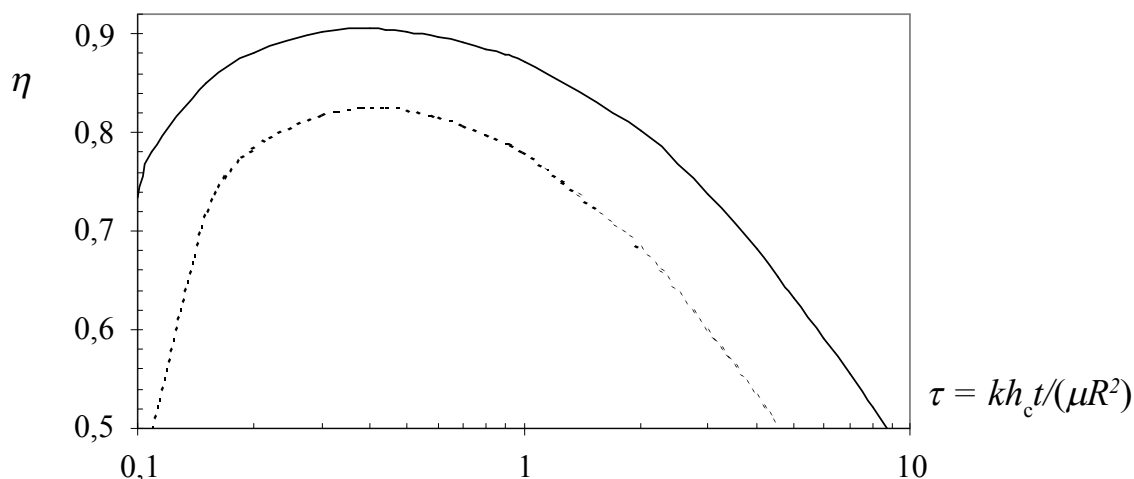


Рис. 84. Область учета снижения проницаемости при растекании круглого в плане купола грунтовых вод

Для однородного пласта формула (241) переходит в известную формулу А.Ж. Муфтахова [217] по расчету опускания центра круглого купола грунтовых вод ( $r = 0$ ) для любых времен:

$$H_1 = H_n - (H_n - H_e) \exp\left(-\frac{1}{4\tau}\right). \quad (243)$$

Другие зависимости А.Ж. Муфтахова для круглых в плане куполов в плано-однородных пластах (одно- и двухслойных в разрезе) приведены в справочном пособии к СНиП [208]. В коллективной монографии [151] опубликованы формулы В.К. Рудакова по расчету растекания куполов других плановых форм: прямоугольник, полуполоса и др. Формулы получены в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации.

На рис. 84 над сплошной кривой показана область, где с погрешностью менее 5 % в сторону занижения УГВ можно не учитывать уменьшение проницаемости водоносного пласта, например, под влиянием уплотнения от свайных фундаментов и от их наличия в пласте. Пунктирная кривая соответствует погрешности 10 %. Если точка попадает ниже кривых, то расчет необходимо проводить с учетом зон неоднородности грунтов оснований зданий и сооружений.

Отметим, что при  $\tau \geq 5,3$  с погрешностью не более 5 % любой круглый купол в неоднородном пласте с параметрами  $\eta = 1 \dots 0,5$  можно считать растекшимся.

Рассмотрим динамику подъема УГВ под вытянутым в плане зданием или сооружением при действии техногенного инфильтрационного питания интенсивностью  $\omega$  (м/сут) в виде полосы шириной  $2L$  (рис. 85).

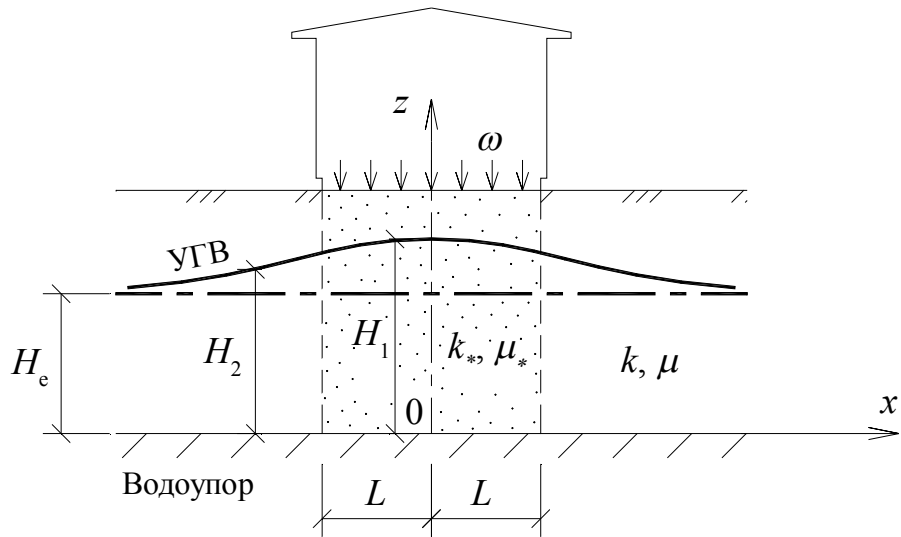


Рис. 85. Подъем УГВ под влиянием полосообразного очага техногенной инфильтрации воды в пределах здания

При достаточно глубоком водоносном горизонте задача в планово-неоднородном пласте может быть рассмотрена в гидравлической постановке. Исходную систему дифференциальных уравнений плоскопараллельной фильтрации воды можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} + \frac{\omega}{\eta k h_c} &= \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad |x| \leq L; \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad |x| \geq L; \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k. \end{aligned} \quad (244)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) &= H_2(x, 0) = H_2(\infty, t) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial x = 0; \\ \eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial x} &= \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial x}; \quad H_1(L, t) = H_2(L, t). \end{aligned} \quad (245)$$

Применив к системе уравнений (244) и краевым условиям (245) прямое и обратное преобразования Лапласа по времени [73; 74; 98], получим решения в виде [262]

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} + \frac{4 \omega t}{\mu (1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta})} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L - x}{2\sqrt{\eta}at} + \right.$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L+x}{2\sqrt{\eta at}} \Bigg]; \quad (246)$$

$$H_2 = H_e + \frac{4\omega t \bar{\mu} \sqrt{\eta}}{\mu(1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta})} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2nL}{2\sqrt{\eta at}} - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2L(n+1)}{2\sqrt{\eta at}} \right]. \quad (247)$$

Здесь  $i^2 \operatorname{erfc}(z)$  — специальная табулированная функция (кратный интеграл вероятности), значения которой приведены, например, в [275, с. 138]. Можно также воспользоваться рекуррентным соотношением

$$i^2 \operatorname{erfc}(z) = 0,5(z^2 + 0,5) \operatorname{erfc}(z) - z \exp(-z^2) / (2\sqrt{\pi}).$$

По коэффициенту  $\alpha$  см. пояснение к формулам (230) – (231).

Приведем некоторые частные асимптотические решения для центра поднимающегося купола при  $x = 0$ , так как здесь находится наиболее неблагоприятная точка подтопления. Безразмерный параметр времени (критерий Фурье) принимаем по (232).

В начальный период подъема центра купола под полосой техногенной инфильтрации (см. рис. 85) напор грунтовых вод при  $x = 0$  можно найти при соблюдении условия  $\tau \leq 6,8$  так:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left( 1 - \frac{8}{1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta}} i^2 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\eta \tau}} \right). \quad (248)$$

При больших временах ( $\tau > 6,8$ ) расчет подъема центра купола следует производить по другой формуле:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu \tau} \left[ 2\sqrt{\tau/\pi} + \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi \tau}} \right) \left( \frac{1}{2\eta} - 1 \right) \right]. \quad (249)$$

Таким образом, формулы (248) и (249) охватывают весь период подъема центра вытянутого в плане купола и в использовании сложной формулы (246) для расчета точки  $x = 0$  нет необходимости. Погрешность формул меньше 5 %. Отметим также, что зависимости (246) – (247) в случае однородного в плане пласта грунтовых вод переходят в известные формулы С.Ф. Аверьянова, приведенные в [6].



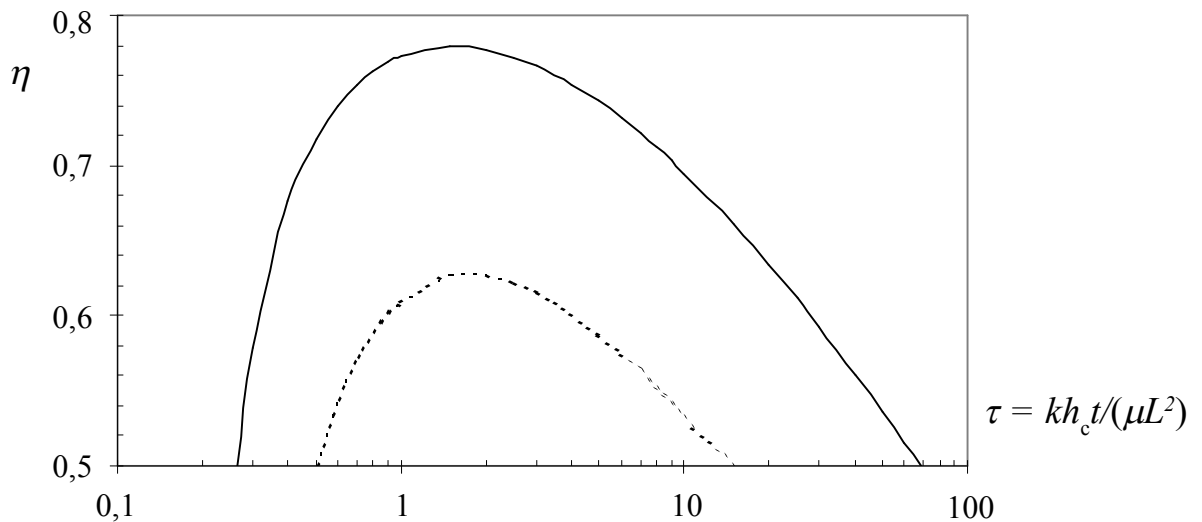


Рис. 86. Область учета снижения проницаемости под полосообразным очагом инфильтрации

Другие зависимости по подъему вытянутых в плане куполов под влиянием полосообразной инфильтрации в плано-однородных пластах (одно- и двухслойных в разрезе) приведены в справочном пособии к СНиП [208]. В книге [151] даны формулы В.К. Рудакова по расчету подъема куполов других плановых форм (прямоугольник, полуполоса и др.), в том числе в плано-неоднородных пластах.

На рис. 86 над сплошной кривой показана область, где с погрешностью менее 5 % в сторону занижения УГВ можно не учитывать уменьшение проницаемости водоносного пласта под зданием или сооружением в задачах прогноза подъема УГВ под влиянием полосообразной техногенной инфильтрации. Пунктирная кривая соответствует погрешности 10 %.

Динамика подъема УГВ под круглым в плане зданием или сооружением при действии техногенного инфильтрационного питания  $\omega$  (м/сут) в виде круга радиусом  $R$  (рис. 87) при достаточно глубоких грунтовых водах может быть описана линейной гидравлической теорией фильтрации.

Исходные дифференциальные уравнения радиальной фильтрации воды для данной задачи имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r} + \frac{\omega}{\eta k h_c} &= \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad r \leq R; \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad r \geq R; \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k. \end{aligned} \quad (250)$$

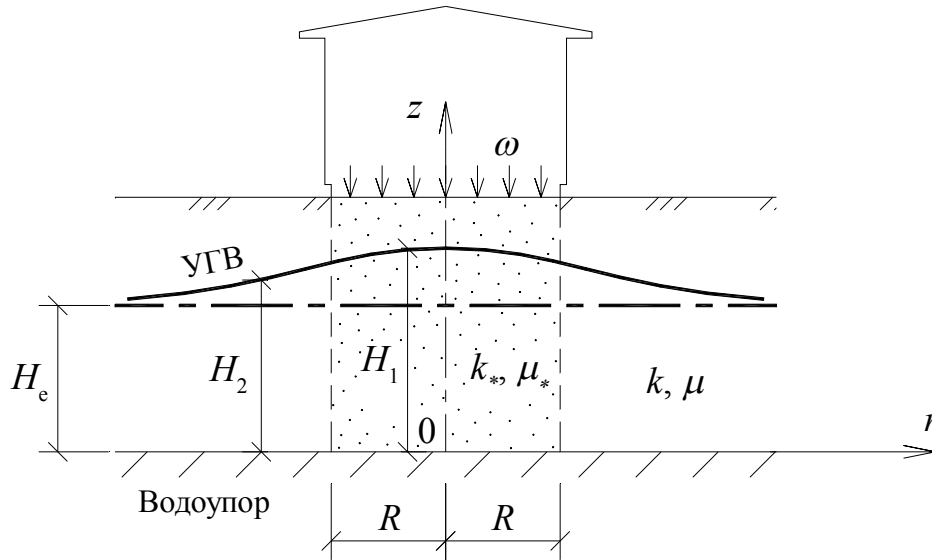


Рис. 87. Подъем УГВ под влиянием круглого в плане очага техногенной инфильтрации воды в пределах здания

Краевые условия:

$$H_1(r, 0) = H_2(r, 0) = H_2(\infty, t) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial r = 0;$$

$$\eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial r} = \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial r}; \quad H_1(R, t) = H_2(R, t). \quad (251)$$

После применения к системе уравнений (250) и краевым условиям (251) прямого и обратного преобразования Лапласа по времени [73; 74; 98] получим решения в виде [262]

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} - \frac{4 \omega \bar{\mu} \sqrt{\eta a}}{\pi^2 R \mu} F_{H1}; \quad (252)$$

$$H_2 = H_e + \frac{2 \omega \bar{\mu} \sqrt{\eta}}{\pi \mu} F_{H2}, \quad (253)$$

где несобственные интегралы

$$F_{H1} = \int_0^\infty \frac{J_0(vr/\sqrt{\eta a}) J_1(vR/\sqrt{\eta a}) [1 - \exp(-v^2 t)]}{v^4 [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv;$$

$$F_{H2} = \int_0^\infty \frac{J_1(vR/\sqrt{\eta a}) [Y_0(vr/\sqrt{a}) \psi(v) - J_0(vr/\sqrt{a}) \varphi(v)] [1 - \exp(-v^2 t)]}{v^3 [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv,$$

в которых

$$\begin{aligned}\varphi(\nu) &= J_0\left(\nu R/\sqrt{\eta a}\right)Y_1\left(\nu R/\sqrt{a}\right) - \bar{\mu}\sqrt{\eta}J_1\left(\nu R/\sqrt{\eta a}\right)Y_0\left(\nu R/\sqrt{a}\right); \\ \psi(\nu) &= J_0\left(\nu R/\sqrt{\eta a}\right)J_1\left(\nu R/\sqrt{a}\right) - \bar{\mu}\sqrt{\eta}J_1\left(\nu R/\sqrt{\eta a}\right)J_0\left(\nu R/\sqrt{a}\right).\end{aligned}$$

$J_0(z), J_1(z), Y_0(z), Y_1(z)$  — функции Бесселя действительного аргумента [275]. Они встроены в электронные таблицы Microsoft Excel. Интегралы легко вычисляются, например, в MathCAD.

Аналогичные в математическом отношении решения получены в теории теплопроводности твердых тел [97].

Приведем частные асимптотические решения для центра круглого очага техногенной инфильтрации как наиболее неблагоприятной точки подтопления. Безразмерный параметр времени (критерий Фурье) для радиальной в плане фильтрации используем по формуле (240).

Начальный подъем УГВ от действия круглого очага техногенной инфильтрации при  $\tau < 0,9$  можно рассчитать по асимптотическому решению для центральной точки ( $r = 0$ ) плано-неоднородного пласта (см. рис. 87):

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left\{ 1 - \frac{2}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[ \exp\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right) + \frac{1}{4\eta\tau} \text{Ei}\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right) \right] \right\}, \quad (254)$$

которое в случае плано-однородного пласта переходит в решение А.Ж. Муфтахова [156] для любых времен ( $r = 0$ ):

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{4\tau}\right) + \frac{1}{4\tau} \text{Ei}\left(-\frac{1}{4\tau}\right) \right\}. \quad (255)$$

Здесь  $\text{Ei}(z)$  — интегральная показательная функция [106, с. 734].

Для больших времен при  $\tau \geq 0,9$  подъем УГВ от действия круглого очага техногенной инфильтрации под центром здания или сооружения (см. рис. 87) можно рассчитать в плано-неоднородном пласте по следующей асимптотической формуле:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{4\mu\tau} \left( \ln \frac{4\tau}{C} + \frac{1}{\eta} \right), \quad (256)$$

где  $C \approx 1,781$  — константа Эйлера [106; 325].

Таким образом, формулы (255) и (256) охватывают весь период подъема центра круглого в плане купола под влиянием техногенной инфильтрации. Погрешность этих формул меньше 5 %.

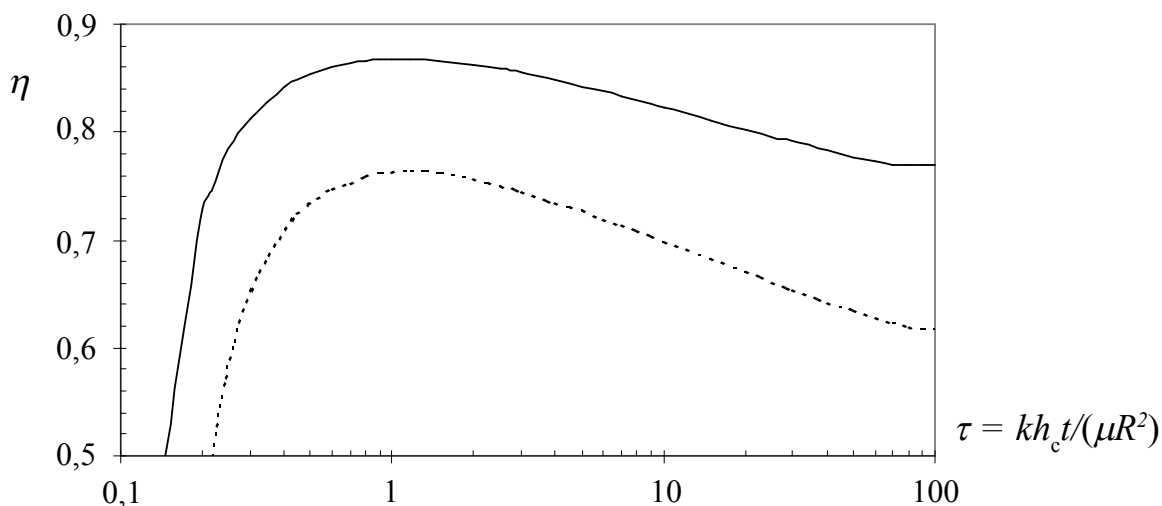


Рис. 88. Область учета снижения проницаемости под круглым в плане очагом инфильтрации

На рис. 88 над сплошной кривой показана область, где с погрешностью менее 5 % в сторону занижения УГВ можно не учитывать уменьшение проницаемости водоносного пласта под зданием или сооружением в задачах прогноза подъема УГВ под влиянием круглого в плане очага техногенной инфильтрации. Пунктирная кривая соответствует погрешности 10 %. Если точка попадает ниже кривых, то расчет необходимо проводить с учетом зон неоднородности грунтов оснований зданий и сооружений.

Рассмотренные задачи о растекании куполов грунтовых вод и подъеме УГВ под влиянием дополнительной техногенной инфильтрации в плано-неоднородном пласте, образовавшемся вследствие уплотнения грунта под зданием или сооружением, рассмотрены для самого простейшего случая линейной гидравлической теории фильтрации [262; 263]. При грунтовых водах малой мощности, когда изменения УГВ превышают 0,1–0,2 их мощности, а также в первоначально необводненных грунтах математические постановки рассматриваемого процесса подтопления становятся существенно нелинейными. Поэтому такие задачи не поддаются аналитическому решению и их необходимо моделировать.

В справочном пособии к СНиП [208] даны решения по растеканию вытянутых и круглых в плане куполов грунтовых вод, а также куполообразный подъем УГВ под влиянием техногенного дополнительного инфильтрационного питания. Решения приведены как в гидродинамической, так и в гидравлической постановках. В разрезе водоносные пласты рассмотрены одно- и двухслойные, изотропные и анизотропные по проницаемости. В плане эти задачи решены по схеме однородного пласта. Поэтому решения по куполам грунтовых вод, приведенные в настоящей монографии, могут служить как дополнение к [208].

*Расчет барражного эффекта зданий и сооружений.* Здания и сооружения своими непроницаемыми или слабопроницаемыми подземными частями и фундаментами могут перекрыть фильтрационные потоки подземных вод (см. примеры 3 и 11). Такое явление называют барражным эффектом, что аналогично действию плотин, подпирающих потоки воды. В результате барражного эффекта с верховой стороны потока уровень подземных вод (УПВ) повышается, а ниже по течению — понижается (рис. 89). Наиболее сильно подпор наблюдается вблизи подземной преграды (здания, сооружения), перекрывающей фильтрационный поток. С удалением от возмущающей преграды УПВ выходит на естественный уровень. Таким образом, имеются некоторые зоны влияния подпора: фронтальная  $L_{\text{вл}}$  и боковая  $B_{\text{вл}}$  (рис. 90).

В нашей кандидатской диссертации [262] была рассмотрена стационарная постановка таких задач с линеаризованными уравнениями фильтрации. В настоящей работе барражный эффект рассмотрен шире, дополнен нестационарными и нелинейными постановками. Дополнительно уточнены критерии зон подпора. Аналитический метод подкреплен моделированием с помощью МКР-Excel. Дополнительно использован инструментарий PDETOOL компьютерной системы MatLab 5/6, в основе которого положен метод конечных элементов (МКЭ). Обоснована аппроксимация прямоугольных в плане зданий, создающих барражный эффект, эллиптическими включениями.

Подпор за счет барражного эффекта здания при стабилизации потока можно приближенно рассчитать в линеаризованной постановке по I способу. Для задач подпора УПВ такой способ линеаризации уравнения Буссинеска был обоснован П.Я. Полубариновой-Кочиной [198; 199] и Н.П. Курановым [118] как наилучшее приближение к нелинейному решению. Барражный эффект от прямоугольного в плане одиночного здания или сооружения, под которым коэффициент фильтрации грунта уменьшился от  $k$  до  $k_*$ , может быть рассчитан в виде изменения УПВ (см. рис. 89 и рис. 90)

$$\Delta h = \frac{q_0 \sigma \gamma a}{k h_c (\xi^2 + \gamma^2)};$$

$$\sigma = (1-\eta)/(1+\eta); \quad \eta = k_*/k; \quad \xi = (x \pm a)/(a+b); \quad \gamma = (y \pm \beta)/(a+b);$$

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(x^2 - y^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2 y^2} + x^2 - y^2 - a^2 + b^2 \right] \right\}^{0,5};$$

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(x^2 - y^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2 y^2} - x^2 + y^2 + a^2 - b^2 \right] \right\}^{0,5}, \quad (257)$$

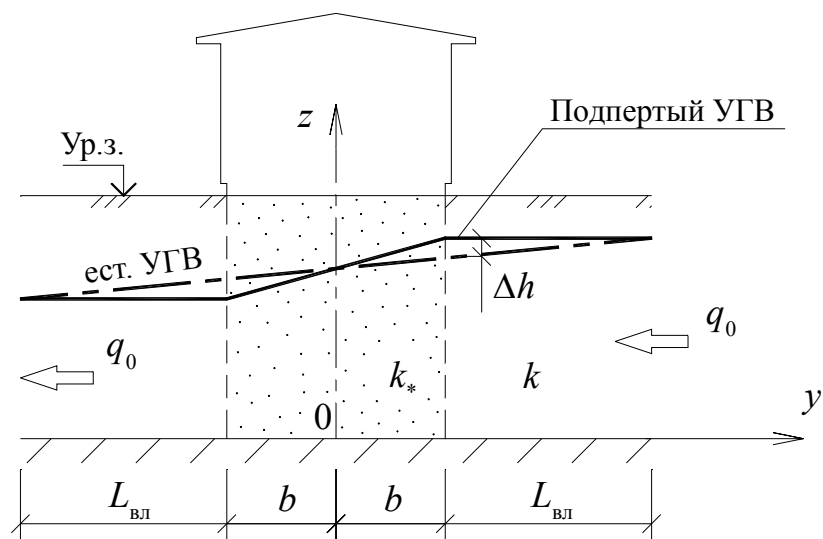


Рис. 89. Барражный эффект здания (разрез)

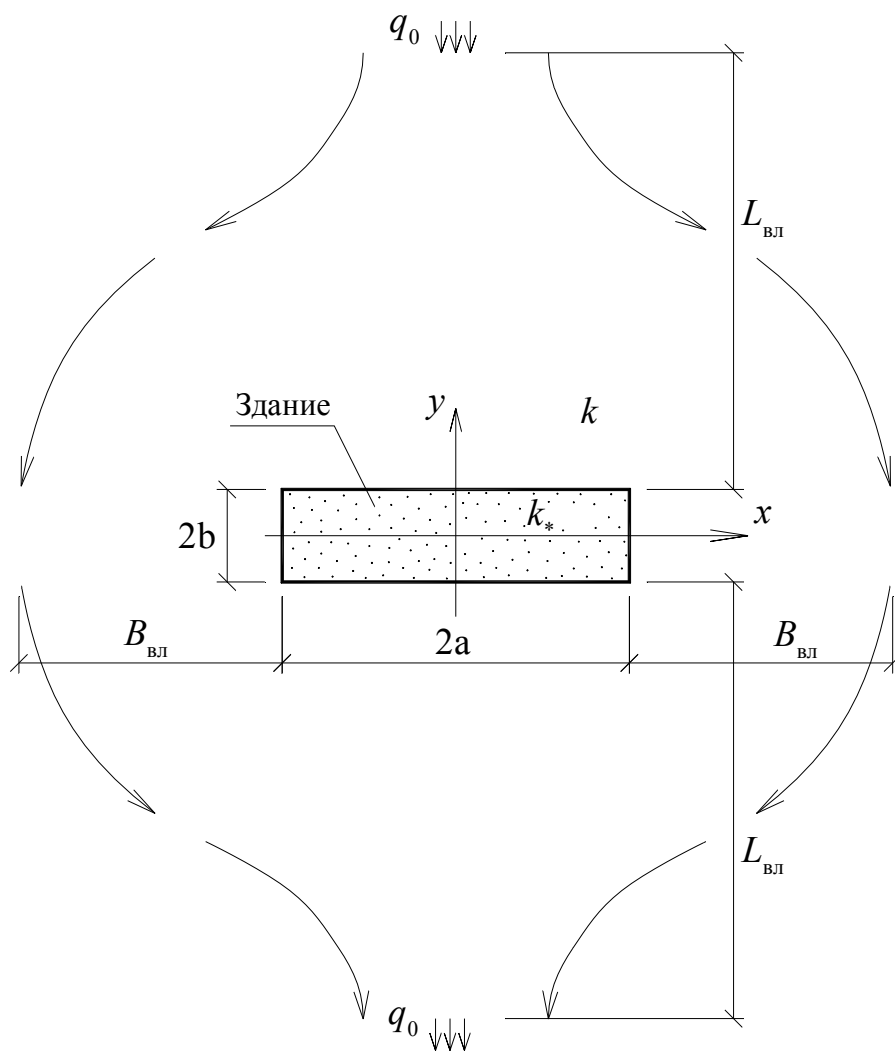


Рис. 90. Барражный эффект здания (вид в плане)

где  $q_0$  — удельный расход естественного потока подземных вод;  $h_c$  — средняя мощность грунтовых вод;  $\xi, \gamma$  — относительные координаты эллиптического цилиндра, при определении  $\xi$  брать знак плюс “+” для точек  $x > 0$  и знак минус “–” для  $x < 0$ , аналогично для  $\gamma$  — знак плюс “+” для точек  $y > 0$  и знак минус “–” для  $y < 0$ ; остальные обозначения показаны на рис. 89 и 90. В случае напорных подземных вод в данной формуле вместо  $h_c$  принять  $M$  — мощность водоносного пласта.

Формула (257) модернизирована. Первоначально она была получена нами методом конформного отображения внешности эллипса на внешность круга [262]. Теперь в ней использован принцип миделевого сечения, принятый в промышленной гидроаэромеханике и кораблестроении [30]. Этот прием оказался существенно точнее. Расхождение дополнительных подпоров  $\Delta h$ , подсчитанных по формуле (257) со значениями тестовой модели МКР-Excel с количеством узлов 22500 не превысило 3-4 %, что достаточно надежно.

Дополнительный подпор УПВ  $\Delta h_y$  вдоль оси  $y$  можно выразить из формулы (257) в более простом виде

$$\Delta h_y = \frac{q_0 \sigma(a+b)a}{kh_c \left[ y + \sqrt{y^2 + a^2 - b^2} \right]}. \quad (258)$$

Зона фронтального влияния (см. рис. 89 и рис. 90) с погрешностью определения УПВ 10 % или 5 % может быть определена соответственно как

$$L_{\text{вл}} = (2,5 \dots 3)a, \quad (259)$$

причем формула (259) получена моделированием двумерных плановых задач по барражному эффекту с помощью МКР-Excel. Обратим внимание, что зону фронтального влияния барражного подпора УПВ  $L_{\text{вл}}$  следует отсчитывать от кромки здания или сооружения (см. рис. 89 и 90).

Зона бокового влияния (см. рис. 90) с погрешностью определения УПВ 10 % или 5 % может быть найдена соответственно так:

$$B_{\text{вл}} = (1,5 \dots 2)a. \quad (260)$$

Эта формула также основана на модельных экспериментах. Величина  $B_{\text{вл}}$  отсчитывается от кромки здания или сооружения (см. рис. 90).

При набегании потока подземных вод под углом к зданию следует вектор потока  $q_0$  разложить на две составляющие по осям координат, рассчитать подпор по формуле для каждой составляющей и сложить по принципу суперпозиции. При малой мощности грунтовых вод эта задача становится нелинейной и ее рекомендуется моделировать с помощью МКР-Excel.

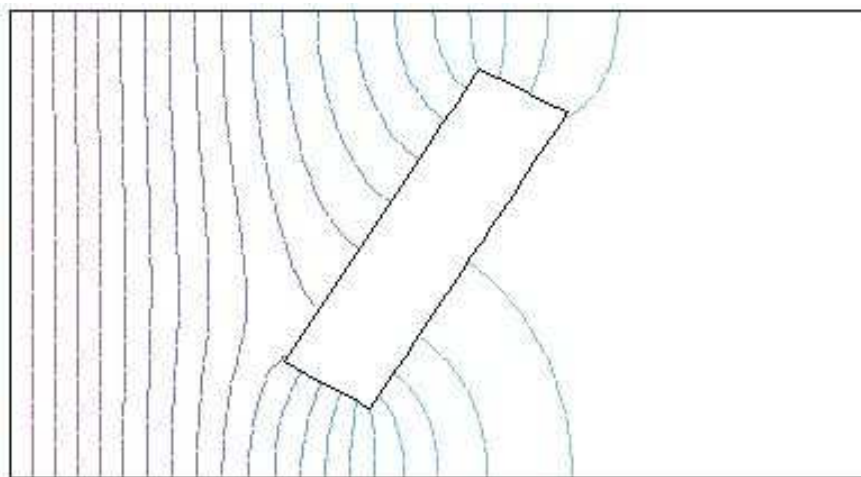


Рис. 91. Нестационарное обтекание здания потоком подземных вод (в плане)

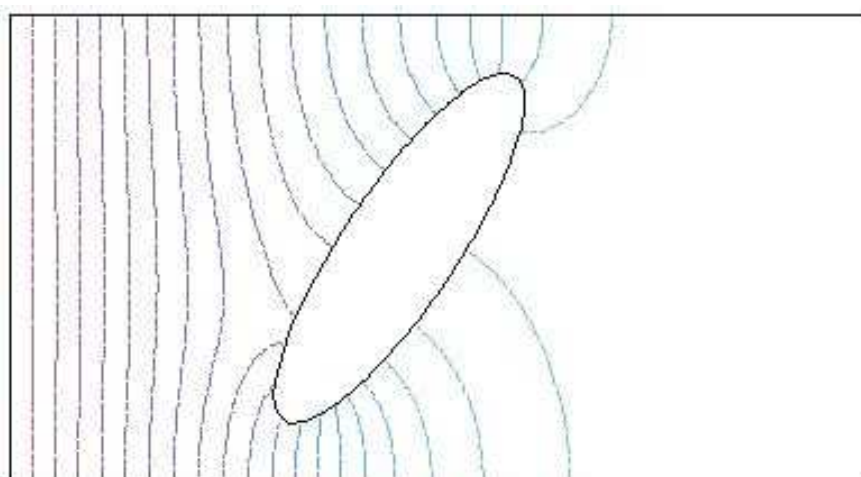


Рис. 92. Нестационарное обтекание эллиптического включения потоком подземных вод (в плане)

В дополнение к ранее проведенным исследованиям обоснована аппроксимация прямоугольных в плане зданий, создающих барражный эффект, эллиптическими включениями в процессе нестационарной фильтрации грунтовых вод. Это проиллюстрировано на рис. 91 и 92 и отражено в вышеприведенной формуле (257). Сравнивая оба рисунка, нетрудно заметить их сходство.

Обнаружена закономерность, что наиболее сильно подпор подземных вод застройкой проявляется при нестационарных процессах фильтрации. Дополнительное повышение УПВ при набегании потока происходит с верховой стороны в любом режиме, однако больший барражный эффект наблюдается при образовании с верховой стороны нового техногенного горизонта и надвигании на застройку языка подтопления. Последний процесс является не



только нестационарным, но и нелинейным. Достоверно он просчитывается на нелинейных моделях МКР-Excel. Попутно отметим, что пакет PDETOOL системы MatLab 5/6 фирмы MathWorks (США) не способен решать такие задачи.

#### Пример 45. Подпор станцией метро грунтовых вод

После сдачи метрополитена в эксплуатацию прекратится строительный водоотлив и водопонижение. Пониженные вблизи метрополитена уровни грунтовых и напорных вод будут стремиться возвратиться в исходное естественное положение до строительства, но полностью воссоздать его они уже не смогут, так как в гидрогеологическую среду города вторглись подземные конструкции метрополитена.

Метро мелкого заложения пересекает естественные пути фильтрации подземных вод, общее направление которых показано стрелками на рис. 7. Подпор потоков грунтовых и напорных вод ожидается на территории, примыкающей с восточной стороны трассы метро в районе станций «Б. Хмельницкого» и «Маяковской» со «стенами в грунте», а также подпор от некоторых перегонов между станциями, сооружаемыми закрытым способом щитовой проходки и попадающими своими конструкциями поперек фильтрационных потоков.

Приведем пример расчета барражного эффекта метрополитена, заимствованный из нашей научно-исследовательской работы [206].

Фрагмент гидрогеологической карты гидроизогипс (УГВ) и гидроизопьез (УНПВ) в районе станции «Б. Хмельницкого» показан на рис. 93. Ориентация стран света обычная: вверх север, вниз юг.

На рис. 93 показаны естественные положения уровней подземных вод до строительства метрополитена. Уклоны земной поверхности, УГВ и УНПВ направлены с востока на запад и отличаются весьма незначительно между собой как по величине, так и по направлению. Средние уклоны поверхности земли, УГВ и УНПВ на рассматриваемом участке  $I_n = I_r = I_{\text{н}} = 0,01$ . Средняя мощность грунтовых вод  $h_{\text{г}} = h_{\text{с}} = 1,5 \text{ м}$  с коэффициентом фильтрации супеси  $k = 0,4 \text{ м/сут.}$  Средняя мощность напорного пласта  $M = 8,5 \text{ м}$  с коэффициентом фильтрации суглинка  $k = 0,12 \text{ м/сут.}$  Потоки подземных вод направлены под углом к центральной оси станции, соответственно  $\varphi_r = 7^\circ$  — грунтовые и  $\varphi_n = 19^\circ$  — напорные воды (см. рис. 93). Размеры станции в плане: длина  $2a = 280 \text{ м}$ , ширина  $2b = 20 \text{ м}$ .

Потоки грунтовых вод перекрываются конструкцией станции «Б. Хмельницкого» со «стеной в грунте» полностью, поэтому они будут обтекать станцию в плане как непроницаемое включение, образуя зону повышения (подпора) УГВ восточнее станции и зону понижения УГВ западнее.

Рассчитаем подпор УГВ за счет барражного эффекта станции с допустимой погрешностью результатов 10 %, что соответствует точности исходных данных инженерно-гидрогеологических изысканий на данном объекте.

Зону фронтального влияния на поток грунтовых вод с погрешностью определения УГВ 10 % найдем по формуле (259)

$$L_{\text{вл}} = 2,5a = 2,5 \cdot 140 = 350 \text{ м},$$

а зону бокового влияния на поток грунтовых вод — по формуле (260)

$$B_{\text{вл}} = 1,5a = 1,5 \cdot 140 = 210 \text{ м}.$$

Так как бетонные стены станции непроницаемы и коэффициент фильтрации стен  $k_* = 0$ , то в формуле (257) параметр

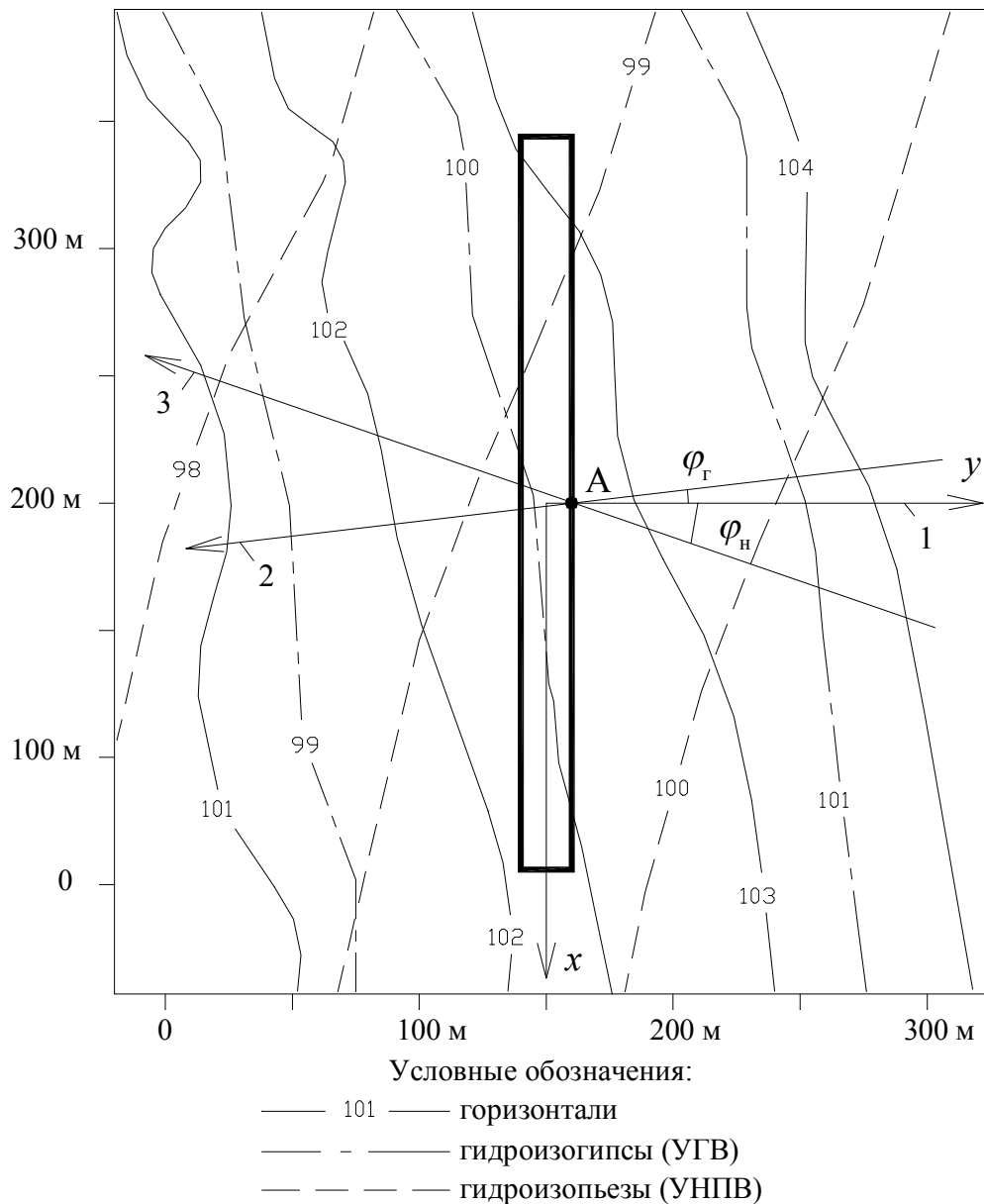


Рис. 93. Фрагмент гидрогеологической карты: 1 — центральная ось станции; 2 — направление потока грунтовых вод; 3 — направление потока напорных подземных вод

$$\sigma = (1 - k_*/k)/(1 + k_*/k) = (1 - 0/0,4)/(1 + 0/0,4) = 1.$$

Максимальное дополнительное повышение (подпор) УГВ  $\Delta h_{\max}$  в точке А (см. рис. 93) при  $x = 0$  и  $y = b$  найдем по формуле (257), которая упрощается до вида

$$\Delta h_{\max} = [q_0/(kh_c)] \sigma \alpha \cos \varphi_{\Gamma} = I_{\Gamma} \sigma \alpha \cos \varphi_{\Gamma} = 0,01 \cdot 1 \cdot 140 \cos 7^\circ = 1,39 \text{ м},$$

где с помощью косинуса учтен угол набегания потока грунтовых вод на массив станции (см. рис. 93). Так как угол  $\varphi_{\Gamma}$  небольшой, то перекося конструкции станции относительно направления потока грунтовых вод почти не уменьшает подпор. Значение  $\Delta h_{\max}$  показывает, что в этом месте грунтовые воды почти выйдут на поверхность земли (сравните гидроизогипсы и горизонтали на рис. 93), что может вызвать заболачивание территории.

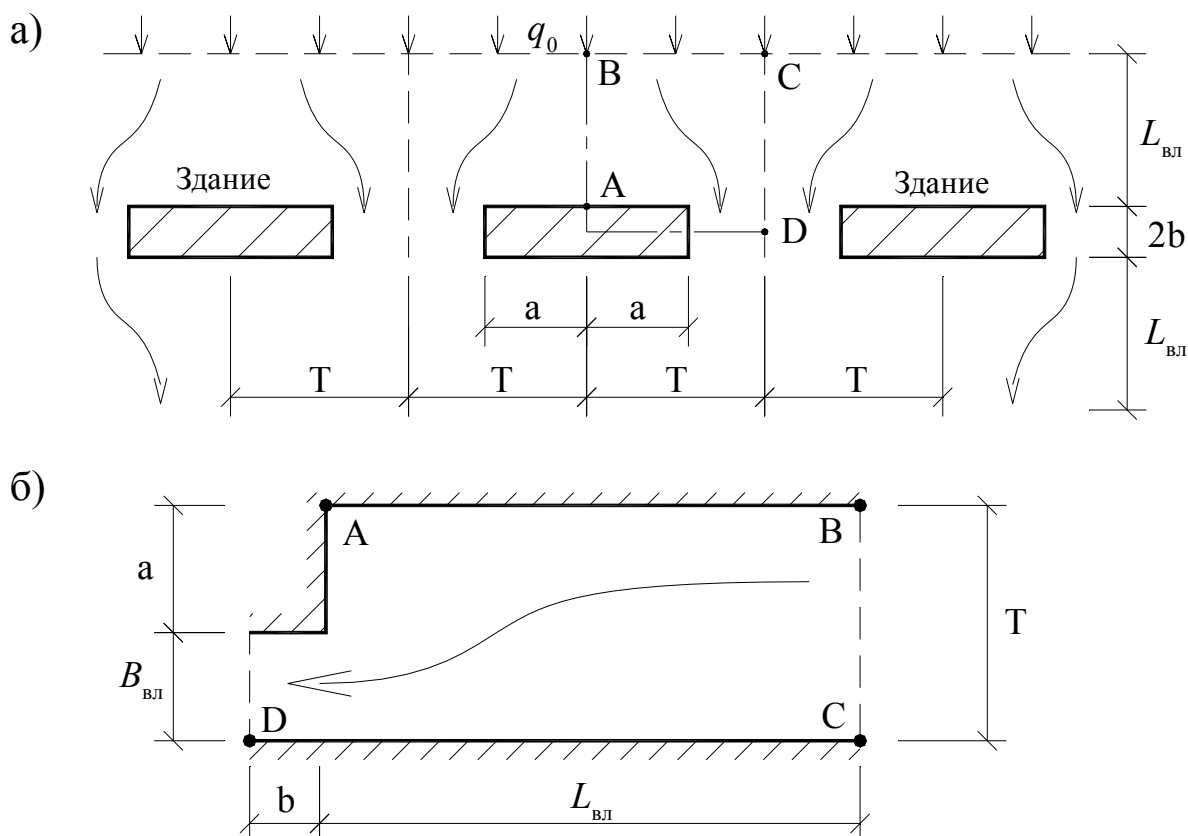


Рис. 94. Барражный эффект группы вытянутых зданий: а — план зданий; б — расчетная схема обтекания прямоугольной преграды в полосе

Барражный эффект можно рассчитать, комбинируя известные методы фильтрационных сопротивлений, фрагментов и конформных отображений [13; 152; 186]. Покажем способ, как можно вывести приближенные формулы по расчету барражного эффекта с помощью этих упомянутых методов.

Рассмотрим регулярное расположение зданий или сооружений в виде ряда поперек потока подземных вод (рис. 94, а). Выделим полосу по ходу движения потока в контуре точек А, В, С, D (рис. 94, б).

Запишем формулу для вычисления максимального дополнительного подпора  $\Delta h_{\text{max}}$  от барражного эффекта в центральной точке А перед зданием, расположенной со стороны набегающего потока подземных вод (см. рис. 94,а). Находим в [13, с. 221] модуль формы, соответствующий схеме преграды в полосе, показанной на рис. 94, б. Модуль формы дан по Н.Н. Павловскому для абсолютно непроницаемой преграды. Расширим задачу введением параметра  $\sigma$  из формулы (257) для учета случая слабопроницаемых преград, например зданий на свайных фундаментах. Тогда получим приближенную зависимость для расчета максимального дополнительного подпора подземных вод за счет барражного эффекта ряда вытянутых зданий в виде

$$\Delta h_{\max} = \frac{2q_0 \sigma L_{\text{вл}}}{\pi k h_c} \ln \left\{ \operatorname{ctg} \left[ \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{a}{T} \right) \right] \right\}, \quad (261)$$

которая действительна при соотношениях размеров зданий в плане

$$b/a \leq 0,1,$$

что проверено моделированием с помощью МКР-Excel. Погрешность менее 2–3 %.

#### Пример 46. Барражный эффект от группы зданий

Используем исходные данные по грунтовым водам из примера 45. Коэффициент фильтрации грунта в естественном залегании  $k = 0,4 \text{ м/сут}$ . Уклон УГВ  $I = 0,01$ . Здания расположены в виде ряда поперек потока грунтовых вод, как показано на рис. 94, а. Размеры зданий в плане:  $a = 140 \text{ м}$ ;  $b = 10 \text{ м}$ . Расстояния между осями зданий в ряду  $2T = 420 \text{ м}$ . Зона фронтального влияния зданий по формуле (259)  $L_{\text{вл}} = 2,5 \cdot 140 = 350 \text{ м}$ . Соотношение  $b/a = 10/140 = 0,07 < 0,1$ . Поэтому используем формулу (261) для нахождения максимального дополнительного подпора  $\Delta h_{\max}$  от барражного эффекта в центральной передней точке здания А (см. рис. 94, а). Учитывая, что уклон потока грунтовых вод

$$I = q_0 / (k h_c),$$

находим по (261) для зданий с непроницаемыми стенами

$$\Delta h_{\max} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 350}{\pi} \ln \left\{ \operatorname{ctg} \left[ \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{140}{210} \right) \right] \right\} = 2,93 \text{ м}.$$

Если коэффициент фильтрации под зданиями  $k_* = 0,2 \text{ м/сут}$ , то параметр

$$\sigma = (1 - k_*/k)/(1 + k_*/k) = (1 - 0,2/0,4)/(1 + 0,2/0,4) = 1/3$$

и величина максимального подпора

$$\Delta h_{\max} = 0,98 \text{ м}.$$

Сравним с результатом примера 45, где получился максимальный подпор от одиночного непроницаемого здания

$$\Delta h_{\max} = 1,93 \text{ м}.$$

Группа зданий стесняет в большей степени поток грунтовых вод, так как зона бокового влияния  $B_{\text{вл}} = 70 \text{ м}$  (см. рис. 94, б) гораздо меньше, чем у одиночного здания. Поэтому максимальный подпор от группы непроницаемых зданий примерно в полтора раза больше, чем от одиночной станции метро.

При неполном перекрытии конструкциями потока подземных вод возникает плосковертикальное обтекание преграды. Например, на рис. 95 показана станция метро со «стенами в грунте», частично перекрывающая поток напорных подземных вод (НПВ). Конструкция станции является абсолютно водоупорной преградой, так как проникновение воды в метро недопустимо.

В данном случае для расчета барражного эффекта можно применить следующий прием: мысленно заменим конструкцию станции в напорном пото-



$$q = \frac{\Delta H_{\text{общ}}}{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4},$$

где  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  — фильтрационные сопротивления фрагментов соответственно длиной  $L_{\text{вл}}, b, b$  и  $L_{\text{вл}}$ .

Значения  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  определяем с использованием [13] и получаем

$$\begin{aligned}\xi_1 = \xi_4 &= \frac{1}{k} \left( \frac{L_{\text{вл}}}{M} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M} \right); \\ \xi_2 = \xi_3 &= \frac{1}{k} \left( \frac{b}{M_{\text{д}}} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M_{\text{д}}} \right),\end{aligned}$$

где обозначения см. рис. 95.

С другой стороны, тот же фильтрационный расход, но при замене конструкции преграды в пласте на эквивалентную завесу шириной  $2b$  с коэффициентом фильтрации  $k_*$ , можно записать в виде

$$q = \frac{\Delta H_{\text{общ}}}{\xi_5 + \xi_6 + \xi_7},$$

где  $\xi_5, \xi_6, \xi_7$  — фильтрационные сопротивления зон соответственно подпора длиной  $L_{\text{вл}}$  с коэффициентом фильтрации  $k$ , завесы шириной  $2b$  с коэффициентом фильтрации  $k_*$  и зоны понижения УНПВ длиной  $L_{\text{вл}}$  с коэффициентом фильтрации  $k$ .

Значения этих сопротивлений по закону Дарси записываются так:

$$\xi_5 = \xi_7 = \frac{L_{\text{вл}}}{kM}; \quad \xi_6 = \frac{2b}{k_*M}.$$

Приравнявая выражения расходов, после выкладок получим формулу для вычисления коэффициента фильтрации эквивалентной завесы  $k_*$ , заменяющей конструкцию преграды в напорном потоке в виде

$$k_* = \frac{kb}{M} \left\{ \frac{b}{M_{\text{д}}} - \frac{2}{\pi} \ln \left[ \left( \sin \frac{\pi m}{2M} \right) \left( \sin \frac{\pi m}{2M_{\text{д}}} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (263)$$

Полученная формула вобрала в себя методы фильтрационных сопротивлений, фрагментов и конформных отображений. Она проверена моделированием с помощью МКР-Excel.

### Пример 47. Подпор станцией метро напорных подземных вод

Потоки напорных подземных вод (НПВ) мощностью  $M = 8,5$  м перекрываются конструкциями станции метрополитена «Б. Хмельницкого» частично, поэтому оттекание будет происходить не столько в плане (см. рис. 93), сколько в разрезе (см. рис. 95). Расстояние от дна станции до водоупорной подошвы  $M_d = 5,3$  м, а от низа стены в грунте до водоупора  $m = 1,5$  м. Другие исходные данные см. в примере 45. Определим максимальный подпор НПВ (барражный эффект) перед станцией при  $y_L = L_{вл} = 350$  м (см. рис. 95).

По (263) находим коэффициент фильтрации эквивалентной завесы

$$k_* = \frac{0,12 \cdot 10}{8,5} \left\{ \frac{10}{5,3} - \frac{2}{\pi} \ln \left[ \left( \sin \frac{\pi \cdot 1,5}{2 \cdot 8,5} \right) \left( \sin \frac{\pi \cdot 1,5}{2 \cdot 5,3} \right) \right] \right\}^{-1} = 0,043 \text{ м/сут.}$$

По (262) рассчитываем максимальный дополнительный подпор

$$\Delta H = 350 \cdot 0,01 \left[ 1 - \frac{350 + 10}{350 + 10(0,12/0,043)} \right] \cos 19^\circ = 0,17 \text{ м.}$$

Таким образом, в отличие от подпора грунтовых вод (см. пример 45) напорные потоки станцией «Б. Хмельницкого» почти не подпираются, барражный эффект несущественный и им можно пренебречь.

Подведем итоги данного, довольно большого, параграфа.

Начав с простейшего прогноза равномерного подъема уровня грунтовых вод, мы подчеркнули, что УГВ беспрестанно подниматься не может. УГВ не обязательно достигнет отметки уровня земной поверхности. Испарение с поверхности УГВ может в радиационно светлый период года (лето) приостановить подъем УГВ. Этот процесс в условиях городской застройки может быть приближенно подсчитан по методике, изложенной в § 2.

Максимально возможные уровни сезонной верховодки на слабопроницаемых геологических и техногенных линзах можно спрогнозировать при стационарном процессе фильтрации по зависимостям, выведенным в данном параграфе.

Рассмотрены прогнозы подпора водоемами уровня грунтовых вод малой мощности и при образовании нового техногенного горизонта грунтовых вод. Разработан новый комбинированный метод автомодельных движений в сочетании с численным моделированием МКР-Excel (АДЧМ), с помощью которого получено точное решение для радиуса круглого в плане языка подтопления. Методом интегрального баланса найдены приближенные решения для языков подтопления на маломощных грунтовых водах.

Уточнены прогнозы куполов и потоков подземных вод в условиях плановых неоднородностей, порождаемых застройкой. Рекомендованы асимптотические решения с границами их применимости, даны зоны влияния на УГВ.

## § 17. Фильтрационные расчеты водоотлива, водопонижения и дренажа

В период строительства может происходить фильтрация подземных вод к открытым выемкам (траншеям и котлованам), а также к подземным выработкам. Характер фильтрации зависит:

- от гидрогеологического сложения грунтов в разрезе и плане;
- конструктивных и планировочных решений застройки на рассматриваемой территории;
- технологии и организации строительства.

Вследствие особенностей характера фильтрации расчеты можно подразделить по движению подземных вод к выемкам и выработкам:

- в однородных водоносных пластах;
- естественно-неоднородных пластах;
- техногенно-неоднородных пластах.

Схема однородного изотропного пласта может быть принята для первоначальных расчетов в большинстве случаев. При наличии естественной гидрогеологической неоднородности по вертикали (в разрезе) и в горизонтальном направлении (плановая неоднородность) фильтрационные расчеты могут быть выполнены, но они значительно усложняются. Более достоверным способом в этом случае является моделирование (см. § 28). То же самое относится к учету техногенной неоднородности, связанной с уплотнением грунтов в процессе строительства, внедрением непроницаемых и слабопроницаемых конструкций в водоносные грунты. В последнем случае также могут быть проделаны фильтрационные расчеты, достаточно схематизированные. Окончательный прогноз подтопления и дренирования лучше уточнять моделированием.

В технологии городского строительства применяют водоотлив, водопонижение и дренаж как активные методы борьбы с подтоплением. Водоотлив из котлованов и траншей имеет самую простую технологию откачки насосами грунтовых вод из открытых строительных выемок и подземных выработок в период строительства. Водопонижение скважинами и иглофильтрами технологически выполнить гораздо сложнее, но защита от подтопления получается надежнее, но тоже лишь на период строительства. Дренаж могут устраивать временно на период строительства, но чаще всего его делают капитальным, на весь срок эксплуатации объекта строительства. Перечисленные особенности накладывают отпечаток на методики фильтрационного расчета и моделирования строительного водоотлива, водопонижения и дренажа. Водоотлив и водопонижение нужно рассчитывать при нестационарном, а дренажи — при стационарном или нестационарном режиме фильтрации. Кроме того, в условиях городской застройки необходимо учитывать измене-



ние проницаемости грунтов оснований в период строительства и эксплуатации объектов (см. § 15 и 25).

Водоотлив из строительных выемок (котлованов и траншей) и выработок (тоннелей и шахт) может производиться в два этапа. На первом этапе откачивается вода из емкости выемки или выработки. При этом происходит снижение уровня воды в их емкости и одновременный водоприток подземных вод в нестационарном режиме. Если поблизости в водоносном пласте имеется граница I рода с постоянным напором, то через некоторое время наступает второй этап стационарной фильтрации. Возможен также случай, когда при высокопроизводительных насосных установках уровень воды в выемке достигает дна и тогда приток подземных вод происходит при постоянном напоре в месте водоотлива — это разновидность второго этапа водоотлива. В производственных условиях при выполнении земляных работ с водоотливом возможна аварийная остановка насосов по различным причинам. Тогда происходит наполнение емкости выработки или выемки. Такой случай тоже необходимо предусматривать в фильтрационных расчетах водоотлива. Если же водоотлив ведется с перерывами и, кроме того, в условиях неоднородных грунтов оснований городской застройки, то фильтрационные расчеты становятся слишком сложными и проектирование водоотлива лучше моделировать (см. § 28).

В некоторых производственных и учебных изданиях фильтрационные расчеты водоотлива трактуют упрощенно. В лучшем случае применяют формулы Дюпюи для установившегося водопритока в совершенные траншеи и котлованы в однородном пласте конечной мощности. Иногда ограничиваются лишь таблицей водопритока подземных вод на метр квадратный дна котлована в зависимости от типа грунта. Такие методики не позволяют учесть множество особенностей технологии городского строительства и гидрогеологии городов.

Из достаточно проработанных, с аналитическими методами по расчету водоотлива, следует отметить книги [229] и [267]. В работе А.Б. Сотникова [267] рассмотрены гидрогеологические прогнозы при строительстве в суровых климатических условиях, главным образом, Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМа). Аналитические зависимости в [267] позволяют сделать приближенный прогноз водоотлива, в том числе с учетом барражного эффекта при частичном перемерзании фильтрационного потока. Книга Б.Г. Самсонова [229] содержит методику прогноза притоков подземных вод к разведочным горным выработкам с учетом их строительного развития во времени. Все эти методики построены в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации [198; 199] со всеми свойственными ей приближенными постановками.

При проектировании водоотлива необходимо составить прогноз водопритоков, прогноз понижения УПВ и оценить возможные последствия применения водоотлива на разрабатываемые грунты и окружающую территорию застройки. В простых случаях, в первом приближении это можно рассчитать по аналитическим зависимостям. Окончательно лучше произвести прогноз моделированием.

Так как водоотлив предназначен в основном для стадии строительства, то его нужно рассчитывать при нестационарном режиме фильтрации. Наиболее простой является методика расчета водоотлива при постоянном напоре в строительных выемках и выработках. Фильтрационные расчеты водоотлива из котлованов и траншей и соответственно расчеты водопритоков в пластовые и ленточные дренажи почти идентичны.

Существующие методики фильтрационного расчета водоотлива используют линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации [198; 199]. Ниже приведены решения без линеаризации гидравлической теории, то есть без введения средней мощности грунтовых вод.

Водоприток грунтовых вод в гидродинамически несовершенную траншею в однородном однослойном пласте (рис. 96) можно рассчитать формуле Дюпюи, уточненной по методу фильтрационных сопротивлений С.Н. Нумерова [11] — Ю.П. Борисова [31]. При постоянном напоре в траншее  $h_t$  односторонний водоприток

$$q = \frac{k(h_e^2 - h_t^2)}{2L_t(1 + \zeta)}, \quad (264)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации водоносного пласта;  $L_t$  — расчетная длина области питания траншеи (для расчета водопритока), которая примерно в два раза меньше истинной зоны влияния на УГВ  $L_{вл}$  [314];  $h_e$  — напор грунтовых вод в естественном залегании (или в условиях техногенного подтопления);  $h_t$  — напор в траншее;  $\zeta$  — дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенной траншеи, которое возникает вследствие искривления линий тока фильтрационного потока, притекающего из грунта в траншею (см. рис. 96).

Моделирование МКР-Excel профильных задач фильтрации грунтовых вод при водоотливе из траншей в гидромеханической постановке позволило выбрать наиболее точные существующие методики для определения сопротивления  $\zeta$ .

Для нешироких траншей при  $B/m \leq 1$  с погрешностью менее 1-2 % величину  $\zeta$  можно определить по формуле А.В. Романова [221], записанной в виде



Влияние гидродинамического несовершенства траншеи в формулах (266) и (267) можно учесть с помощью задания эквивалентного напора в траншее, который легко находится из приравнивания водопритоков совершенной и несовершенной траншей

$$\frac{k(h_e^2 - h_{T*}^2)}{2L_t} = \frac{k(h_e^2 - h_T^2)}{2L_t(1 + \zeta)}$$

в виде

$$h_{T*} = \left[ h_e^2 - (h_e^2 - h_T^2) / (1 + \zeta) \right]^{1/2}, \quad (268)$$

причем вычисленное по (268) значение  $h_{T*}$  надо подставить в (266) и (267) вместо  $h_T$ .

Длина области питания  $L_t$  и зона влияния водоотлива  $L_{вл}$  получены для диапазона нелинейной постановки уравнения Буссинеска для грунтовых вод при  $0 \leq h_T/h_e \leq 0,8$  (см. рис. 96). При небольшом понижении уровня воды в траншее, когда перепад уровней воды  $S$  не превышает 10-25 % мощности грунтовых вод  $h_e$  (см. рис. 96), фильтрация удовлетворительно описывается гидравлической теорией с линеаризованными постановками исходного дифференциального уравнения Буссинеска [6; 7; 49; 156; 316]. Тогда величина  $L_t$  по (266) переходит в известную формулу К.Э. Лембке [199, с. 608]:

$$L_t = 1,73\sqrt{at}. \quad (269)$$

Ординаты кривой депрессии УГВ с учетом участка высачивания  $h_{выс}$  можно рассчитать по формулам, в которые входят значения  $L_t$  по (266) и  $L_{вл}$  по (267).

Исследования на нелинейных нестационарных моделях с помощью МКР-Excel показали, что изменяющаяся во времени кривая депрессии УГВ не совпадает с параболой Дюпюи. Кроме того, вблизи траншеи на свободную поверхность УГВ влияет участок высачивания высотой  $h_{выс}$  (см. рис. 96).

При прогнозе водоотлива из траншеи расчетную кривую депрессии УГВ надо условно разбить на три зоны (рис. 97).

В 1-й зоне около траншеи ( $B/2 \leq x \leq B/2 + S$ ) на положение УГВ влияет участок высачивания  $h_{выс}$ , величину которого можно определить по формулам и графикам П.Я. Полубариновой-Кочиной [198; 199]. Например, при совершенной траншее и уровне воды на дне траншеи при  $h_0 = 0$  м (см. рис. 96) участок высачивания [199, с. 275]

$$h_{выс} = 0,742q/k. \quad (270)$$

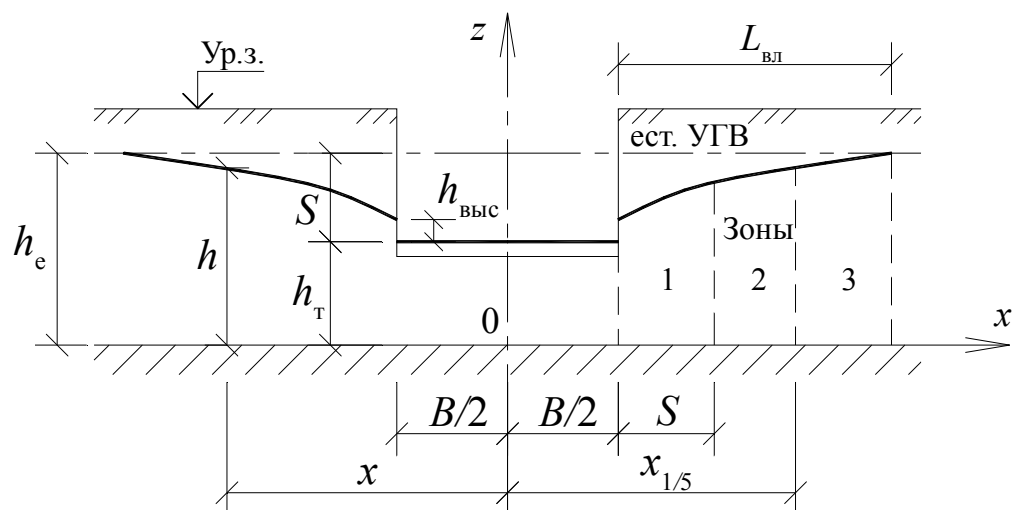


Рис. 97. К построению кривой депрессии УГВ при водоотливе из траншеи

В 1-й зоне ординаты кривой депрессии можно определить по модифицированной формуле А.Ж. Муфтахова [3, с. 80-81]:

$$h = h_{т} + h_{выс} \left[ \frac{(B/2 + S - x)}{S} \right]^2 + \sqrt{2q(x - B/2)/k}, \quad (271)$$

где  $q$  – односторонний водоприток по формуле (264);  $x$  — горизонтальная координата в интервале  $B/2 \leq x \leq B/2 + S$ ; остальные обозначения показаны на рис. 97.

2-я зона кривой депрессии УГВ находится в интервале  $B/2 + S \leq x \leq x_{1/5}$ , где  $x_{1/5} = B/2 + L_{вл}/5$ . Ординаты кривой депрессии на этом участке можно найти приближенно с помощью параболы Дюпюи в виде

$$h = h_{т} + \sqrt{2q(x - B/2)/k}. \quad (272)$$

В 3-й зоне кривой депрессии при  $x_{1/5} \leq x \leq B/2 + L_{вл}$  ординаты

$$h = h_{1/5} + (h_e - h_{1/5}) \sqrt{\frac{\ln(x/x_{1/5})}{\ln\left(\frac{L_{вл} + B/2}{x_{1/5}}\right)}}, \quad (273)$$

где промежуточное значение напора  $h_{1/5}$  при  $x_{1/5}$  можно найти так:

$$h_{1/5} = h_{т} + \sqrt{2qL_{вл}/(5k)}.$$

Формула (273) для последней зоны содержит логарифмы, что не совсем обычно выглядит для зависимостей при плоскопараллельной фильтрации.



мощности грунтовых вод  $h_e$ . В этом случае радиус питания котлована по формуле Э.Б. Чекалюка:

$$R_t = r_0 + \sqrt{\pi a t}; \quad a = k h_e / \mu, \quad (275)$$

где  $t$  — время водоотлива; остальные обозначения см. на рис. 98.

При  $S/h_e > (0,1 \dots 0,25)$  для описания движения грунтовых вод нужно использовать нелинейное уравнение Буссинеска. Этот случай весьма распространен, но инженерные методики расчета отсутствуют. Поэтому нами опять был применен комбинированный метод автомодельных движений в сочетании с численным моделированием МКР-Excel. Для диапазона нелинейной постановки фильтрации грунтовых вод  $0 \leq h_k/h_e \leq 0,8$  методом АДЧМ (см. § 16) получена довольно точная полуэмпирическая формула расчетного радиуса питания котлована (по расходу):

$$R_t = r_0 + (0,94 + 0,077 h_k/h_e)(1,72 - 0,016 \ln \tau) \sqrt{a t};$$

$$a = k h_e / \mu; \quad \tau = a t / r_0^2. \quad (276)$$

Расхождение значений  $R_t$  по (276) с результатами нелинейного моделирования МКР-Excel менее  $\pm 1,9 \%$ .

Приведенный радиус котлована  $r_0$  может быть определен для прямоугольных в плане котлованов по формулам В.И. Аравина (1938) – Н.К. Гирина (1947), для полигональных — по методу характерных точек В.М. Шестакова (1960), для П-, Т-, Г-образных — по формулам А.Ж. Муфтахова (1964). Эти формулы подробно изложены в справочном пособии к СНиП [208, с. 155-156].

Дополнительное фильтрационное сопротивление гидродинамически несовершенного котлована (пластового дренажа)  $\zeta_{пл}$  приведено в виде графика в справочном пособии к СНиП [208, с. 172]. Мы пересчитали, уточнили и расширили значения  $\zeta_{пл}$  моделированием несовершенного пластового дренажа в гидромеханической постановке с помощью МКР-Excel. Дискретные эмпирические значения  $\zeta_{пл}$  в зависимости от степени гидродинамического несовершенства котлована (пластового дренажа)  $r_0/m$  приведены в табл. 12.

Таблица 12

$r_0/m$	0,1	0,2	0,5	0,8	1
$\zeta_{пл}$	8,87	4,27	1,32	0,648	0,527
$r_0/m$	2	3	4	5	10
$\zeta_{пл}$	0,219	0,116	0,09	0,068	0,029

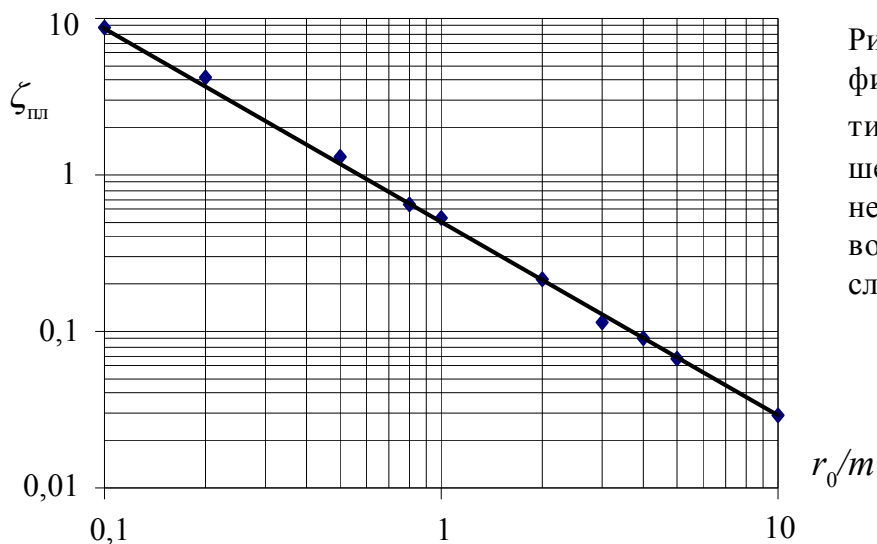


Рис. 99. Дополнительное фильтрационное сопротивление  $\zeta_{пл}$  несовершенного круглого в плане котлована (или пластового дренажа) в однослойном пласте

По данным табл. 12 построен график (рис. 99).

Довольно удобно для расчетов  $\zeta_{пл}$  применять эмпирическую формулу, которая получена обработкой данных табл. 12 с помощью средства «Мастер диаграмм» в пакете Microsoft Excel. Дополнительное фильтрационное сопротивление гидродинамически несовершенного котлована (или пластового дренажа)

$$\zeta_{пл} = \exp[-1,265 \ln(r_0/m) - 0,661], \quad (277)$$

где  $m$  — расстояние от водоупора до дна котлована или низа постели пластового дренажа (см. рис. 98). Формула (277) имеет высокий коэффициент корреляции 0,999 и тщательно проверена на моделях котлованов различной в плане формы и с разной степенью гидродинамического несовершенства. Расхождения значений водопритоков  $Q$  по (274) и на моделях МКР-Excel оказались менее 2-3 %.

Истинный радиус влияния водоотлива на уровень грунтовых вод (УГВ)  $R_{вл}$  (см. рис. 98) определен для случая минимального фиксируемого понижения УГВ  $S_{\min} = 1$  см. Формула для  $R_{вл}$  получена вышеупомянутым комбинированным методом АДЧМ для нелинейной постановки фильтрации грунтовых вод при  $0 \leq h_k/h_e \leq 0,8$ . Истинный радиус влияния на УГВ водоотлива из круглого в плане котлована:

$$R_{вл} = r_0 + (1 - 0,157 h_k/h_e)(4,12 - 0,1 \ln \tau) \sqrt{at};$$

$$a = kh_e/\mu; \tau = at/r_0^2. \quad (278)$$

Формула (278) прошла независимую проверку на двухмерной модели фильтрации грунтовых вод в нелинейной постановке (см. пример 67) и пока-



зала удовлетворительное качество для целей моделирования фильтрации грунтовых вод малой мощности, соизмеримой с понижениями УГВ в дренажных, водоотливных и водопонизительных системах.

Влияние гидродинамического несовершенства котлована в (276) и (278) можно учесть введением вместо  $h_k$  величины эквивалентного напора в котловане  $h_{k*}$  аналогично как в формуле (268) для несовершенной траншеи. Приравняем водоприток в совершенный и несовершенный круглый в плане котлован:

$$\frac{\pi k (h_e^2 - h_{k*}^2)}{\ln(R_t/r_0)} = \frac{\pi k (h_e^2 - h_k^2)}{\ln(R_t/r_0) + \zeta_{пл}},$$

откуда выразим эквивалентный напор в несовершенном котловане в виде

$$h_{k*} = \sqrt{h_e^2 - \frac{(h_e^2 - h_k^2) \ln(R_t/r_0)}{\ln(R_t/r_0) + \zeta_{пл}}}. \quad (279)$$

Вычисленное по (279) значение  $h_{k*}$  надо подставлять в (276) и (278) вместо  $h_k$  при расчете водоотлива из гидродинамически несовершенного котлована.

Реальная кривая депрессии УГВ вблизи котлована подходит к его стенке выше уровня воды на величину участка высачивания  $h_{\text{выс}}$  (см. рис. 98), которую для котлованов при  $h_0 = 0$  м приближенно можно найти по формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной (270), где приток грунтовых вод на погонный метр ширины стенки котлована можно найти как

$$q = Q/(2\pi r_0). \quad (280)$$

При моделировании (нелинейные модели МКР-Excel) водоотлива из круглых в плане котлованов обнаружено, что нестационарная кривая депрессии УГВ лишь частично совпадает с кривой по Дюпюи. Поэтому, также как и для траншей, расчетную кривую депрессии для котлованов предложено разбить на 3 зоны (рис. 100).

В 1-й зоне (см. рис. 100), где существенно влияет участок высачивания величиной  $h_{\text{выс}}$ , в пределах  $r_0 \leq r \leq (r_0 + S)$ , ординаты кривой депрессии УГВ при водоотливе из котлована можно построить по модифицированной формуле А.Ж. Муфтахова [3, с. 81]:

$$h = h_k + \left[ (r_0 + S - r)/S \right]^2 + S \sqrt{\frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_t/r_0)}}, \quad (281)$$

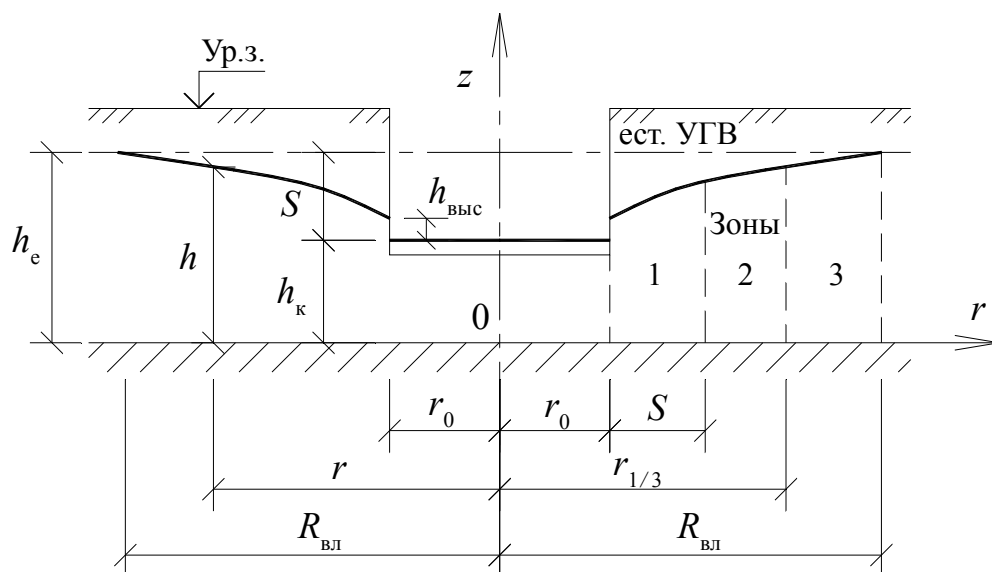


Рис. 100. К построению кривой депрессии УГВ при водоотливе из круглого в плане котлована

в которой расчетный, переменный во времени, радиус питания котлована (по расходу)  $R_t$  следует определять по формуле (276).

Во 2-й зоне (см. рис. 100), в пределах  $(r_0 + S) \leq r \leq r_{1/3}$ , где  $r_{1/3} = (1/3)R_{вл}$ , экспериментальная кривая депрессии почти совпадает с кривой по Дюпюи (погрешность по уровням менее 3 %) и ее ординаты выражаются в виде

$$h = h_k + S \sqrt{\frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_t/r_0)}}. \quad (282)$$

В 3-й зоне (см. рис. 100), в пределах  $r_{1/3} \leq r \leq R_{вл}$ , кривая депрессии УГВ постепенно выходит на естественный уровень грунтовых вод с напором  $h_e$ . Ординаты кривой депрессии можно определить по следующей полуэмпирической формуле:

$$h = h_{1/3} + (h_e - h_{1/3}) \sqrt{\frac{\ln(r/r_{1/3})}{\ln(R_{вл}/r_{1/3})}}, \quad (283)$$

в которой истинный радиус влияния водоотлива  $R_t$  следует находить по формуле (278), а напор  $h_{1/3}$  на контакте 2-й и 3-й зон можно определить так:

$$h_{1/3} = h_k + S \sqrt{\frac{\ln[R_{вл}/(3r_0)]}{\ln(R_t/r_0)}}. \quad (284)$$



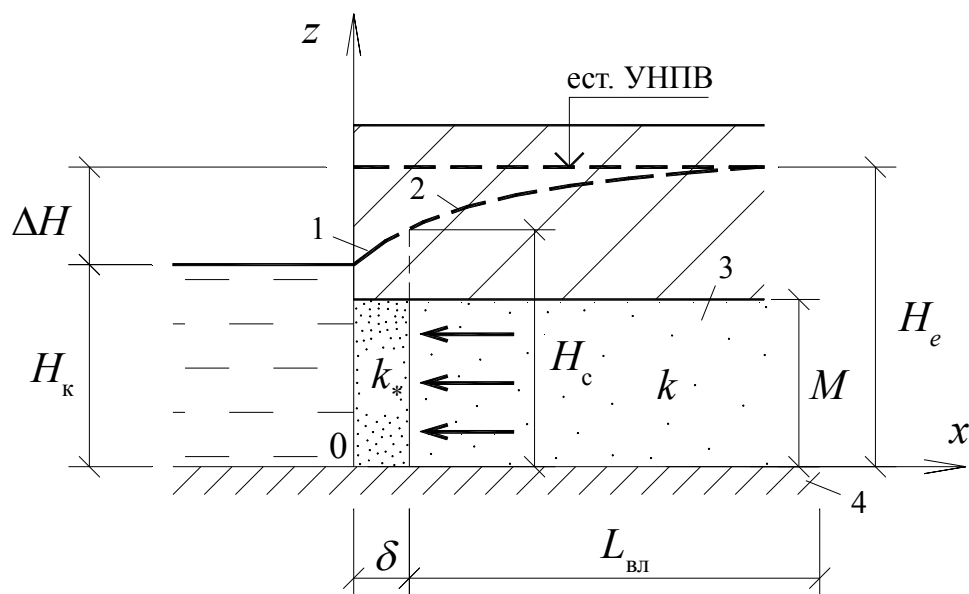


Рис. 102. Приведенная схема фильтрации НПВ к котловану с ограждением: 1 — эквивалентная завеса взамен «стенны в грунте»; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — водоупор

ции  $k_*$ , отличным от коэффициента фильтрации напорного пласта  $k$ , как показано на рис. 102.

После такого преобразования котлован считаем гидродинамически совершенным, то есть доходящим своим дном до водоупорной подошвы пласта. Такая приведенная схема фильтрации уже является одномерной в разрезе, что гораздо удобнее для расчетов. В коэффициенте фильтрации завесы  $k_*$  необходимо учесть и величину зависания «стенны в грунте» над водоупором  $m$ , и фильтрацию в зоне днища котлована полушириной  $B$  (см. рис. 101). Определим  $k_*$ .

С одной стороны, фильтрационный расход на единицу ширины фронта потока в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 101):

$$q = \frac{\Delta H}{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3}, \quad (285)$$

где  $\Delta H$  — разность напоров;  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  — фильтрационные сопротивления зон соответственно длиной  $B$ ,  $\delta$ ,  $L_{вл}$  (см. рис. 101).

Значения  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$  определяем из гидромеханических решений [13] в виде

$$\xi_1 = \frac{1}{k} \left( \frac{H_k - m}{B} - \frac{2}{\pi} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi m}{2B} \right);$$

$$\xi_1 = \frac{\delta}{mk};$$

$$\xi_3 = \frac{1}{k} \left( \frac{L_{\text{вл}}}{M} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M} \right),$$

где обозначения см. рис. 101.

С другой стороны, фильтрационный расход по приведенной схеме (см. рис. 102):

$$q = \frac{\Delta H}{\zeta_1 + \zeta_2}, \quad (286)$$

где  $\zeta_1, \zeta_2$  — фильтрационные сопротивления зон соответственно длиной  $\delta$  и  $L_{\text{вл}}$  (по рис. 102).

Значения  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  по [13] имеют вид

$$\zeta_1 = \frac{\delta}{Mk_*}; \quad \zeta_2 = \frac{L_{\text{вл}}}{Mk}.$$

Приравнивая выражения расходов по (285) и (286), после несложных выкладок получим формулу для определения коэффициента фильтрации эквивалентной завесы в виде

$$k_* = \frac{\delta k}{M} \left[ \frac{H_k - m}{B} + \frac{\delta}{m} - \frac{2}{\pi} \ln \left( \sin \frac{\pi m}{2M} \cdot \text{sh} \frac{\pi m}{2B} \right) \right]^{-1}. \quad (287)$$

В начальный период водоотливных работ в котловане к нему будет происходить нестационарное (неустановившееся) движение НПВ. Исследуем этот процесс фильтрации.

Для напорной фильтрации дифференциальные уравнения в рассматриваемой задаче имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{\eta a} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq \delta; \quad \eta = k_*/k; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq \infty; \quad a = k M / \mu, \end{aligned} \quad (288)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  — напоры соответственно в завесе и пласте;  $t$  — время от начала водоотливных работ;  $\mu$  — коэффициент водоотдачи грунта; остальные обозначения см. на рис. 102.

Краевые условия следующие:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) = H_2(x, 0) = H_e; H_1(0, t) = H_k; \\ H_1(\delta, t) = H_2(\delta, t); \eta \frac{H_1(\delta, t)}{\partial x} = \frac{H_2(\delta, t)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (289)$$

Применим преобразование Лапласа по времени  $t$  [73; 74; 98; 99] к (288) и (289). Решение (288) и (289) в изображениях  $\bar{H}_1$  и  $\bar{H}_2$  по Лапласу известно [132], его мы перепишем для зоны  $0 \leq x \leq \delta$  в пределах завесы так:

$$\begin{aligned} \bar{H}_1 = \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_k}{p} \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) \left\{ 1 - \beta \left[ \frac{\exp\left(x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) - \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right)}{\exp\left(\delta \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) - \beta \exp\left(-\delta \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right)} \right] \right\}; \\ \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}, \end{aligned} \quad (290)$$

где  $p$  — параметр преобразования по Лапласу.

Наибольший интерес представляет зона  $0 \leq x \leq \delta$  в пределах завесы и особенно изменение напора на внешней стороне «стены в грунте»  $H_e$  при  $x = \delta$  (см. рис. 101).

Точное решение аналогичной задачи получено в теории теплопроводности [132] и имеет вид

$$H_1 = H_e - \Delta H \left[ \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\eta at}} - \beta \sum_{n=1}^{\infty} \beta^{n-1} \left( \operatorname{erfc} \frac{2n\delta - x}{2\sqrt{\eta at}} - \operatorname{erfc} \frac{2n\delta + x}{2\sqrt{\eta at}} \right) \right], \quad (291)$$

где  $\Delta H = H_e - H_k$  — разность напоров в водоносном пласте и котловане.

Получим решение для начального периода работы по водоотливу при малых  $t$  и соответственно при больших  $p$ . Тогда, используя (290), получим для зоны в пределах завесы асимптотическое решение в виде

$$\bar{H}_1 = \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_k}{p} (1 - \beta) \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right),$$

откуда при переходе к оригиналам с помощью обратного преобразования Лапласа [106] имеем приближенное решение для определения неустановившихся напоров в зоне завесы  $0 \leq x \leq \delta$ , которое выглядит так:

$$H_1 = H_e - \Delta H (1 - \beta) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\eta at}}. \quad (292)$$

Изменяющийся во времени (нестационарный) напор  $H_c$  на внешней стороне «стены в грунте» (см. рис. 101), то есть при  $x = \delta$ , по (292) записывается в виде

$$H_c = H_e - \Delta H (1 - \beta) \operatorname{erfc} \frac{\delta}{2\sqrt{\eta at}}. \quad (293)$$

Сопоставительный анализ формул (291) и (293) при разложении в ряды функции дополнительного интеграла вероятности  $\operatorname{erfc}(z)$  показал, что последняя является тоже точной, но выгодно отличается от (291) своей простотой.

Нестационарный напор в водоносном пласте  $H_\delta$  при  $x = \delta$ , но без «стены в грунте», выписываем из (293) с учетом, что в однородном пласте величины  $\beta = 0$  и  $\eta = 1$ . Имеем [6; 151; 198]

$$H_\delta = H_k + \Delta H \operatorname{erf} \frac{\delta}{2\sqrt{at}}. \quad (294)$$

Нестационарный водоприток на  $1 \text{ м}^2$  дна котлована со «стеной в грунте»  $q_*$  найдем, дифференцируя по  $x$  точное решение (291) с умножением на величину  $k_* M/B$ , то есть применяя закон Дарси. В результате получим формулу вида

$$q_* = \frac{k_* M \Delta H}{B \sqrt{\pi \eta a t}}, \quad (295)$$

где все обозначения прежние и которая является точной.

Нестационарный водоприток на  $1 \text{ м}^2$  дна котлована без «стены в грунте»  $q$  получим из (295) при  $\eta = 1$ , заменив  $k_*$  на  $k$ , в виде [6; 151; 198]

$$q = \frac{k M \Delta H}{B \sqrt{\pi a t}}. \quad (296)$$

#### Пример 48. Водоотлив из котлована со «стеной в грунте»

Результаты сравнительных расчетов [206] по формулам (293) – (296) для нестационарных напоров и водопритоков при водоотливе из котлована строящейся станции «Б. Хмельницкого» Омского метрополитена со «стеной в грунте» и без нее на периоды времени от 1 до 60 суток приведены в табл. 13.

Таблица 13

Время от начала водоотлива $t, \text{сут}$	Напор, м		Водоприток, $\text{м}^3/\text{сут}$	
	$H_c$ по (293)	$H_\delta$ по (294)	$q_*$ по (295)	$q$ по (296)
1	10,51	5,91	$4,80 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$
2	10,26	5,73	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$8,11 \cdot 10^{-2}$
3	10,15	5,66	$2,77 \cdot 10^{-2}$	$6,62 \cdot 10^{-2}$
4	10,08	5,61	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$5,74 \cdot 10^{-2}$
5	10,04	5,58	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$5,13 \cdot 10^{-2}$
10	9,93	5,49	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$
15	9,88	5,46	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-2}$
30	9,81	5,42	$8,76 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$
60	9,76	5,38	$6,12 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$

Примечание.  $k = 0,12 \text{ м/сут}$ ;  $k_* = 0,021 \text{ м/сут}$ ;  $\delta = 0,6 \text{ м}$ ;  $M = 8,5 \text{ м}$ ;  $m = 1,5 \text{ м}$ ;  $\Delta H = 10,6 \text{ м}$ ;  $H_e = 15,9 \text{ м}$ ;  $H_k = 5,3 \text{ м}$ ;  $B = 9,12 \text{ м}$ ;  $\eta = 0,175$ ;  $\beta = 0,41$ ;  $a = 34 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Анализируя табл. 13, сделаем несколько выводов:

1) внешняя сторона «стены в грунте» при  $x = \delta = 0,6 \text{ м}$  уже с первых суток после вскрытия водоносного пласта попадает в зону квазистационарной фильтрации, то есть напор на контакте «стены» и грунта  $H_c$  поддерживается примерно постоянным порядка 10 м водяного столба;

2) «стена в грунте» на всем протяжении работ в котловане от начала вскрытия водоносного пласта до бетонирования днища котлована уменьшает фильтрационные водопритоки в 2,4 раза по сравнению с водопритоками в этот же котлован без «стены», но не избавляет от них полностью.

Таким образом, в достаточно короткий срок после начала водоотлива в вытянутом котловане со «стеной в грунте» напор с внешней стороны «стены» быстро устанавливается до некоторого квазистационарного значения  $H_c$  (см. рис. 101). Поэтому зону влияния водоотлива  $L_{\text{вл}}$  в напорном пласте можно приближенно определить по формуле И.Е. Жернова—В.М. Шестакова (109). В случае грунтовых вод, когда  $\Delta H / h_e$  не превышает 10-25 % (малые возмущения напоров), также можно использовать формулу (109). Большие возмущения напоров грунтовых вод, когда  $\Delta H / h_e$  превышает 10-25 %, встречаются довольно часто в практике городского строительства. Тогда зону влияния водоотлива  $L_{\text{вл}}$  в грунтовых водах можно найти по формуле (267).



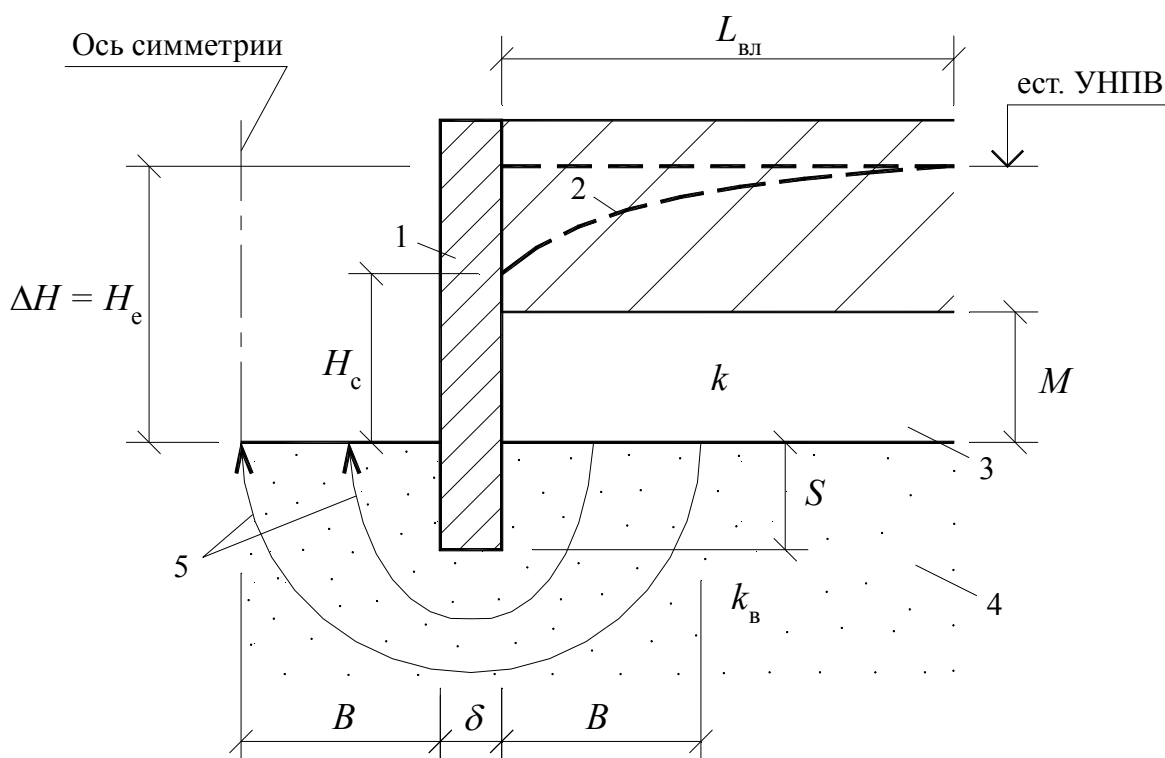


Рис. 103. Схема фильтрации НПВ к котловану: 1 — «стена в грунте»; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — относительный водоупор с коэффициентом фильтрации  $k_B$ ; 5 — линии тока фильтрационного потока

Наилучшим вариантом устройства «стены в грунте» для котлована с точки зрения его защиты от подтопления является заведение «стены» в нижележащие водоупорные грунты. Однако часто водоупоры являются не абсолютными, а относительными, то есть слегка пропускающими воду. Рассмотрим такой случай водоотлива для вытянутого котлована со «стеной в грунте» (рис. 103).

При условии сохранения постоянства напора в напорном пласте для схемы на рис. 103 применимо точное гидромеханическое решение Н.Н. Павловского [13] для стационарной фильтрации воды в котлован со «стеной в грунте», полученное методом конформных отображений.

В таком случае стационарный водоприток  $q_B$  на  $1 \text{ м}^2$  дна котлована со «стеной в грунте», по Н.Н. Павловскому, можно было бы найти по формуле

$$q_B = \frac{k_B \Delta H}{\pi B} \ln \left[ \frac{B}{S} + \sqrt{\left( \frac{B}{S} \right)^2 + 1} \right], \quad (297)$$

где  $k_b$  — коэффициент фильтрации грунта относительного водоупора, подстилающего напорный пласт;  $\Delta H$  — разность напоров в пласте и котловане; остальные обозначения показаны на рис. 103.

Но применить формулу (297) для нашего случая непосредственно нельзя, так как условие постоянства напора в напорном пласте не сохранится, а будет образовываться кривая депрессии (см. рис. 103).

Для изучения нестационарной фильтрации воды в данной задаче перейдем к расчетной схеме слабопроницаемой завесы (см. рис. 102) толщиной  $\delta$  с коэффициентом фильтрации  $k_*$ , которая эквивалентно заменяет непроницаемую «стену в грунте» толщиной  $\delta$ , причем учитывает обтекание под «стеной». Поэтому на рис. 102 грунт, подстилающий напорный пласт, считаем абсолютным водоупором. Найдем  $k_*$ .

С одной стороны, водоприток НПВ через завесу в котлован на  $1 \text{ м}^2$  дна

$$q_* = \frac{k_* M \Delta H}{\delta B},$$

с другой стороны, этот же водоприток можно найти по (297). Тогда из равенства водопритоков выразим коэффициент фильтрации эквивалентной завесы, заменяющей «стену в грунте», который определим в виде

$$k_* = \frac{k_b \delta}{\pi M} \ln \left[ \frac{B}{S} + \sqrt{\left( \frac{B}{S} \right)^2 + 1} \right]. \quad (298)$$

Зависимость, напоминающую нашу (298), получил В.П. Недрига [166], но у него вместо  $B$  подставлена длина плоского непроницаемого флютбета плотины, что для наших условий не подходит.

Таким образом, для исследования нестационарной фильтрации воды в котлован, защищенный «стеной в грунте», при наличии относительного водоупора можно вновь применить зависимости (293), (295), (296), в которых  $k_*$  подставлять по (298). Расчет зон влияния для напорных и грунтовых вод оговорен выше в данном параграфе.

#### Пример 49. «Стена в грунте» с относительным водоупором

Результаты сравнительных расчетов [206] по формулам (293) – (296) и (298) для нестационарных напоров и водопритоков при водоотливе из котлована строящейся станции «Маяковская» Омского метрополитена со «стеной в грунте» и без нее на периоды времени от 1 до 60 суток при наличии относительного водоупора (см. рис. 103) приведены в табл. 14.

Таблица 14

Время от начала водоотлива $t, \text{сут}$	Напор, $m$	Водоприток, $m^3/\text{сут}$	
	$H_c$ по (293)	$q_*$ по (295)	$q$ по (296)
1	8,41	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$5,93 \cdot 10^{-2}$
2	8,20	$7,44 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-2}$
3	8,11	$6,07 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-2}$
4	8,05	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$2,97 \cdot 10^{-2}$
5	8,01	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$
10	7,92	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$
15	7,88	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$
30	7,82	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$
60	7,78	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$7,66 \cdot 10^{-3}$

Примечание.  $k = 0,19 \text{ м/сут}$ ;  $k_b = 0,08 \text{ м/сут}$ ;  $k_* = 9,57 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}$ ;  $\delta = 0,6 \text{ м}$ ;  $M = 4 \text{ м}$ ;  $S = 4 \text{ м}$ ;  $\Delta H = 11 \text{ м}$ ;  $H_e = 11 \text{ м}$ ;  $H_k = 0 \text{ м}$ ;  $B = 9,12 \text{ м}$ ;  $\eta = 3,14 \cdot 10^{-2}$ ;  $\beta = 0,699$ ;  $a = 76 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

#### Выводы по станции «Маяковская»:

1) «стена в грунте» на всем протяжении работ от вскрытия напорного пласта до бетонирования днища котлована уменьшает водопритоки в 5,6 раза, то есть в 2 раза эффективнее по защите от подтопления в период строительства по сравнению со станцией «Б. Хмельницкого»;

2) «стена в грунте» уменьшает, но не ликвидирует полностью фильтрационные водопритоки;

3) максимальные водопритоки НПВ в котлован наблюдаются в первые сутки после вскрытия напорного пласта и составляют около  $0,01 \text{ м}^3/\text{сут}$  с  $1 \text{ м}^2$  дна котлована, а по истечении 15 суток стабилизируются до постоянного значения  $0,003 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

4) напор  $H_c$  (см. рис. 103) в месте примыкания «стены в грунте» к водоносному пласту в период от его вскрытия до бетонирования днища котлована будет почти постоянным, порядка 8 м водяного столба, считая от низа днища; после бетонирования днища напор увеличится до естественного, а в период эксплуатации метрополитена он может дополнительно возрасти вследствие подпора конструкциями станций и перегонов метрополитена потоков грунтовых и напорных подземных вод (барражный эффект).

Стенки некоторых траншей и котлованов в ходе городского строительства крепят сваями (шпунт, отдельные стальные профили с досками-забирками и т.д.). Подземные воды, прибывающие в такие строительные выемки, обтекают свайное крепление и выходят в траншеи и котлованы с деформацией линий тока. Это обуславливает появление дополнительных фильтрационных сопротивлений и некоторого подпора фильтрационного потока перед сваями, а также изменение водопритоков в котлован.

Рассмотрим вытянутый в плане котлован, имеющий свайное ограждение, вскрывший напорные подземные воды (рис. 104).

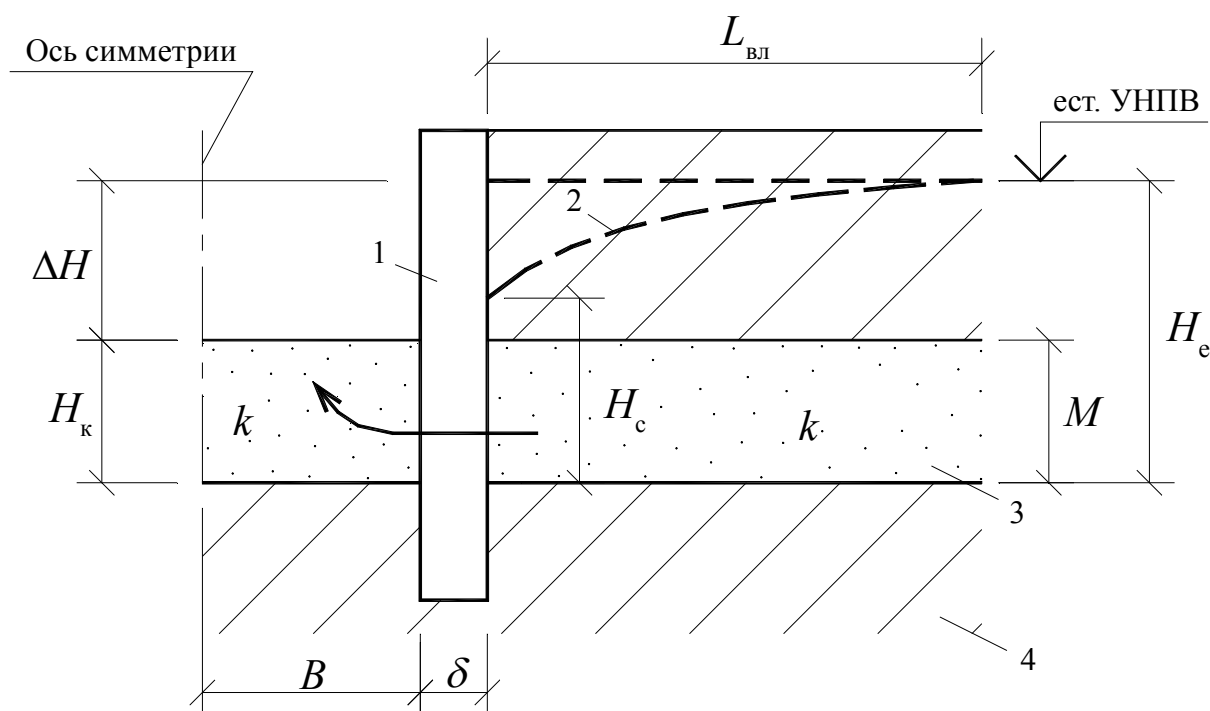


Рис. 104. Фильтрация НПВ к котловану: 1 — свайное крепление; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — водоупор

Для проведения расчетов водоотлива из такого котлована при нестационарной и стационарной фильтрации опять удобно перейти к схеме гидродинамически совершенного котлована, огражденного завесой (см. рис. 102). Коэффициент фильтрации завесы  $k_*$ , отличный от коэффициента фильтрации грунта напорного пласта  $k$ , эквивалентно отражает дополнительные сопротивления потока, возникающие при обтекании свай и придонной фильтрации. Для получения  $k_*$  используем, как и в предыдущих задачах, метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений [13].

Опуская промежуточные выкладки, а они аналогичны предыдущим задачам, запишем формулу для определения коэффициента фильтрации эквивалентной завесы  $k_*$  для котлована со свайным креплением:

$$k_* = \frac{\delta}{M} \left[ \frac{\delta}{k_c M} - \frac{2}{\pi k} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi H_k}{2 B} \right]^{-1}, \quad (299)$$

где  $\delta$  — характерный размер свай и он же толщина эквивалентной завесы;  $M$  — мощность напорного пласта (см. рис. 104);  $B$  — полуширина котлована;  $H_k$  — напор в котловане;  $k_c$  — коэффициент фильтрации свайного ряда.

Формулу для определения величины  $k_c$  позаимствуем из нашей работы [263]:

$$k_c = k \left[ \frac{1}{1 - \delta/a_c} - \frac{2a_c}{\pi\delta} \ln \sin \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{\delta}{a_c} \right) \right]^{-1}, \quad (300)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации грунта водоносного пласта;  $a_c$  — шаг свай.

После определения  $k_c$  и  $k_*$  соответственно по (300) и (299) можно найти нестационарный напор перед сваями  $H_c$  по (293) и нестационарный водоприток в несовершенный котлован со сваями  $q_*$  по (295).

#### Пример 50. Водоотлив из котлована со свайным креплением

Результаты сравнительных расчетов [206] по формулам (293) – (296) и (300) – (299) для нестационарных напоров и водопритоков при водоотливе из котлована строящейся станции «Кировская» Омского метрополитена со свайным креплением и без него (см. рис. 104) приведены в табл. 15.

Таблица 15

Время от начала водоотлива $t, \text{сут}$	Напор, м		Водоприток, $\text{м}^3/\text{сут}$	
	$H_c$ по (293)	$H_\delta$ по (294)	$q_*$ по (295)	$q$ по (296)
1	4,72	3,00	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$3,58 \cdot 10^{-2}$
15	4,30	2,56	$6,39 \cdot 10^{-3}$	$9,23 \cdot 10^{-3}$

Примечание.  $k = 0,19 \text{ м/сут}$ ;  $k_c = 0,062 \text{ м/сут}$ ;  $k_* = 0,091 \text{ м/сут}$ ;  $\delta = 0,6 \text{ м}$ ;  $M = 2,4 \text{ м}$ ;  $\Delta H = 9,6 \text{ м}$ ;  $H_e = 12 \text{ м}$ ;  $H_k = 2,4 \text{ м}$ ;  $B = 10,23 \text{ м}$ ;  $\eta = 0,479$ ;  $\beta = 0,182$ ;  $a = 45,6 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

В технологии городского строительства водоотлив и водопонижение производят в течение всего периода земляных работ вплоть до обратной засыпки пазух траншей и котлованов. Для дальнейшего периода строительства и эксплуатации объекта необходимо составить прогноз последствий водоотлива и водопонижения, что оговорено строительными нормами.

После засыпки пазух в них начинают прибывать подземные воды. Если стока воды из пазух нет, то через некоторое время они подтопятся. Прогноз подтопления пазух траншей и длинных котлованов грунтовыми водами можно оценить по нашей методике, полученной в ходе исследований по защите от подтопления Омского метрополитена в 1992 г. [206].

Все бессточные пазухи подтапливаются подземными водами. При этом также повышается уровень подземных вод в пласте, примыкающем к строительному объекту в пределах зон влияния (кривых депрессий), образовавшихся при водоотливе, водопонижении или дренаже. Расчетная

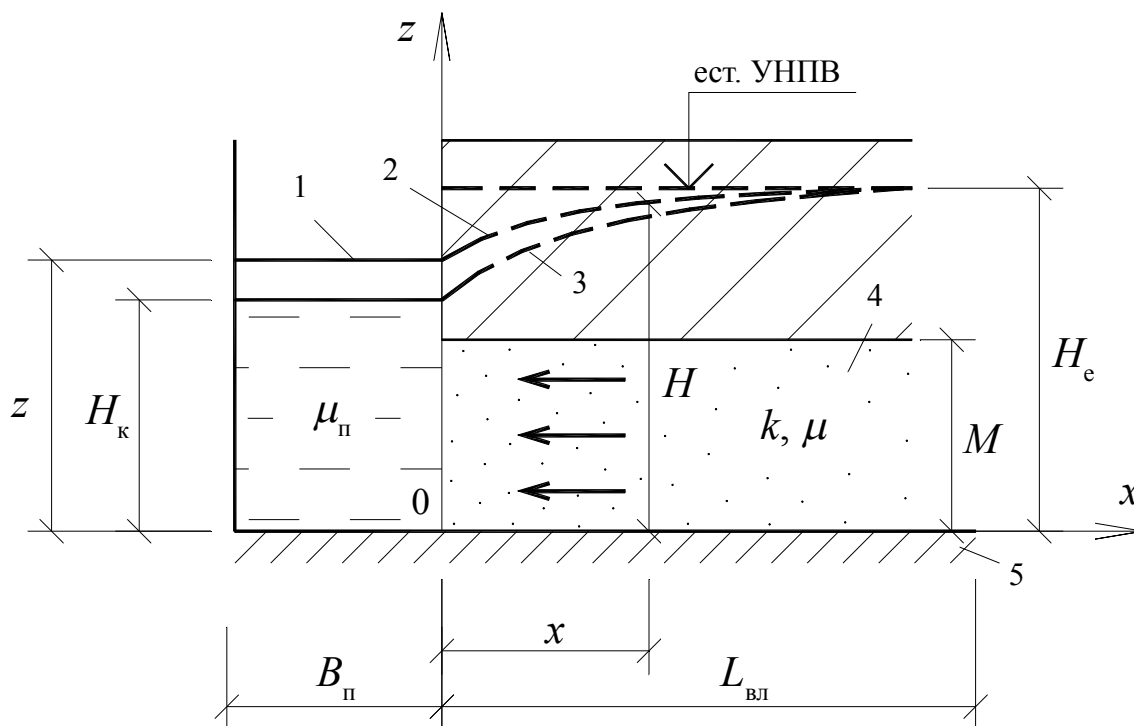


Рис. 105. Схема подтопления пазухи котлована: 1 — уровень воды в пазухе; 2 — промежуточное положение УНПВ; 3 — начальное положение кривой депрессии УНПВ; 4 — напорный пласт; 5 — водоупор

схема процесса подтопления вытянутой в плане пазухи представлена на рис. 105. Вначале рассмотрим напорные подземные воды (НПВ).

Ход рассуждений проведем по аналогии с работой О.В. Холопова [301], но для случая напорной фильтрации.

При прекращении водоотлива и засыпке пазух в начальный момент времени  $t = 0$  пусть напор в пазухе составляет величину  $H_k$  (см. рис. 105). Это начальное условие задачи. При  $t > 0$  начинается подтопление пазух водой, прибывающей из напорного пласта.

Приравняем водоприток на единицу длины пазухи  $q$  и накопление воды в хорошо проницаемом грунте засыпки пазухи:

$$\frac{q}{B_{\text{п}}} = \mu_{\text{п}} \frac{dz}{dt}, \quad (301)$$

где  $\mu_{\text{п}}$  —недостаток насыщения грунта пазухи;  $B_{\text{п}}$  — ширина пазухи; остальные обозначения см. на рис. 105.

Согласно методу последовательной смены стационарных состояний [199] водоприток НПВ в пазуху:

$$q = kM (H_e - H) / (L_t - x), \quad (302)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации водоносного пласта мощностью  $M$ ;  $H_e$  — естественный напор в пласте;  $H$  — переменный напор в пласте, зависящий от координаты  $x$  и времени восстановления уровня воды  $t$ ;  $L_t$  — расчетная длина области питания (по водопритоку).

Из последней формулы при неустановившемся водопритоке напор

$$H = H_e - \frac{q}{kM}(L_t - x), \quad (303)$$

где  $q$  — расход, меняющийся во времени  $t$ .

Положив в (302)  $x = 0$  и  $H = z(t)$ , найдем первое приближение расхода

$$q_{(1)} = \frac{kM(H_e - z)}{L_t}. \quad (304)$$

Подставим (304) в (301), разделим переменные и проинтегрируем. Получим

$$-\frac{\mu_n B_n L_t}{kM} \ln(H_e - z) = t + C,$$

где  $C$  — постоянная интегрирования, которую определяем при помощи начального условия  $t = 0, z = H_k$ .

Тогда имеем в первом приближении решение в виде

$$t_{(1)} = \frac{\mu_n B_n L_t}{kM} \ln \frac{H_e - H_k}{H_e - z}.$$

Уточним это решение до второго приближения. Для него расход составляет

$$q = q_{(1)} - \mu \int_0^{L_t} \frac{\partial H_{(1)}}{\partial t} dx, \quad (305)$$

где  $H_{(1)}$  — напор в первом приближении;  $\mu$  — коэффициент водоотдачи грунта напорного пласта.

Найдем первое приближение напорной линии, подставив (304) в (303), откуда

$$H_{(1)} = z + \frac{x(H_e - z)}{L_t}.$$

Последнее выражение используем в (305), а в результате получившийся расход  $q$  подставим в (303) и, повторяя выкладки с интегрированием, окон-

чительно получим решение во втором приближении для определения времени подъема уровня воды в пазухах вытянутых котлованов:

$$t = \frac{2\mu_{\Pi} B_{\Pi} L_t + \mu L_t^2}{2kM} \ln \frac{H_e - H_{\kappa}}{H_e - z}. \quad (306)$$

Решение (306) можно разрешить относительно вертикальной координаты поднимающегося в пазухе уровня воды в виде

$$z = H_e - (H_e - H_{\kappa}) \exp \left[ - \frac{2\tau}{2(\mu_{\Pi}/\mu)(L_t/B_{\Pi}) + (L_t/B_{\Pi})^2} \right];$$

$$\tau = at/B_{\Pi}^2; a = kM/\mu. \quad (307)$$

Формула (307) при  $\tau \leq 250$  имеет погрешность менее 5 %, что проверено нелинейным моделированием с помощью МКР-Excel. При  $\tau > 250$  она начинает немного завышать подъем уровня  $z$ , что, однако, идет в запас надежности прогноза подтопления пазухи.

Приведенные решения получены для напорного пласта. Кроме того, они пригодны для расчета подтопления пазухи под влиянием грунтовых вод со свободной поверхностью (проверено моделированием). Для этого в (306)–(307) следует вместо мощности напорного пласта  $M$  положить естественную мощность грунтовых вод  $h_e$  (см. рис. 96). Расчетную длину области питания  $L_t$  можно определить в зависимости от времени продолжительности водоотлива  $t$  по (266).

Отметим, что для грунтовых вод аналогичную задачу решил О.В. Холопов [301], причем у него было принято  $\mu_{\Pi} = 1$ , что соответствует пустой пазухе или подвалу здания. Однако ему удалось получить решение лишь в неявном виде относительно времени подтопления  $t$ . Родственные задачи восстановления уровня в котлованах и скважинах изучали С.Г. Каменецкий (1959), И.С. Пашковский и В.М. Шестаков (1967), Б.С. Шержуков (1969, 1977), А. Ван-Эвердинген и У. Херст (1949). Все они применяли линеаризованные постановки гидравлической теории фильтрации [54].

Формулы (306)–(307) кроме рассмотренного случая подтопления пазух котлованов можно использовать для расчета подпора дренажной системы в случае выхода ее из строя при старении (заилении со временем), взрыва и т.д.

Фильтрационные расчеты систем строительного водопонижения необходимы для определения водопритоков, кривых депрессий уровня подземных вод, времени осушения грунта при водопонижении, выбора рациональных схем размещения систем водопонижения. Первоначальное знакомство с сис-



темами строительного водопонижения приведено в § 6 гл. 1. Там же приведены классификация и критерии выбора различных систем водопонижения, выработанные практикой. Напомним, что системы строительного водопонижения подразделяются на следующие:

- 1) установки водопонижения с открытыми гравитационными скважинами (сообщающимися с атмосферой);
- 2) установки вакуумного водопонижения (с иглофильтрами и эжекторами);
- 3) установки электроосмотического водопонижения (обычно совмещают с вакуумным водопонижением).

Объектом расчетов являются процессы фильтрации подземных вод и воздуха в связи с работой систем водопонижения. Эти системы призваны обеспечить эффективность технологий городского строительства нулевого цикла в ходе земляных работ и устройства подземных частей зданий и сооружений.

Методы расчетов основаны на закономерностях теории фильтрации воды и воздуха, а также гидроаэродинамики (механики жидкости и газа) при расчете отдельных элементов систем водопонижения (эжекторов, иглофильтров, скважин, трубопроводов, насосов и др.). В некоторых случаях требуется проводить комплексный расчет системы водопонижения [62], когда фильтрационные и гидроаэродинамические расчеты необходимо решить совместно. Общая технология расчетов водопонижения может быть принята с учетом вводных понятий, приведенных в § 12.

Для проведения расчетов по водопонижению в качестве исходных данных нужно подобрать материалы об изучаемой площадке по гидрогеологии, проектно-изыскательскую документацию по существующим и проектируемым зданиям и сооружениям, изучить производственный опыт и соответствующие научные разработки по теории фильтрации, гидроаэродинамике и технологии строительного водопонижения.

От нормально работающей водопонизительной системы требуется, чтобы она осушала массив обводненного неустойчивого грунта в зоне строительной выемки или выработки (см. рис. 28 и 29). Согласно нормативным документам [238], расчет систем строительного водопонижения необходимо производить с учетом неустановившейся фильтрации при постоянном напоре в скважинах водопонижения. Такой расчет является чисто фильтрационным, то есть не учитывает гидравлических и аэродинамических характеристик трубопроводов систем. Некоторые системы водопонижения используют циркуляцию воды и воздуха в трубопроводах. Для них применяют комплексный расчет: фильтрационный совместно с гидравлическим для труб [62].

Основные формулы по фильтрационным расчетам водопонизительных систем из гравитационных скважин (открытых в атмосферу) приведены в

справочном пособии к СНиП [208]. Такие системы с гравитационными скважинами относят к обычным способам строительного водопонижения [62]. Методики расчета водопонижения гравитационными скважинами разработали Н.Е. Жуковский [82], Ф. Форхгеймер [299, 334], И.П. Кусакин [121], И.А. Чарный [303], С.Ф. Аверьянов [4], В.И. Аравин [9], А.В. Романов [221], С.К. Абрамов [1], В.М. Григорьев [63], Л.Н. Воробков, В.М. Гаврилко, П.В. Лобачев и В.М. Шестаков [47], Л.Н. Павловская и В.М. Шестаков [184], Н.Н. Веригин [44], Г.М. Мариупольский [136], Ф.М. Бочевевер [178], В. Кнаупе [103] и др. В обобщающей статье [167] В.П. Недрига и Г.И. Покровский проанализировали решения С.Ф. Аверьянова, В.И. Аравина, Н.Н. Веригина, А.В. Романова, И.А. Чарного и обнаружили, что «все рассмотренные зависимости идентичны и, следовательно, обладают одной степенью точности». Добавим, что эти зависимости относятся к линейной гидравлической теории [199].

Методики фильтрационных расчетов для водопонижительных систем из гравитационных скважин обобщены и внесены в СНиП [238]. Примеры расчета приведены в руководстве [223] и справочнике проектировщика [176].

Следует заметить, что эти стандартные методики более или менее точно соответствуют условиям напорного пласта с постоянной мощностью  $M$ . В условиях же безнапорного пласта грунтовых вод со свободной поверхностью мощность грунтовых вод  $h$  при водопонижении является величиной переменной. Поэтому в упомянутых методиках приближенно вводится средняя мощность пласта грунтовых вод  $h_c$ . Кроме того, в этих методиках использовано предложение Н.Е. Жуковского о принципе суперпозиции (принцип сложения течений). Таким образом, существующие типовые решения по скважинным водопонижительным системам для грунтовых вод со свободной поверхностью используют линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации по Буссинеску [200].

Однако С.Ф. Аверьянов [6, с. 177] достаточно убедительно доказал, что принцип сложения течений для грунтовых вод справедлив, если возмущение УГВ  $\Delta h$  небольшое в сравнении с первоначальной естественной мощностью грунтовых вод  $h_c$ . В.М. Шестаков [316] указал, что этот принцип справедлив при отношении  $\Delta h/h_c$  не более 10-20 %. А.Ж. Муфтахов проанализировал целый класс гидродинамических решений по грунтовым водам [156] и нашел, что для применения линеаризованной гидравлической теории фильтрации по Буссинеску возмущение УГВ не должно превышать 5-10 % отношения  $\Delta h/\xi$ , где  $\xi$  — характерный размер области фильтрации. Этот критерий использован в справочном пособии к СНиП [208].

Таким образом, стандартные методики фильтрационных расчетов систем гравитационных водопонижительных скважин имеют достаточно жесткое ограничение в случае осушения грунтовых вод: если понижение УГВ  $\Delta h$

превысило 10-25 % мощности (толщины) грунтовых вод  $h_e$ , то методики могут привести к слишком грубым и недостоверным результатам. То есть в этом случае принцип суперпозиции несправедлив. Пример недопустимости применения этого принципа показан на рис. 55. Поэтому фильтрационная задача становится нелинейной. В условиях однородного пласта грунтовых вод малой мощности  $h_e$  ее постановку можно описать обобщенным уравнением Буссинеска (67) или (69).

При нелинейной постановке некоторое уточнение существующих методик расчета систем скважинного водопонижения может быть достигнуто с помощью наших формул из предыдущего параграфа, так как они получены для любых соотношений  $\Delta h/h_e$ . Для этого полученные формулы водоотлива и дренажа в нелинейной постановке можно приближенно распространить на некоторые случаи прогноза строительного водопонижения. Например при введении эквивалентного напора линейных рядов скважин или иглофильтров, а также при использовании известного расчетного приема «большого колодца», который применяли С.К. Абрамов, С.Ф. Аверьянов, Ю.П. Борисов, Н.Н. Веригин, В.М. Григорьев, Г.М. Мариупольский, С.Н. Нумеров, А.В. Романов, И.А. Чарный, В.М. Шестаков и др. Однако при невозможности применения принципа суперпозиции в нелинейных (по Буссинеску) постановках задач фильтрации грунтовых вод корректные результаты можно получить лишь моделированием.

Методику фильтрационных расчетов установок вакуумного водопонижения с помощью иглофильтров наиболее подробно разработал В.М. Григорьев [62]. Позднее Р.Н. Арутюнян издал книгу [16] по исследованиям вакуумного водопонижения с помощью эжекторных скважин. Методические рекомендации по вакуумному водопонижению опубликовали М.Е. Альтовский (1946), С.В. Комиссаров (1955), Г.М. Мариупольский (1960), П.М. Петухов (1939) и др.

Существующие методики фильтрационных расчетов вакуумного водопонижения используют тот же упрощенный прием для случая осушения грунтовых вод, что и методики для открытых скважин. Они применяют линеаризованные постановки гидравлической теории фильтрации по Буссинеску [199]. Это означает, что их область применения ограничена понижениями УГВ не более 10-25 % от естественной мощности грунтовых вод.

Поэтому при нелинейной постановке уравнений фильтрации уточнение существующих методик расчета систем вакуумного водопонижения может быть достигнуто с помощью наших формул из предыдущего параграфа, так как они получены для любых соотношений  $\Delta h/h_e$ . При этом надо учитывать, что вакуум в скважинах и иглофильтрах уменьшает в них напор на величину

$H_b = p_b / \gamma$  в метрах водяного столба, где  $\gamma = 10000 \text{ Н/м}^2$  — удельный вес воды [256]. И опять можно заметить, что наиболее корректные результаты в случае невозможности применить принцип суперпозиции при нелинейных постановках задач можно получить лишь моделированием.

Методики расчета электроосмотического водопонижения разработали Г.М. Ломизе и А.В. Нетушил [127], Г.М. Мариупольский [137]. Краткие методические рекомендации по этим системам приведены в руководстве [223, с. 39-40 и 79], а также у В. Кнаупе [103, с. 321-326], причем последний автор указал, что «при сложных схемах расположения электродов необходимо переходить на модельные исследования». Дополнительные сведения по электроосмосу и связанным с ним дифференциальным уравнениям фильтрации приведены в § 11 гл. 2.

Заметим, что фильтрационный расчет электроосмотического водопонижения еще труднее поддается аналитическому решению, поэтому его целесообразнее моделировать и, на наш взгляд, это удобно производить с помощью МКР-Excel (см. § 28).

Рекомендации по расчету строительного водопонижения:

1) в случае понижений УГВ меньше 10-25 % от естественной мощности грунтовых вод, а также для напорных горизонтов следует применять для фильтрационного расчета систем строительного водопонижения существующие стандартные методики;

2) при больших понижениях УГВ, превышающих 10-25 % от естественной мощности грунтовых вод, фильтрационные процессы для систем строительного водопонижения целесообразно моделировать, причем автор рекомендует использовать МКР-Excel (см. § 28).

Методики аналитического расчета дренажей, применяемых в городском строительстве, достаточно подробно изложены в справочном пособии к СНиП [208]. Расчетные методики [208] построены в основном в рамках линеаризованных постановок по I или II способу уравнения Буссинеска гидравлической теории фильтрации. Так же, как при водоотливе и водопонижении, при расчете дренажа необходимо обращать внимание на соотношение понижения УГВ и естественной мощности грунтовых вод. Если это соотношение больше 10-25 %, то фильтрационная задача становится нелинейной и ее лучше моделировать, чтобы получить представительные результаты. Для моделирования дренажей в городском строительстве автор рекомендует использовать МКР-Excel (см. § 28).

Приведем наши решения [262; 265] по расчету двухлинейных (см. рис. 21) и кольцевых (см. рис. 16) дренажей с учетом свайных фундаментов и других зон неоднородности под зданиями и сооружениями. Настоящая работа позволила выяснить, что зоны пониженной проницаемости влияют гораздо больше, чем это предполагалось ранее.

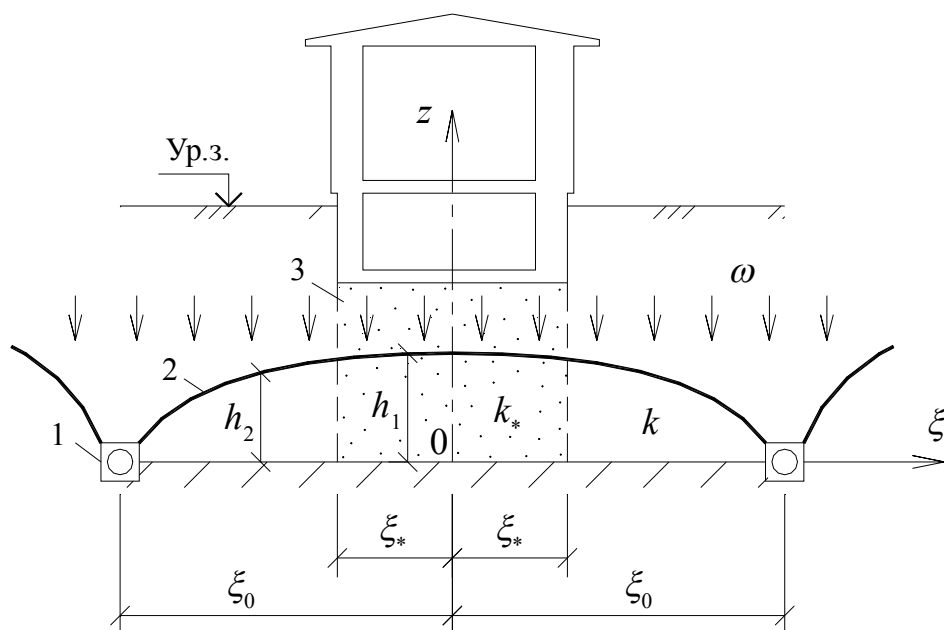


Рис. 106. К расчету совершенного двухлинейного или кольцевого дренажа: 1 — дрена; 2 — кривая депрессии; 3 — зона пониженной проницаемости

Установившееся положение кривой депрессии уровня грунтовых вод (УГВ) при работе совершенного двухлинейного ( $\alpha = 0$ ) или кольцевого ( $\alpha = 1$ ) дренажа с учетом зоны пониженной проницаемости под зданием или сооружением (рис. 106) можно определить по формулам [265]:

$$h_1 = \left\{ \frac{\omega}{2^\alpha k} \left[ \xi_0^2 + \xi_*^2 (\eta^{-1} - 1) - \xi^2 \eta^{-1} \right] \right\}^{0,5} ; \quad 0 \leq |\xi| \leq \xi_* ;$$

$$h_2 = \left[ \frac{\omega}{2^\alpha k} (\xi_0^2 - \xi^2) \right]^{0,5} ; \quad \xi_* \leq |\xi| \leq \xi_0 ; \quad \eta = k_*/k, \quad (308)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — напоры и одновременно вертикальные отметки кривой депрессии УГВ при работе дренажа в режиме установившейся фильтрации, которые отсчитываются от горизонтальной водоупорной подошвы, м;  $\omega$  — интенсивность дополнительной инфильтрации влаги за вычетом испарения с УГВ, м/сут;  $k$  — коэффициент фильтрации водоносного пласта в естественном залегании, м/сут;  $k_*$  — коэффициент фильтрации зоны пониженной проницаемости, м/сут;  $\eta$  — относительная проницаемость;  $\xi$  — обобщенная горизонтальная координата, для двухлинейного дренажа  $\xi = x$  при  $\alpha = 0$ , для кольцевого дренажа  $\xi = r$  при  $\alpha = 1$ ;  $\xi_0$  — размер дренажа в плане, соответ-

$$\eta = k_*/k$$

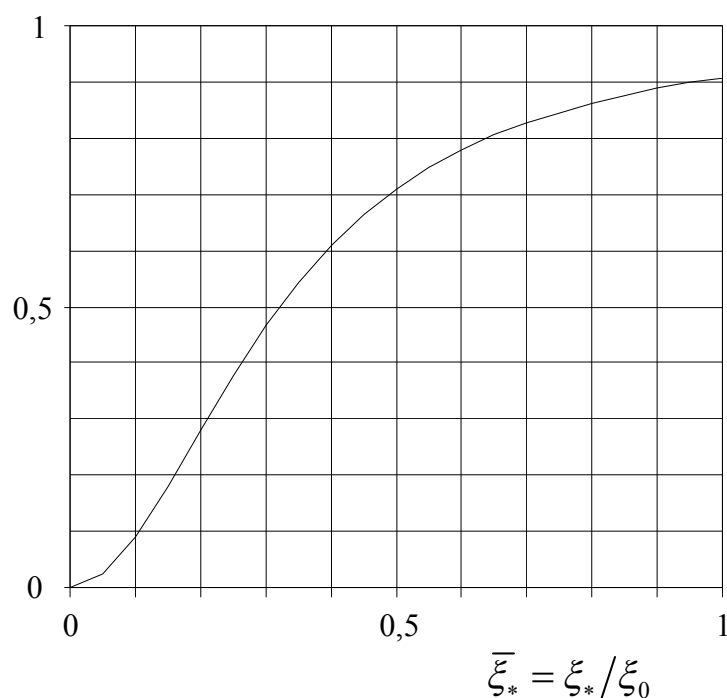


Рис. 107. Область учета зон пониженной проницаемости при расчете двухлинейных и кольцевых дренажей (заштрихована точками)

ственно  $\xi_0 = L_0$  при  $\alpha = 0$  и  $\xi_0 = R_0$  при  $\alpha = 1$ ;  $\xi_*$  — размер зоны пониженной проницаемости в плане, соответственно  $\xi_* = L_*$  при  $\alpha = 0$  и  $\xi_* = R_*$  при  $\alpha = 1$ .

Формула (308) пригодна для любых соотношений понижений УГВ и мощности водоносного пласта. Она является точной в рамках нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации [199]. Кроме двухлинейных и кольцевых дренажей она может быть использована и для расчета пристенных дренажей зданий (см. рис. 20).

При расчете дренажей по традиционным методикам [208] без учета зон пониженной проницаемости под зданиями и сооружениями в определении положения кривой депрессии возникает ошибка занижения УГВ на десятки и сотни процентов. Это уменьшает надежность расчета дренажа. Поэтому мы предлагаем проверять критерий необходимости учета зоны неоднородности при расчете дренажа [265]:

$$\eta < \bar{\xi}_*^2 (0,1025 + \bar{\xi}_*^2)^{-1}; \quad \bar{\xi}_* = \xi_*/\xi_0, \quad (309)$$

где  $\bar{\xi}_*$  — относительный размер зоны пониженной проницаемости в дренируемой области. Если критерий (309) выполняется, то обязательно нужно учитывать зону неоднородности при расчете дренажа.

Область учета зон пониженной проницаемости под зданиями и сооружениями при расчете двухлинейных, кольцевых и пристенных дренажей можно также определить по рис. 107.

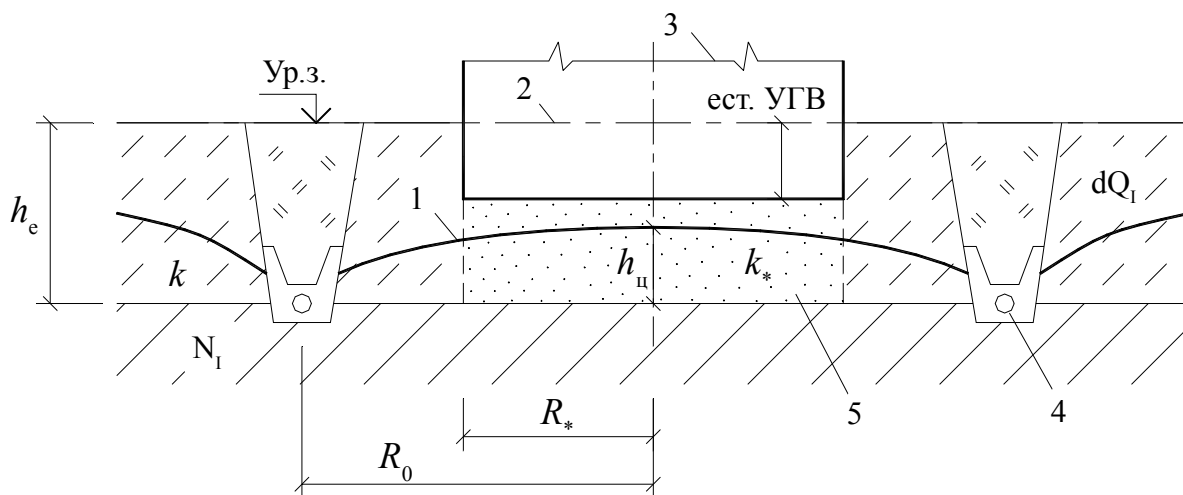


Рис. 108. Схема гидрогеологического разреза на участке жилого дома в г. Называевске:  $dQ_I$  — делювиальные супесчано-суглинистые отложения;  $N_I$  — неогеновые глины (водоупор); 1 — кривая депрессии УГВ при работе дренажа; 2 — максимальное естественное положение УГВ; 3 — подвал защищаемого здания; 4 — кольцевой дренаж; 5 — массив уплотненного грунта  $dQ_I$  со сваями

### Пример 51. Расчет дренажа с учетом свайных фундаментов

Для защиты от подтопления грунтовыми водами подвала 24-квартирного жилого дома в г. Называевске Омской области проектным институтом было намечено сооружение кольцевого трубчатого дренажа. В задачу фильтрационного расчета дренажа входило выяснить, будет ли дренаж обеспечивать необходимое понижение уровня грунтовых вод (УГВ) под подвалом здания в водоносном пласте, пересеченном свайными фундаментами. Данный пример, первоначально представленный в [262], в данной работе мы пересчитали и существенно уточнили с учетом новой методики, изложенной в § 15.

Согласно данным изысканий грунтовые воды приурочены к четвертичным делювиальным супесчаным отложениям средней мощностью 4 м с коэффициентом фильтрации  $k = 0,7 \text{ м/сут.}$  Ниже залегают неогеновые глины, служащие водоупором для грунтовых вод. Максимальное положение УГВ ожидается на уровне дневной поверхности  $h_e \approx 4 \text{ м}$  (рис. 108). Супесь имеет начальный коэффициент пористости  $e_0 = 0,85$  и коэффициент сжимаемости  $a_c = 0,5 \text{ МПа}^{-1}$ . Общее дополнительное давление на грунт, передаваемое от здания фундаментами  $p_\phi = 0,12 \text{ МПа}$ .

Защищаемое здание имеет размеры в плане  $48 \times 12 \text{ м}^2$ . Земляной пол подвала расположен ниже уровня земли на расстоянии  $z_n = 1,5 \text{ м}$  (см. рис. 108). План свайного поля здания показан на рис. 109. Сваи забивные железобетонные квадратного сечения  $40 \times 40 \text{ см}^2$  длиной 4 м. Нижними концами сваи заглубляются в неогеновые глины.

Кольцевой трубчатый дренаж, ооконтуривающий здание, намечено соорудить совершенным, доведенным до водоупорных пород (глин неогена). Он отстоит от здания на расстоянии 3 м (см. рис. 109). Требуемая норма осушения для селитебной территории застройки 2 м [239], что на 0,5 м ниже пола подвала, то есть дренаж должен срабатывать напор в водоносном пласте до величины не более  $h_{\max} = 2 \text{ м}$ , считая от водоупорной подошвы.

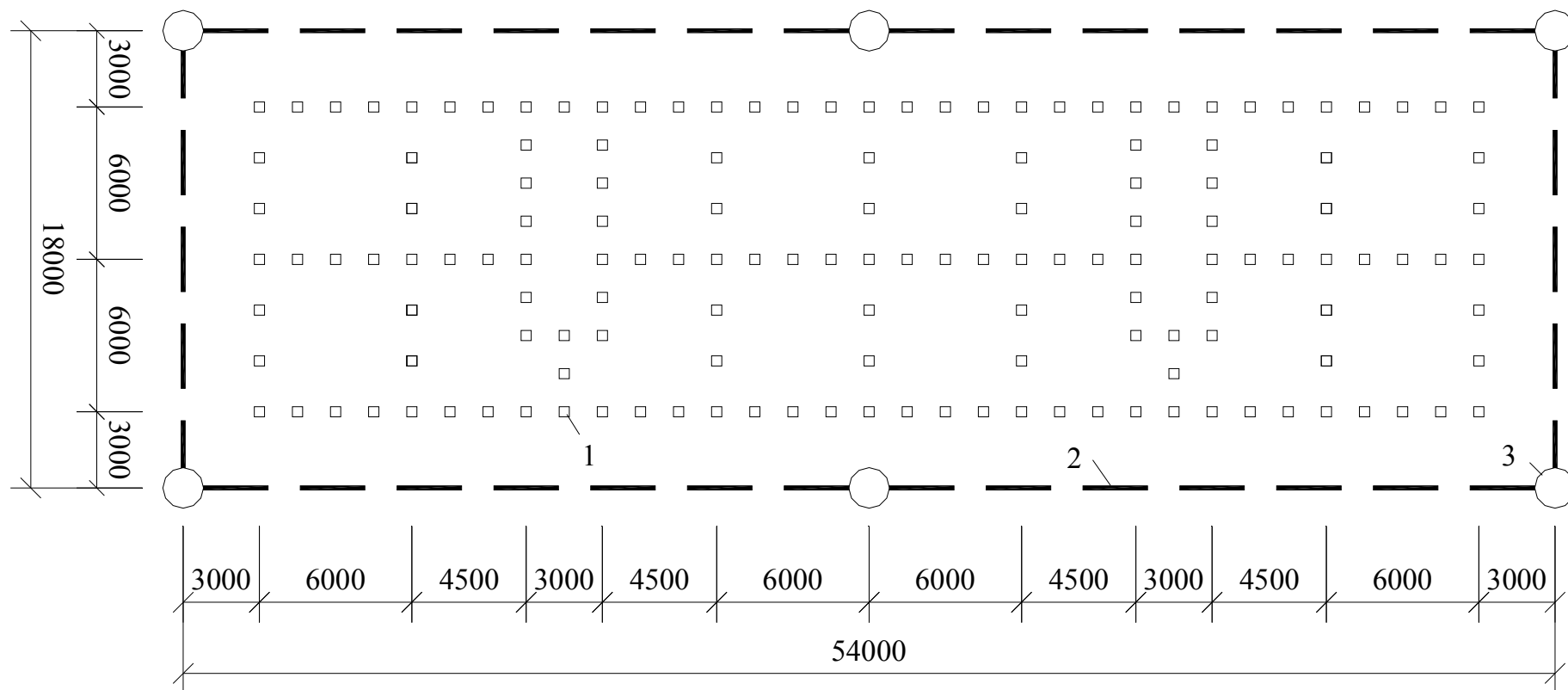


Рис. 109. Схема расположения свай и дренажа: 1 — сваи; 2 — дренажи; 3 — смотровые колодцы



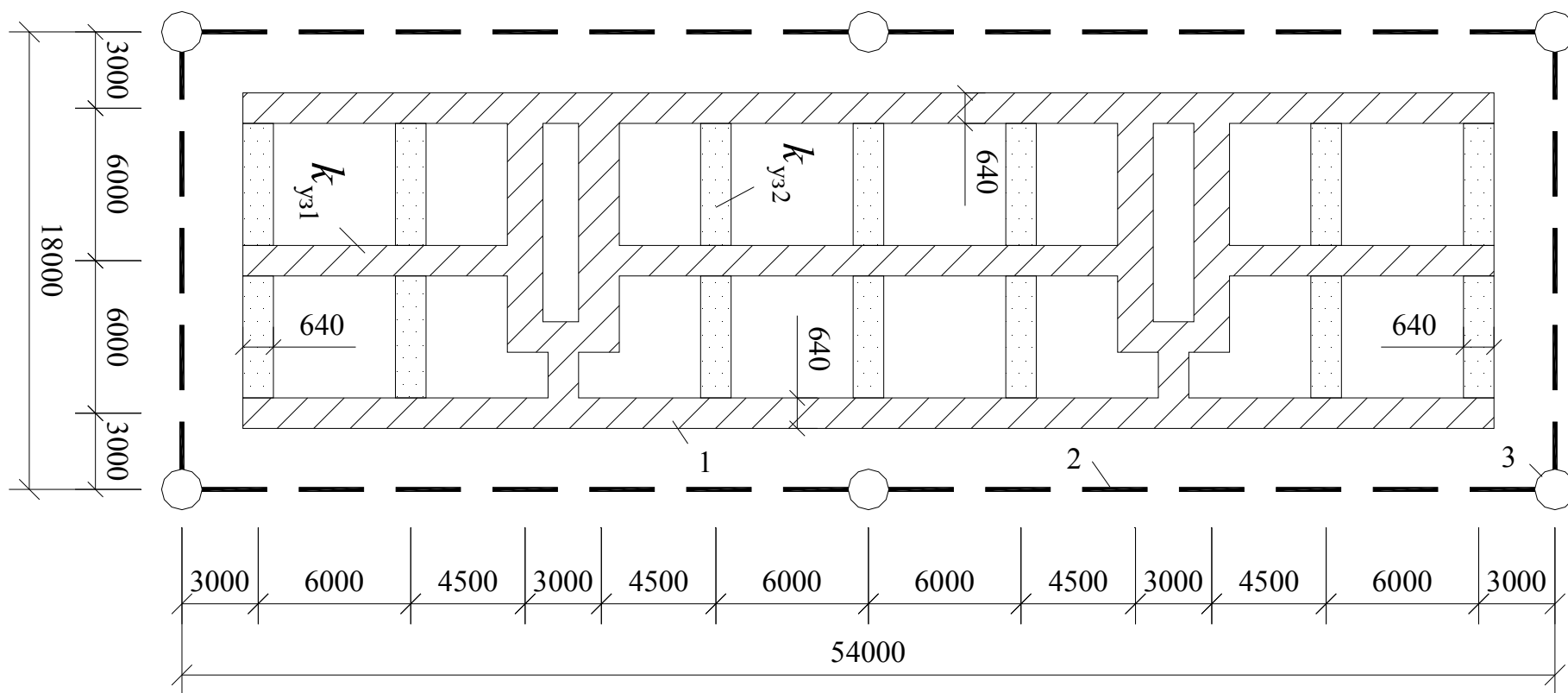


Рис. 110. План условных завес и дренажа: 1 — условные завесы, заменяющие свайные ряды; 2 — дренажи; 3 — смотровые колодцы

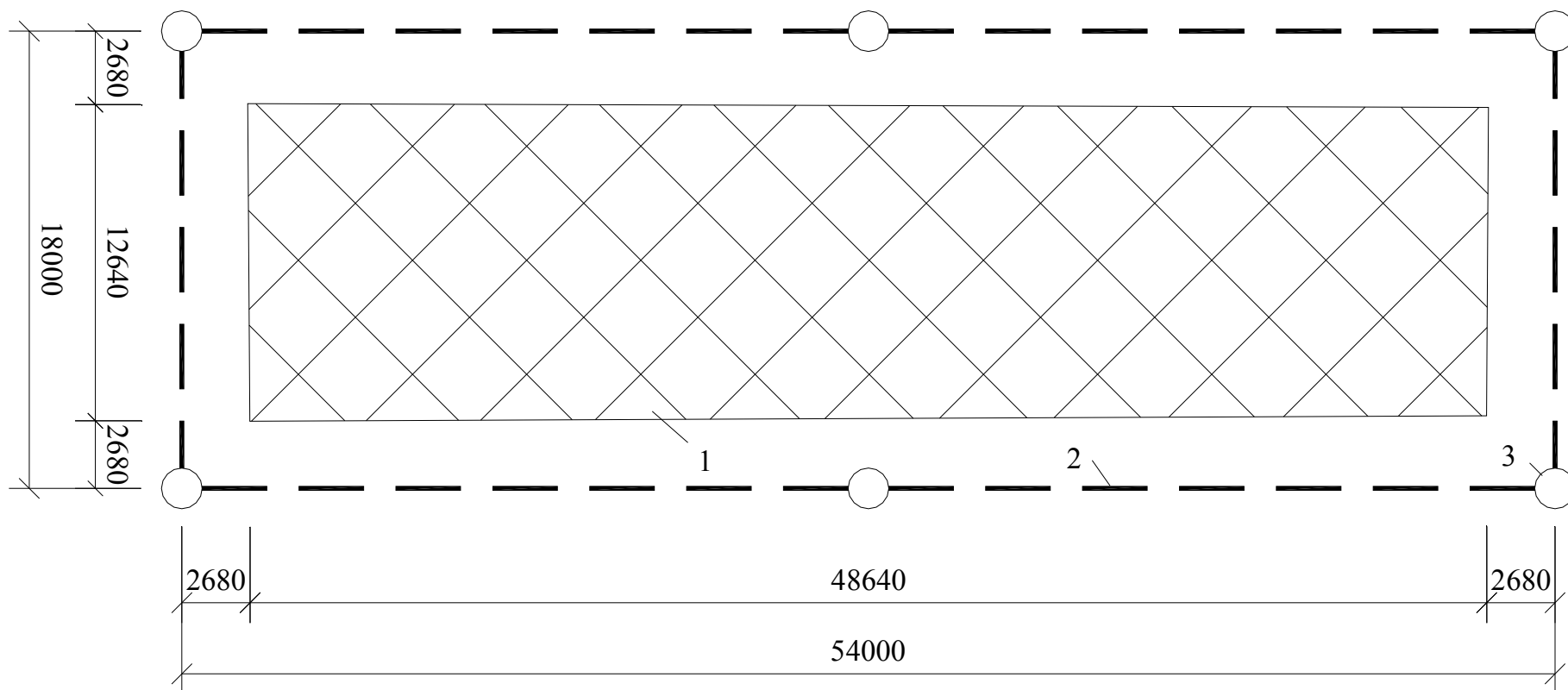


Рис. 111. План макровключения и дренажа: 1 — зона пониженной однородности, заменяющая свайное поле с уплотненным грунтом; 2 — дрены; 3 — смотровые колодцы

Кривая депрессии УГВ под зданием при работе дренажа будет формироваться под влиянием дополнительной техногенной инфильтрации влаги интенсивностью  $\omega$ . Так как Называевск расположен в климатической зоне неустойчивого увлажнения (см. рис. 70), то принимаем по табл. 8 расчетную величину инфильтрации для городской территории  $\omega = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут.}$

Вначале определим коэффициент фильтрации грунта со сваями в пределах свайного поля как некоторого планового макровключения — зоны пониженной проницаемости — с коэффициентом фильтрации  $k_*$ , м/сут. Для этого используем методику, изложенную в § 15.

Супесчаный грунт водоносного пласта по литолого-генетическому типу относится к глинистому (связному), поэтому, прежде всего, определим радиус сваи с зоной максимально уплотненного грунта по формуле (132)

$$r_c = \sqrt{2} R_{\text{ср}} = \sqrt{2} \sqrt{0,4^2 / \pi} = 0,32 \text{ м.}$$

См. также пример 41 и рис. 65.

Между сваями за пределами максимально уплотненной зоны грунт тоже уплотнится, так как в целом свайное поле передает на грунт давление  $p_\phi$  (см. § 15). Найдем коэффициент фильтрации грунта между сваями  $k_r$ , как под широким фундаментом (см. рис. 58). По формуле (127) определяем конечный коэффициент пористости грунта между сваями:

$$e_k = e_0 - a_c p_\phi = 0,85 - 0,5 \cdot 0,12 = 0,79.$$

В формуле В.Н. Жиленкова (121) коэффициент уплотнения грунта под статической нагрузкой для супеси  $\beta_s \approx 20$ . Находим по (121) коэффициент фильтрации грунта между сваями

$$k_r = k \exp[\beta_s(e_k - e_0)] = 0,7 \exp[20(0,79 - 0,85)] = 0,21 \text{ м/сут.}$$

Свайные ряды с шагом свай  $a_1 = 1,5 \text{ м}$  и  $a_2 = 2 \text{ м}$  заменим условными слабопроницаемыми завесами шириной  $2r_c = 0,64 \text{ м}$ , коэффициенты фильтрации которых определим по формуле (146), соответственно при  $a_1 = 1,5 \text{ м}$

$$k_{y31} = k_r \left( 1 + \frac{a_1}{\pi r_c} \text{sh}^2 \frac{\pi r_c}{a_1} \right) = 0,21 \left( 1 + \frac{1,5}{\pi \cdot 0,32} \text{sh}^2 \frac{\pi \cdot 0,32}{1,5} \right) = 0,12 \text{ м/сут}$$

и при  $a_2 = 2 \text{ м}$

$$k_{y32} = k_r \left( 1 + \frac{a_2}{\pi r_c} \text{sh}^2 \frac{\pi r_c}{a_2} \right) = 0,21 \left( 1 + \frac{2}{\pi \cdot 0,32} \text{sh}^2 \frac{\pi \cdot 0,32}{2} \right) = 0,14 \text{ м/сут.}$$

План условных завес показан на рис. 110.

Так как отношение длины и ширины контура дренажа  $L_1/L_2 = 54/18 = 3 < 5$ , то в соответствии с критерием (107) фильтрацию грунтовых вод в дренаж можно рассматривать как осесимметричную в плане. Поэтому коэффициент фильтрации макровключения  $k_*$ , заменяющего свайное поле с уплотненным грунтом (рис. 111), найдем по формуле (116)

$$k_* = \sum_{i=1}^n k_i F_i / \sum_{i=1}^n F_i = [0,12 \cdot 0,64 \cdot 187,52 + 0,14 \cdot 0,64 \cdot 5,36 \cdot 12 +$$

$$+0,21(48,64 \cdot 12,64 - 0,64 \cdot 187,52 - 0,64 \cdot 5,36 \cdot 12)] / (48,64 \cdot 12,64) = 0,19 \text{ м/сут.}$$

Оценим необходимость учета зоны неоднородности пониженной проницаемости при расчете дренажа. Приведенный радиус дренажа  $R_0$  (см. рис. 108) определим по формуле Н.К. Гириного (108). Вначале по соотношению  $L_2/L_1 = 18/54 = 0,33$  найдем коэффициент  $\beta = 1,15$  и определим

$$R_0 = \beta(L_1 + L_2)/4 = 1,15(54 + 18)/4 = 20,7 \text{ м.}$$

Аналогично находим приведенный радиус зоны пониженной проницаемости (макровключения):

$$R_* = 1,15(48,64 + 12,64)/4 = 17,62 \text{ м.}$$

Относительный размер макровключения в пределах дренируемого контура

$$\bar{\xi}_* = R_* / R_0 = 17,62 / 20,7 = 0,85.$$

Относительная проницаемость массива уплотненного грунта со сваями

$$\eta = k_* / k = 0,19 / 0,7 = 0,27.$$

Подставим величины  $\bar{\xi}_*$  и  $\eta$  в неравенство (309) и получим  $0,27 < 0,86$ . Таким образом, критерий (309) выполнен и следует обязательно учитывать зону неоднородности в расчете дренажа. К тому же требованию приходим, используя рис. 107.

Напор в центре дренируемой области  $h_{\text{ц}}$  (см. рис. 108) найдем по формуле (308) с учетом зоны пониженной проницаемости:

$$\begin{aligned} h_{\text{ц}} &= \left\{ \frac{\omega}{2k} \left[ R_0^2 + R_*^2 (\eta^{-1} - 1) \right] \right\}^{0,5} = \\ &= \left\{ \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,7} \left[ 20,7^2 + 17,62^2 (0,27^{-1} - 1) \right] \right\}^{0,5} = 1,44 \text{ м.} \end{aligned}$$

Без учета макровключения по традиционной методике [208] получается большое занижение напора:

$$h_{\text{ц}} = \left\{ \frac{\omega}{2k} R_0^2 \right\}^{0,5} = \left\{ \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,7} \cdot 20,7^2 \right\}^{0,5} = 0,84 \text{ м.}$$

Абсолютная ошибка в определении УГВ при работе дренажа  $1,44 - 0,84 = 0,6 \text{ м}$  довольно значительная, не в запас надежности.

Запроектированный дренаж обеспечит требуемое понижение УГВ, так как фактический максимальный напор  $h_{\text{ц}} = 1,44 \text{ м}$  меньше требуемого  $h_{\text{max}} = 2 \text{ м}$ .

## *Глава 4*

### **Компьютерное моделирование при защите от подтопления**

Моделирование защиты от подтопления в нашей стране ведет начало с работ Н.Н. Павловского [187] и Г.Н. Каменского [91]. Подробный обзор становления моделирования в нашей стране и за рубежом до 1980 г. приведен в монографии И.К. Гавич [50]. В последние годы все большее значение приобретает компьютерное моделирование. Поэтому в нашей работе ему уделено наибольшее внимание.

#### *§ 18. Обзор методов моделирования фильтрации*

В данном обзоре кратко описаны методы моделирования геофильтрации. Основная цель обзора — целенаправленный отбор. Обращено внимание на некоторые полузабытые методики моделирования, которые в настоящее время опять могут быть полезны благодаря компьютерному буму, произошедшему за последние десять лет. Некоторые из этих идей автор постарался развить в рамках своей методики моделирования МКР-Excel.

Моделирование — это замена, отображение или воспроизведение реального объекта моделью с целью изучения на ней поведения и свойств объекта-оригинала [50; 231]. В свою очередь, модель — это абстрактный образ или материальное тело (процесс), которые по своим свойствам аналогичны объекту-оригиналу и достаточно точно воспроизводят поведение объекта-оригинала. Тогда говорят, что модель адекватна объекту.

В теории фильтрации создают модель области фильтрации.

Моделирование фильтрации, влагопереноса и электроосмоса может быть [12; 39; 50; 130; 152; 198; 199; 314]:

- физическое (в грунтовых лотках);
- аналоговое (аналогия жидкостей и электричества);
- численное (вручную и на компьютерах).

Физическое моделирование в грунтовых лотках позволяет исследовать частные случаи динамики потоков влаги и воздуха. Наибольший интерес такое моделирование представляет для проверки теоретических решений, помогает прояснить детали процессов, происходящих в натурных условиях. Лотки по форме могут быть плоскими в виде параллелепипеда (плоская в разрезе фильтрация) или сегментные (осесимметричная фильтрация) [290].

Подробное описание моделирования фильтрации в грунтовом лотке привел С.Ф. Аверьянов [6]. В качестве примера приведем результаты наших опытов в грунтовом лотке с целью проверки полученных теоретических решений по влиянию свайных рядов на поток грунтовых вод [262].

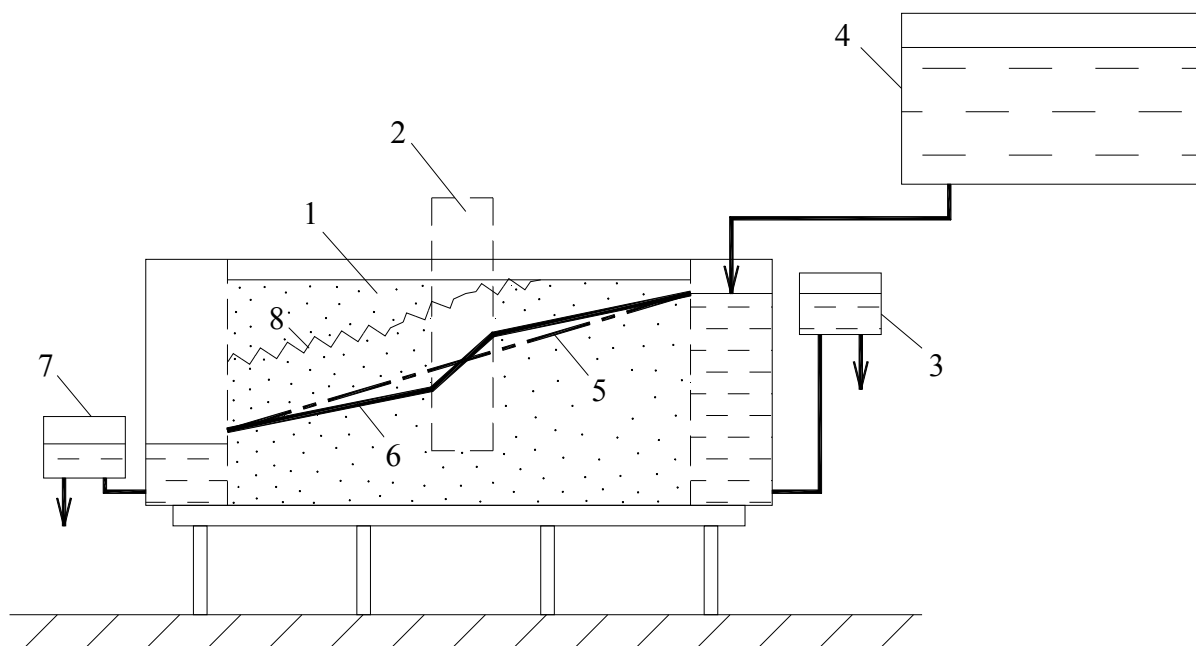


Рис. 112. Грунтовый лоток: 1 — грунт; 2 — модель сваи; 3 — сливной бачок верхнего бьефа; 4 — питающий бак; 5 — естественный УГВ; 6 — УГВ под влиянием свай; 7 — сливной бачок нижнего бьефа; 8 — капиллярная кайма

## Пример 52. Моделирование фильтрации в грунтовом лотке

Опыты в грунтовом лотке проводились в 1984–1985 гг. по изучению влияния однорядного расположения гидродинамически совершенных и несовершенных свай на поток грунтовых вод (свай круглого сечения) относительно положения свободной поверхности грунтовых вод и изменения расхода потока. Несовершенными сваями считались те, которые не доходили нижним концом до водоупора (рис. 112).

Моделирование производилось в стальном плоском лотке (см. рис. 112). Размеры внутренней части лотка, заполняемой грунтом, были следующие: длина 210 см, ширина 34 см, высота 81 см. С боков лотка были отсеки верхнего и нижнего бьефов длиной по 15 см. Эти отсеки отделялись от грунта двумя слоями мелкой латунной сетки на подоснове из перфорированного стального листа. Уровни воды в отсеках бьефов поддерживались постоянными при помощи сливных бачков с раздельной стенкой. Вода в отсек верхнего бьефа поступала из питающего бака размерами 100x70x100 см<sup>3</sup>. Вода в этом баке до начала опытов выдерживалась не менее трех суток при комнатной температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  с целью уменьшения содержания растворенного воздуха. Дно лотка было установлено в горизонтальной плоскости и покрыто слоем глины толщиной 1 см, поверхность которой была принята за условный нуль.

В качестве грунта был взят чистый среднезернистый песок из Люберецкого карьера Московской области. В лоток он был уложен послойно с равномерным трамбованием, а насыщение его водой производилось снизу через бьефы при медленном подъеме уровня воды с целью избежать защемления пузырьков воздуха.

Для регистрации напоров при плоской и пространственной фильтрации воды в лотке использовались пьезометры и наблюдательные скважины.

В качестве пьезометров были взяты стеклянные трубки диаметром 10 мм и длиной 80 см, которые устанавливались вертикально. Пьезометры своими нижними концами прикреплялись шлангами к насадкам с отверстиями в боковой стенке лотка, которые были защищены от просыпания грунта припаянными кусочками латунной сетки. Всего было 35 пьезометров, равномерно распределенных по высоте и длине боковой стенки лотка. Вдоль каждого вертикального ряда пьезометров наклеивалась полоса бумаги со шкалой вертикальных отметок, и при использовании угольника абсолютная погрешность замеров уровней воды была менее 1 мм. Замеры уровня воды производились по нижним менискам в пьезометрах.

Наблюдательные скважины размещались в теле грунта. Они представляли собой латунные трубки диаметром 12 мм и длиной 80 см. В нижней части скважин был установлен фильтр из латунной сетки. Положение уровня воды в скважине фиксировалось электрическим уровнем.

Расход грунтового потока через массив грунта определялся мензурками по поступлению воды из сливного бачка нижнего бьефа. Относительная ошибка измерения расходов была менее 1 %.

Температура воды, фильтрующейся в лотке, определялась как среднее арифметическое температур в верхнем и нижнем бьефе двумя стеклянными ртутными лабораторными термометрами.

Для определения гранулометрического состава и влажности грунта был использован комплект полевой лаборатории ПЛЛ-9-VI. Ситовой анализ люберецкого песка показал, что его фракции 2-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,1 и менее 0,1 мм имеют соответственно процентное содержание по массе 0,44; 53,73; 45,70; 0,13 %. По кривой гранулометрического анализа грунта были определены эффективный диаметр песка  $d_{10}=0,13$  мм и диаметр  $d_{60}=0,30$  мм, соответствующий 60 %-ному массовому содержанию фракций по гранулометрической кривой. За эффективный диаметр  $d_{10}$  принимают диаметр отверстия сита, сквозь которое просеивается 10 % от пробы грунта по массе, то есть на сите остается 90 % массы пробы. Аллен Хазен [186] открыл в 1892 г., что фильтрационные свойства грунта зависят главным образом от мелких частиц. Другими словами, 10 % мелких фракций грунта определяют его проницаемость. Крупные фракции (около 90 %) являются инертной частью. Карл Терцаги и Ральф Пек заметили [280], что в этом отношении грунты в известной степени похожи на бетон. Таким образом, коэффициент неоднородности грунта в лотке

$$K_n = d_{60}/d_{10} = 0,30/0,13 = 2,31 < 5. \quad (310)$$

Так как  $K_n < 5$ , то грунт в лотке был охарактеризован как однородный. Исследования в грунтовых лотках с такими грунтами наиболее корректны. Кроме того, становится возможным использовать различные эмпирические формулы для однородных зернистых грунтов и материалов (формулы А. Хазена, И. Козени и др.). В качестве примера приводим формулу А. Хазена [12] для коэффициента фильтрации чистого однородного песка (м/сут)

$$k = 1000(0,7+0,03 T) d_{10}^2, \quad (311)$$

где  $T$  — температура воды, °C;  $d_{10}$  — эффективный диаметр частиц, мм.

В наших опытах при  $T = 20$  °C по формуле А.Хазена (311) получился

$$k = 1000(0,7+0,03 \cdot 20) = 22 \text{ м/сут}.$$

Более точно коэффициент фильтрации грунта был определен непосредственно в лотке по формуле Дюпюи с поправками С.Ф. Аверьянова, учитывающими влагоперенос в

капиллярной зоне [6]. В лотке был получен  $k = 29 \text{ м/сут}$ . Различие  $k$  со значениями по формуле Хазена можно объяснить тем, что в лотке песчаный грунт был не очень плотный.

В результате опытов в лотке были проверены аналитические формулы автора для расчета влияния свайных рядов на поток грунтовых вод. Сравнение экспериментальных и теоретических значений барражного эффекта (подпора) свайных фундаментов и фильтрационного расхода показало хорошую сходимость в пределах точности измерений.

Таким образом, физическое моделирование не потеряло значения при исследовании фильтрации жидкости и газа и других родственных процессов для изучения частных эффектов.

Аналоговое моделирование, кажется на первый взгляд, устарело. Его существенно потеснило компьютерное моделирование. Но нельзя забывать, что по аналоговому моделированию за XX век были сделаны огромные наработки. Вышли в свет книги с изложением теории и практики этой разновидности моделирования [12; 39; 48; 50; 69; 78; 79; 130; 152; 186; 187; 198; 199; 210; 290; 314; 315], которые взаимно дополнили друг друга.

В 1990-х годах идея аналогового моделирования возродилась в новом качестве как компьютерное аналоговое моделирование. Известные математические суперпрограммы MatLab и MathCAD снабдили мощными визуальными дополнениями, реализующими идею аналогового моделирования, соответственно: Simulink и MathConnex. Появилась возможность вновь использовать полезные наработки по опыту аналогового моделирования прошлых лет. См. также прил. 4.

Классификация аналогового моделирования составлена по литературным данным и личному опыту автора и изображена в виде иерархической структуры с исторической хронологией на рис. 113. ЭГДА — это электрогидродинамическая аналогия для моделирования фильтрации. Метод ЭГДА предложен Н.Н. Павловским в 1922 г. [186; 187]. RR-сеточные модели используют электрические сопротивления (резисторы), а RC-сеточные модели — сопротивления с емкостями (конденсаторами) [78; 130].

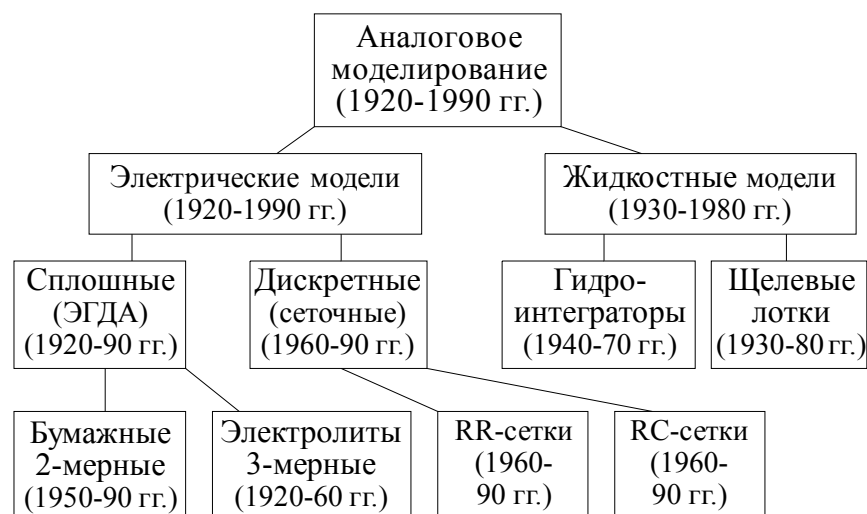


Рис. 113.  
Классификация  
аналогового  
моделирования



### Пример 53. Аналоговое компьютерное моделирование

Рассмотрим аналоговое моделирование трубопроводных систем на языке функциональных блок-диаграмм. Это моделирование полезно для технологического проектирования систем строительного водоотлива, водопонижения и т.д. [246].

Традиционные методы расчёта систем подачи и распределения жидкости и газа по трубопроводам сложны и трудоёмки. Покажем метод аналогового моделирования трубопроводных систем на языке функциональных блок-диаграмм (FBD) в среде пакета SIMULINK компьютерной системы MatLab 5/6 for Windows. Данный метод существенно облегчает проектирование сложных трубопроводных систем (разветвлённых, кольцевых), что может быть использовано для проектирования систем водопонижения. Используем аналогию перепада напора (давления) и мощности электрического тока.

Формула Вейсбаха для перепада (потерь) напора в трубе  $\Delta H$  имеет вид [249; 254; 256]

$$\Delta H = \zeta V^2 / (2g), \quad (312)$$

где  $\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $V$  — скорость потока жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

Введём обозначение общего гидравлического сопротивления трубы

$$S = \zeta / (2g\omega^2), \quad (313)$$

где  $\omega$  — площадь живого сечения трубы.

Тогда формулу (312) через объёмный расход  $Q$  можно записать так:

$$\Delta H = SQ^2. \quad (314)$$

Аэродинамическое сопротивление газопровода имеет вид [253, 256]

$$F = \zeta \rho / (2\omega^2), \quad (315)$$

где  $\rho$  — плотность газа.

Соответственно потери давления в газопроводе

$$\Delta p = FQ^2. \quad (316)$$

Мощность электрического тока  $P$  связана с сопротивлением проводника  $R$  и силой тока  $I$  так [122]:

$$P = RI^2. \quad (317)$$

Аналогия уравнений (314), (316) и (317) очевидна. Это позволяет моделировать электрическими цепями с резисторами сложные трубопроводные системы, несущие жидкость или газ. Мощность тока на различных участках цепи можно измерить с помощью амперметра и вольтметра:

$$P = UI, \quad (318)$$

где  $U$  — напряжение.

Так средствами электротехники создавали аналоговую модель исследователи прошлых лет. Однако аналогия мощности тока обычно не использовалась, ибо электрические модели, собираемые в лабораторных условиях, имели жёсткие ограничения. Нельзя было подать на модель напряжение в несколько киловольт, её сразу бы пробило.

Теперь при моделировании в SIMULINK можно подать на модель несколько десятков или даже сотен киловольт. Это виртуальное напряжение, а не действительное. Оно существует только как компьютерная абстракция. Работа с виртуальными напряжениями

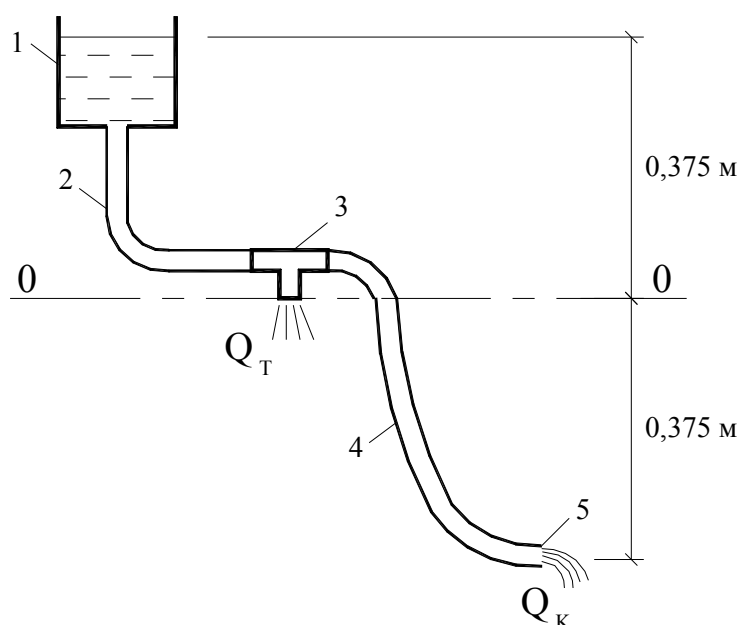
гораздо проще и удобнее, чем с действительными. В компьютерных аналоговых моделях отсутствует разброс сопротивлений резисторов, все контакты и провода абсолютно надёжны, измерительные приборы точны.

В последние годы получил развитие язык моделирования реальных процессов и систем — язык функциональных блок-диаграмм — FBD. Он принципиально отличается от традиционных лингвистических языков программирования: СИ, СИ++, Паскаль, Бейсик, Фортран, Ассемблер и т.д.

Суть FBD состоит в том, что каждый блок имитирует часть системы, например участок трубопровода или задвижку. Связи между блоками просто рисуются на экране с помощью манипулятора «мышь», а в традиционных языках надо писать программный код. Собранный виртуальную аналоговую FBD-модель можно запустить на исполнение (симуляцию), проследить поведение системы и снять её характеристики.

Язык FBD быстро внедряется в промышленность, транспорт, инженерные системы городов. Появился он и в популярных компьютерных программах. Например, в пакете MathCAD, начиная с версии 7.0 (1997 г.), встроено приложение MATHCONNEX. Это фактически FBD с шестнадцатью компонентами-блоками. Но наиболее мощно принцип FBD использован в SIMULINK MatLab. Здесь компьютерные библиотеки насчитывают сотни функциональных блоков разных категорий: автоматика и управление, электроника и силовое оборудование, коммуникации и многое другое.

Покажем на простом примере, как моделировать трубопроводные системы на языке FBD в пакете SIMULINK системы MatLab 5/6. Для непосредственной проверки была собрана небольшая опытная гидравлическая установка (рис. 114). От питающего бака 1 с постоянным уровнем воды вниз отходил резиновый шланг 2 (1-й участок) длиной 120 см, диаметром 4,5 мм, с абсолютной шероховатостью 0,02 мм. Вода имела температуру +10 °С. Она частично вытекала из тройника 3 с расходом  $Q_T = 2,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Другая часть потока проходила по шлангу 4 (2-й участок) длиной 170 см и вытекала в конце 5 с расходом  $Q_K = 7,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Гидравлические характеристики трубы и тройника были определены опытным путём. Тройник имел коэффициенты сопротивления прямого прохода  $\zeta_{\pi} = 1$  и бокового поворота  $\zeta_{\phi} = 9$ . Трубы работали в турбулентном режиме как гидравлически гладкие.



Предположим, целью моделирования является определение расходов в данной гидравлической системе. Вначале готовим исходные данные. Линейные и местные гидравлические сопротивления определяем по формуле (313), приравниваем их численные значения электрическим сопротивлениям резисторов и сводим в табл. 16.

Рис. 114. Моделируемая гидравлическая система

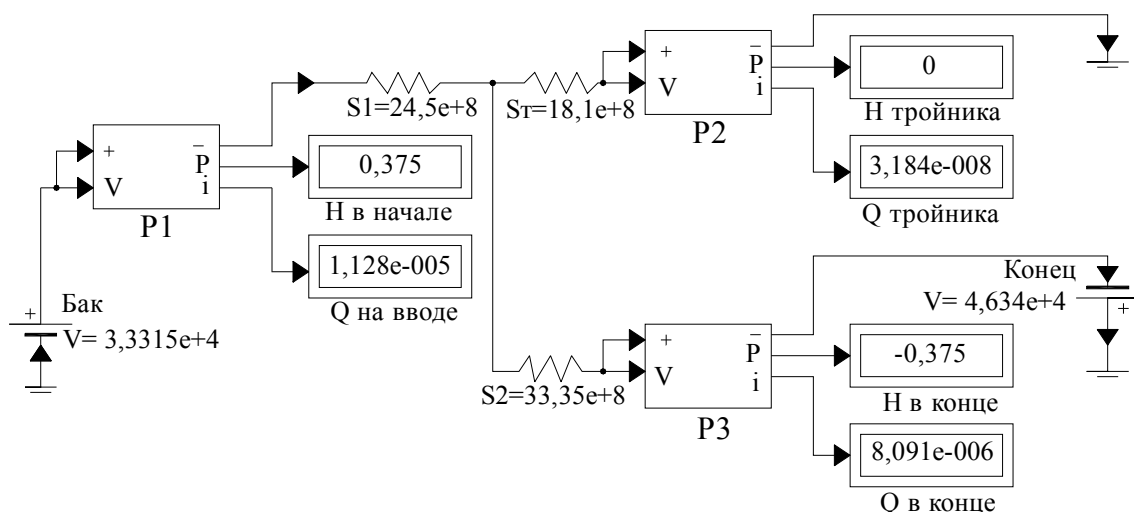


Рис. 115. Аналоговая компьютерная модель гидравлической системы

Рис. 116. Подсистема «Измеритель мощности тока»

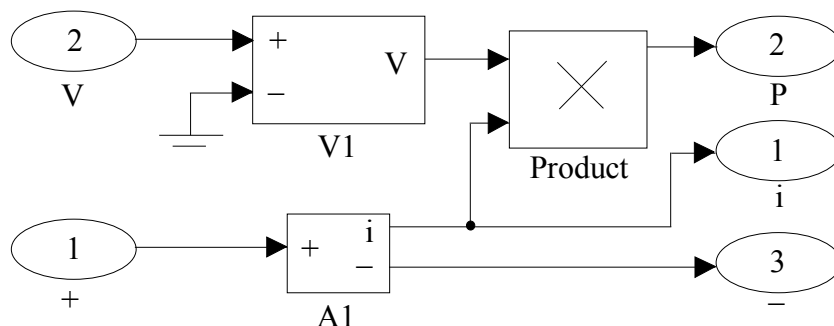


Таблица 16

Сопротивление 1-го участка S1	Сопротивление тройника (на поворот) St	Сопротивление 2-го участка S2
24,5·10 <sup>8</sup>	18,1·10 <sup>8</sup>	62,3·10 <sup>8</sup>

Затем в среде SIMULINK MatLab 5/6 за две-три минуты собираем виртуальную электрическую модель системы (рис. 115). Обозначения S1, St, S2 см. в табл. 16. Расходы  $Q$  показаны на рис. 115.

Проанализируем данную модель. Питающий бак имитируется источником питания. Далее включён прибор «Измеритель мощности тока» P1. Прибор моделируется в виде подсистемы блоком Subsystem, то есть представляет собой «чёрный ящик». Двойной щелчок «мышью» по нему раскрывает схему подсистемы (рис. 116). Прибор имеет два входа и три выхода. Замеры вольтметра V1 и амперметра A1 перемножаются блоком Product, и на выход 2 подаётся мощность тока, то есть численное значение действующего напора согласно аналогии формул (314) и (317). Значение тока на выходе 3 соответствует расходу в данной точке трубопровода. Приборы P2 и P3 аналогичны P1.

Другой источник питания моделирует конец трубы (см. рис. 115). Напряжения  $U$  источников питания заранее не известны. Ориентировочное значение для бака

$$U \approx (P \cdot R)^{0,5} \approx (\Delta H \cdot S)^{0,5}, \quad (319)$$

где численные значения величин надо подставлять в системе единиц СИ. Значение  $U$  для конца трубы первоначально можно взять такое же, как для бака.

Собранная модель до запуска (симуляции) имеет нулевые показания напоров и расходов в прямоугольниках, имитирующих дисплеи. После первого запуска появляются численные значения этих величин. Изменяя напряжения источников питания и перезапуская модель, добиваемся значений напоров на модели, соответствующих исходной гидравлической системе (см. рис. 114). В итоге получаем напоры: на входе —  $0,375 \text{ м}$ ; на тройнике —  $0 \text{ м}$ ; на конце трубы — минус  $0,375 \text{ м}$  (см. рис. 115). Процесс подбора занимает около минуты.

Цель моделирования достигнута, получены значения расходов в разных точках гидравлической системы (см. рис. 114):

$$Q_T = 3,164 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \text{ и } Q_K = 8,091 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сравнение с фактическими значениями расходов (см. выше) даёт расхождение значений, не превышающее 15 %, что вполне допустимо для потока с турбулентным режимом.

Несколько слов о моделировании газопроводов и воздухопроводов. Представим, что на рис. 114 изображена система естественной вентиляции для вентиляционного дренажа. Вместо бака стоит вытяжная шахта, вместо труб — воздухопроводы, а вместо тройника и конца трубы — воздухоприёмные отверстия. Тогда электрическая имитационная модель собирается в SIMULINK MatLab точно так же, как показано на рис. 115, только вместо напоров задаётся перепад давлений (естественная тяга), а в сопротивления подставляются аэродинамические  $F$  по формуле (315).

Следует также заметить, что в компьютерной системе MatLab 5/6 имеется дополнительный встроенный пакет PDETOOL, позволяющий моделировать в линеаризованных постановках двумерные стационарные и нестационарные задачи математической физики: магнетизм, электростатика, теплопроводность, диффузия. PDETOOL можно применять для моделирования фильтрации подземных вод, используя аналогию физических процессов (см. прил. 4) и линеаризацию исходных постановок (см. § 8).

Большое практическое значение имеет совместное моделирование фильтрации подземных вод, воздуха и гидравлики трубопроводов при разработке технологий строительного водопонижения, особенно движущихся объектов строительства, например, щитовых проходок метрополитенов и глубоких коллекторов. Наши исследования гидрогеологии Омска в зонах подземных проходок метро, проведённые в 1992–1994 годах, показали, что наиболее перспективными для города являются системы вакуумного водопонижения. Дальнейшее освоение этих технологий можно ускорить с помощью имитационного моделирования систем по представленной методике в комплексе с МКР-Excel.

#### Выводы

1. Язык функциональных блок-диаграмм FBD в пакете SIMULINK MatLab 5/6 позволяет моделировать сложные трубопроводные системы строительного водоотлива, водопонижения и дренажа.
2. Моделирование гидравлических и аэродинамических трубопроводных систем удобно проводить с использованием аналогии мощности электрического тока.
3. При моделировании не нужно задавать никаких масштабных коэффициентов, принимая непосредственные характеристики трубопроводных систем в качестве исходных параметров модели, что чрезвычайно удобно для пользователей разработанной методики моделирования.

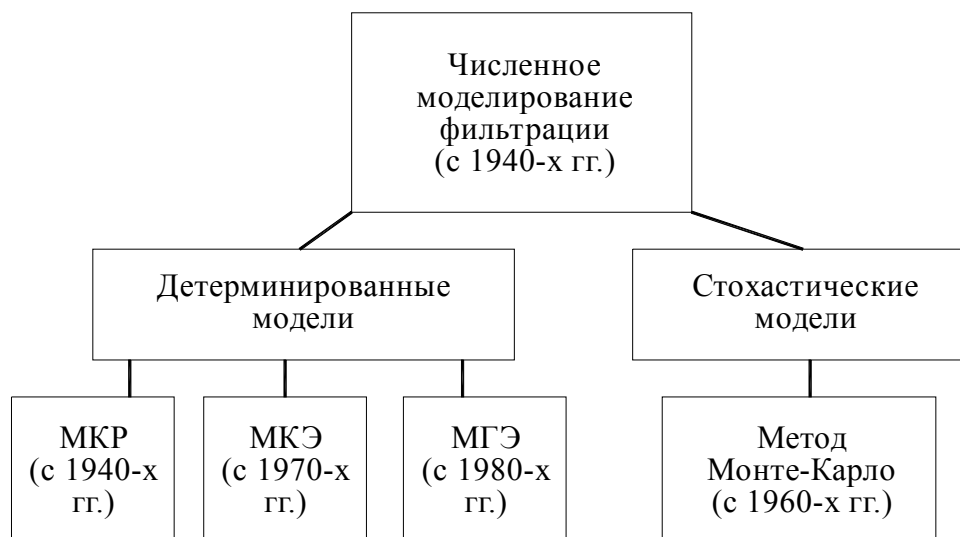


Рис. 117. Классификация численного моделирования

Численное компьютерное моделирование в настоящее время доминирует над другими методами моделирования при исследовании фильтрационных процессов. Классификация основных методов численного моделирования фильтрации изображена на рис. 117. В данной классификации отражена историческая хронология начала применения каждого метода моделирования фильтрации. Общей чертой всех численных методов моделирования является их дискретность по пространству и времени, когда исходный объект заменяют моделью, состоящей из узловых точек, а смена состояний происходит шагами по времени [173].

В переводе с английского *determined* — определенный. Чем больше полезной информации мы узнаём об изучаемом объекте, тем больше модель, его отражающая, становится детерминированной, то есть более определенной и менее стохастичной, менее вероятностной.

Детерминированная модель, по И.К. Гавич [50], — это отражение реальной системы с известными закономерностями, которые описываются конкретными физическими и дифференциальными уравнениями. Например, фильтрация подземных вод в дренаж описывается законом Дарси и дифференциальными уравнениями фильтрации эллиптического (для стационарных процессов) или параболического (для нестационарных процессов) типов. Практика защиты от подтопления городов, проектно-изыскательские и строительные работы по водоотливу, водопонижению и дренажу в основном используют детерминированные модели фильтрации. Это отражено в нормативных документах. Например, при определении фильтрационных характеристик грунтов с помощью откачек из скважин в ходе инженерных изысканий определяют конкретные коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунтов строительной площадки.

Степень изученности городской гидрогеологической среды увеличивается с каждым годом. Информация о грунтах, зданиях, сооружениях, коммуникациях и сетях документируется и архивируется. Таким образом, для городских территорий информация накапливается на бумаге, и создаются компьютерные базы данных, которые в последнее время стали называть «геоинформационными системами». Поэтому в нашей работе все расчеты и моделирование рассмотрены для детерминированных систем. Библиография по таким моделям довольно велика, поэтому ссылки даны по ходу изложения.

Стохастические модели — это вероятностные, статистические модели. В теории фильтрации их изучали Ю.П. Борисов [32], М.И. Швидлер [310; 311], В.Н. Эмих [323], В.К. Рудаков [222], М.В. Болгов, Е.С. Дзекцер, В.Ф. Писаренко [28], С.П. Поздняков [196] и др. Такие модели целесообразно применять для описания слабо изученных объектов, которые обычно находятся вне городских территорий. Например, С.П. Поздняков применил стохастические модели мелиоративного дренажа при проектировании Карабалтинской оросительной системы в Средней Азии, где фильтрационная неоднородность грунтов не поддавалась закономерному описанию вследствие малой изученности [196]. Метод Монте-Карло или, по-другому, метод статистических испытаний является основным при построении стохастических моделей [77; 148; 199]. Подробная библиографическая сводка по стохастическому моделированию приведена в книге [210].

Детерминированное моделирование фильтрации производят в основном тремя методами: конечных разностей (МКР), конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ). В МКР, который также называют «методом сеток», напоры отыскивают в узлах сетки, то есть в точках. В МКЭ напор относится не к узлу, а в среднем к элементу. В МГЭ дискретно задают только границу области фильтрации [34].

Идея метода сеток — МКР — восходит в XVIII век к Леонарду Эйлеру (Euler Leonhard) [72]. Пожалуй, первым, применившим метод конечных разностей (МКР) к задачам фильтрации, был Е.Л. Николаи, читавший лекции студентам Ленинградского Политехнического института в 1920-х годах [12]. Большой вклад в математическую сторону МКР и его популяризацию внес Д.Ю. Панов [188]. Широкое применение МКР для моделирования нестационарной фильтрации подземных вод началось с 1940-х годов после выхода в свет монографии Г.Н. Каменского [91]. До 1950-х годов расчеты для МКР-моделей выполняли вручную, в лучшем случае с помощью арифмометров и логарифмических линеек. После 1950 г. стали развиваться компьютеры (ЭВМ), что вызвало повышение интереса исследователей к численным методам. Академик А.А. Самарский разработал мощную теоретическую базу для МКР [226; 227; 286]. Особенно важным шагом было введение А.А. Самарским принципа баланса (интегро-интерполяционного принципа) при построении

конечно-разностных схем. Этот принцип обеспечивает высокую надежность МКР, придает МКР наглядный физический смысл. Поэтому принцип баланса широко использован в нашей работе для МКР-Excel.

Метод конечных элементов (МКЭ) первоначально был применен для решения задач строительной механики стержневых систем, где он является точным методом [85; 277]. Моделирование фильтрации с помощью МКЭ впервые применил О.К. Зенкевич (О.С. Zienkiewicz) [86]. МКЭ известен также под названием «проеекционно-сеточный метод» [139]. МКЭ применен в инструментарии PDETOOL известной компьютерной системы численного моделирования MatLab 5/6 фирмы MathWorks (США) для моделирования линейных процессов теплопроводности и диффузии. По аналогии этот инструментарий может быть использован для моделирования фильтрации методом МКЭ (см. прил. 4). Наш метод МКР-Excel мы сравнили с МКЭ, используя PDETOOL MatLab. Пример использования PDETOOL приведен в § 16, результаты которого показаны на рис. 91 – рис. 92.

Метод граничных элементов (МГЭ) называют также методом граничных интегральных уравнений [112]. Название МГЭ предложил К.А. Бреббия (С.А. Brebbia) [33]. Имеется разновидность МГЭ в виде комплексного метода граничных элементов (КМГЭ) [65]. Все эти методы требуют от исследователя достаточно сложных математических выкладок. Мы использовали пример одномерной МГЭ-модели из [33, с. 26], где приведена таблица сравнения результатов численного решения МГЭ с точным решением. Эту задачу мы решили методом МКР-Excel, причем наша компьютерная модель имела всего 11 узлов. Сборка модели заняла лишь несколько минут, а итерационный счет был произведен за доли секунды. Сравнительные результаты представлены в табл. 17.

Таблица 17

Аргумент x	Результаты МГЭ	Точное решение	Результаты МКР-Excel
0,1	0,018417	0,018642	0,018659
0,2	0,035466	0,036098	0,036132
0,3	0,050123	0,051195	0,051243
0,4	0,061369	0,062783	0,062842
0,5	0,068181	0,069747	0,068912
0,6	0,069539	0,071018	0,071084
0,7	0,064421	0,065585	0,065646
0,8	0,051806	0,052502	0,052550
0,9	0,030673	0,030902	0,030930

Анализируя таблицу, нетрудно заметить, что погрешность МГЭ по сравнению с точным решением составляет 1-2 %, а соответствующая погрешность МКР-Excel — не более 0,1 %. Результаты сравнения явно указывают на преимущество МКР-Excel.

## § 19. Метод автора МКР-Excel и автоматизация моделирования

Метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel) позволяет моделировать фильтрацию воды и воздуха, фильтрационную консолидацию, влаготеплоперенос и электроосмос при защите от подтопления в городском строительстве. Моделировать можно одно-, двух- и трехмерные стационарные и нестационарные процессы в однородных и неоднородных пористых средах.

Отсутствие публикаций на русском языке по использованию электронных таблиц для моделирования фильтрации позволяет автору заявить свой приоритет в России по разработанной методике, опубликованной в 1998 г. [252; 257; 261]. В более поздней публикации В.Д. Орвиса (США) в 1999 г. [174] были представлены сходные идеи по моделированию лишь одномерного процесса нестационарной теплопроводности стержня в таблицах Excel. Издание книги В.Д. Орвиса содержит только два небольших примера применения метода конечных разностей по теории теплопроводности в таблицах Excel 97. В нашей работе, основанной на независимых исследованиях автора, проведенных с конца 1980-х годов, представлен метод моделирования в электронных таблицах целых классов задач фильтрации применительно к защите от подтопления в городском строительстве. Этот авторский метод не имеет аналогов в мировой практике, поэтому он получил уникальное название МКР-Excel.

В электронных таблицах метод конечных разностей автор стал применять в конце 1980-х годов в пакете SuperCalc 4.0 © 1986 фирмы Computer Associates. Таблицы SuperCalc работают в операционной системе MS-DOS [225]. Идея использовать для моделирования электронные таблицы пришла автору как альтернатива кропотливой работы по созданию систем моделирования путем использования лингвистических языков программирования Си, Си++, Паскаль, Бейсик, Фортран и Ассемблер. Эта идея позволяет широко внедрять компьютерное моделирование, так как:

- 1) пользователю не обязательно быть программистом;
- 2) электронные таблицы необычайно популярны среди пользователей;
- 3) методика моделирования несложная, но надежная.

Оказалось, что электронные таблицы позволяют достаточно быстро собрать и рассчитать малую или среднюю модель области фильтрации с общим количеством узлов до 100 000. Сборка крупных моделей ограничена числом узлов до 1 миллиона, но проблема большого количества узлов свойственна всем компьютерным пакетам, в том числе и многочисленным коммерческим программам, написанным на различных лингвистических языках программирования. При увеличении числа узлов модели от 100 000 до 1 000 000 расчет модели замедляется в любом пакете и зависит от



аппаратных возможностей компьютера. Поэтому электронные таблицы не уступают специализированным пакетам по производительности.

Электронные таблицы предоставляют весьма удобную среду моделирования. Они знакомы большинству пользователей персональных компьютеров. Это позволяет обмениваться информацией, помогать друг другу в обучении и разрабатывать модели коллективно в единых стандартах и форматах. Учебно-педагогическая практика автора показала, что моделирование в электронных таблицах воспринимается студентами легко и с большим интересом. Эти таблицы применяются во многих учебных курсах, что также повышает интерес к их использованию.

Чем лучше проработан сервис таблицы, тем удобнее в ней моделировать. Не нужно терять времени на всякие алгоритмические уловки, например, по программированию итерационных циклов, так как итерации встроены в электронные таблицы. Не нужно изобретать логические условия наперед заданной точности расчета модели, так как параметры относительной погрешности результатов расчета тоже встроены в таблицы. Другими словами, по многим параметрам в электронных таблицах при моделировании не нужно заново «изобретать велосипед».

Сборка модели в электронной таблице производится примерно так же, как если бы собиралась дискретная электрическая модель. Это обеспечивает преемственность развития фильтрационного моделирования, так как можно использовать:

- литературу прошлых лет по дискретному моделированию на электрических и гидравлических моделях [130];
- старые, но проверенные практикой математические руководства по численному моделированию, ориентированные на ручной счет [188].

В то же время появляются новые возможности:

- 1) отпадает необходимость программирования итерационных циклов, так как они встроены в электронные таблицы;
- 2) тоже касается наперед заданной точности расчета модели, которая определяется пользователем таблицы через параметр меню;
- 3) более опытные пользователи с программистским стажем могут применить встроенный язык макропрограммирования.

Рассмотрим кратко SuperCalc 4.0. Эти электронные таблицы имеют 255 столбцов и 9999 строк. Манипулятор «мышь» не предусмотрен, что создает некоторое неудобство. Пересчет таблицы запускается функциональной клавишей F7. Вся работа по набору производится с помощью клавиатуры. Меню расположено внизу, вход в меню реализован с помощью слэш-клавиши (косая черта) «/». Максимальное количество итераций 99, это немного. Есть встроенный язык макропрограммирования. Бесконечные итерации можно задать программно с помощью макроса, показанного на рис. 118.

	A
1	{macro}
2	{calc}
3	{branch A2}
4	{quit}

Рис. 118. Макрос SuperCalc «Бесконечные итерации»

Вначале надо поместить курсор в ячейку A1. Бесконечные итерации запускаются с помощью комбинации клавиш ALT+F5. Прервать итерационные циклы можно комбинацией CTRL+BREAK. Бесконечные итерации могут быть полезны при моделировании больших, медленно сходящихся моделей, причем сходимости имеется в виду математическая. Таблицы могут работать с именами, которые присваивают отдельной ячейке или диапазону ячеек.

Невзирая на некоторую архаичность (отсутствие мыши), в SuperCalc можно решать одно-, двух-, трехмерные стационарные и нестационарные задачи. Графические возможности у SuperCalc довольно бедные, что объяснимо принадлежностью к устаревшей операционной системе MS-DOS.

#### Пример 54. Моделирование одномерной стационарной фильтрации

Рассмотрим вначале самый простой пример моделирования напорной одномерной стационарной фильтрации в электронных таблицах SuperCalc 4.0. Требуется построить напорную линию при фильтрации от левой траншеи к правой (рис. 119).

В левой траншее напор  $HL = 5$  м. В правой траншее напор  $HR = 3$  м. Напорная фильтрация воды (без свободной поверхности) происходит под влиянием разности напоров  $HL - HR$  от левой траншеи к правой через слой песка мощностью  $M = 2$  м с коэффициентом фильтрации  $k = 10$  м/сут. Горизонтальная плоскость отсчета напоров 0-0 принята по поверхности нижнего водоупорного слоя. Расстояние между траншеями  $L = 50$  м.

Применим метод конечных разностей (МКР). Разобьем  $L$  на равные отрезки с шагом  $DL = 10$  м (см. рис. 119). Ниже, под рисунком траншеи, покажем прямую линию с узлами. Каждый узел — это ячейка электронной таблицы, которая показана еще ниже на рис. 119. В ячейку A1 введем численное значение напора левой траншеи 5. В ячейку F1 — напор в правой траншее 3. Выведем формулу моделирования для узла  $i$  (см. рис. 119). Обратим внимание, что ячейка таблицы — это узел, то есть точка, а не блок. Запишем уравнение баланса воды через узел  $i$ , то есть через ячейку C3. Входящий фильтрационный расход от узла  $i-1$  к узлу  $i$  равен выходящему расходу от узла  $i$  к узлу  $i+1$ . Расход — это скорость, умноженная на площадь живого (поперечного) сечения потока. Живое сечение  $\omega = M \cdot 1$ , где 1 — это ширина потока 1 метр. Скорость фильтрации записываем по закону Дарси. Имеем исходное уравнение баланса фильтрующейся воды:

$$k \frac{H_{i-1} - H_i}{DL} M \cdot 1 = k \frac{H_i - H_{i+1}}{DL} M \cdot 1.$$

Отсюда выразим напор в узле  $i$ , то есть получим формулу моделирования в виде

$$H_i = (H_{i-1} + H_{i+1})/2 \quad (320)$$

Это самая простейшая МКР-формула [188].

Наберем формулу (320) в ячейке C1 так:

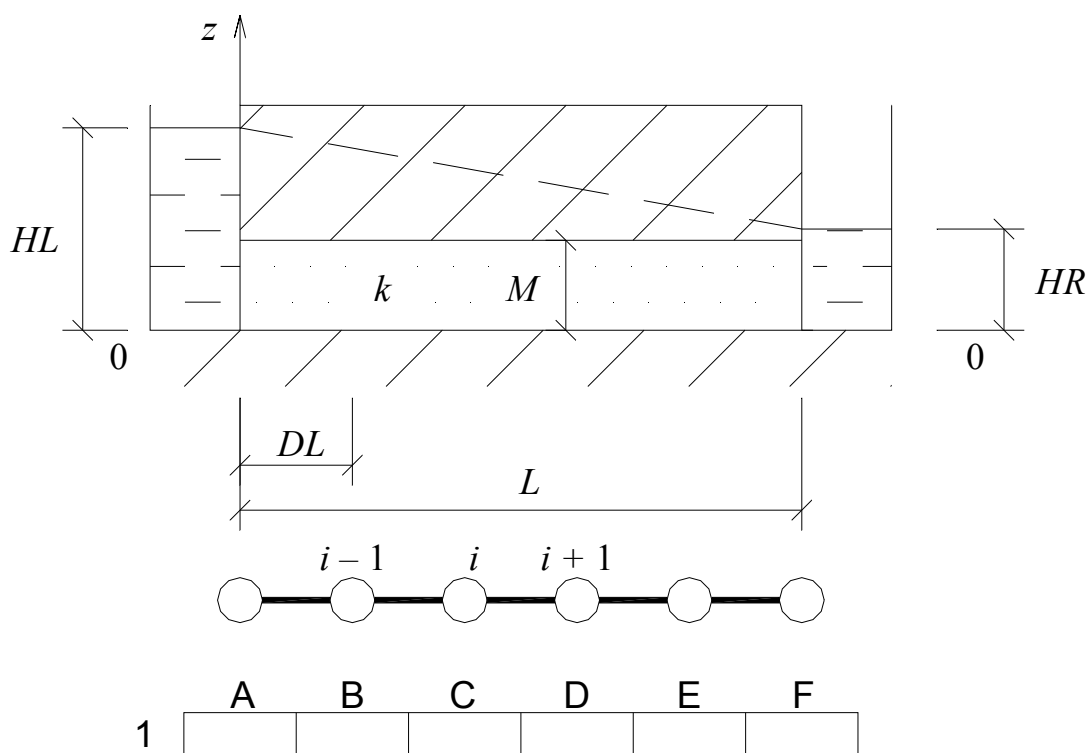


Рис. 119. МКР-модель напорной одномерной стационарной фильтрации

$$(B1+D1)/2$$

и нажмем клавишу ENTER. Мы ввели формулу моделирования лишь в одну ячейку C1, а по методу МКР надо, чтобы в каждом узле напор выражался через соседние напоры. То есть получается, что с помощью формулы ( 320 ) мы как бы сцепляем ячейки между собой. Скопируем формулу из ячейки C1 в оставшиеся незаполненными ячейки B1, D1, E1. Осталось запустить расчет МКР-модели циклическими итерациями. В SuperCalc 4.0 запуск расчета производится клавишей F7. Нажмем F7 и будем удерживать. В результате через несколько секунд получим численное решение напорной линии в ячейках модели (напоры,  $m$ ):

A	B	C	D	E	F
5	4,6	4,2	3,8	3,4	3

Этот пример самый простой в теории фильтрации. Он легко проверяется аналитически по закону Дарси. Напор в любом сечении пласта обратно пропорционален горизонтальной координате  $x$ . Уравнение баланса воды имеет вид

$$k \frac{HL - HR}{L} \cdot M = k \frac{HL - H}{x} \cdot M,$$

откуда напор в любом сечении линейно зависит от горизонтальной координаты  $x$ :

$$H = HL - (HL - HR)x/L. \quad (321)$$

Значения напора в метрах по аналитической формуле (321):

$x$	0	10	20	30	40	50
$H$	5	4,6	4,2	3,8	3,4	3

Убеждаемся, что численные значения напора на модели и по формуле (321) совпали. Таким сравнением при известных аналитических решениях можно проверять модели. Это называется калибровкой модели.

На смену SuperCalc 4.0 фирмой Computer Associates был разработан SuperCalc 5.0 © 1989, также функционирующий в операционной системе MS-DOS. Версия 5.0 позволила в 3 раза быстрее рассчитывать модели по сравнению с версией 4.0. Кроме того, в версии 5.0 появились множественные листы-spreadsheets. Пересчет таблицы в 5-й версии запускается клавишей F9. Остальные изменения были незначительные.

Электронные таблицы Lotus 1-2-3 фирмы Lotus Development Corporation до начала 1990-х годов выпускали под MS-DOS. Они были написаны в ассемблерных кодах. Поэтому до появления операционной системы Microsoft Windows таблицы Lotus 1-2-3 были самыми быстрыми при расчетах [111]. В Lotus 1-2-3 есть интересная опция назначения направления итерационного счета табличной модели по строкам или по столбцам. Такой опции нет в SuperCalc или Excel, но при необходимости ее можно реализовать с помощью встроенных языков программирования. Число фиксированных итераций в Lotus 1-2-3 не более 50. Бесконечные итерации можно задать простым макросом, представленным на рис. 120.

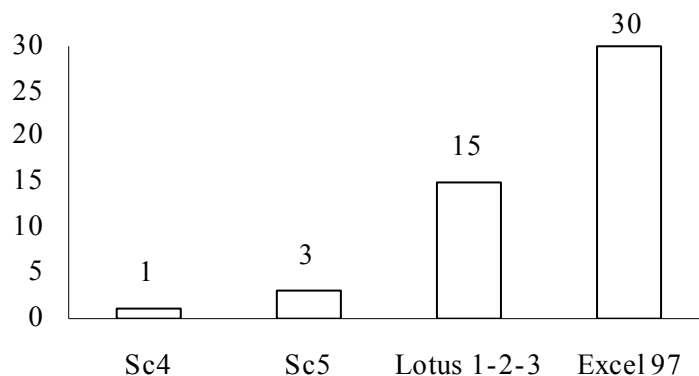
	<b>A</b>
1	{calc}
2	{branch A1}

Рис. 120. Макрос Lotus 1-2-3 «Бесконечные итерации»

Курсор должен находиться в ячейке A2. Бесконечные итерации запускаются с помощью комбинации клавиш CTRL+F. Прервать итерационные циклы можно комбинацией CTRL+BREAK.

Интересной особенностью таблиц Lotus 1-2-3 для операционной системы Windows является отключение графического режима во время пересчета табличной модели. Это приводит к ускоренному пересчету таблицы в течение итерационных циклов. Цифры на экране как бы замирают во время итераций, а окончательные числовые значения модели появляются лишь после прерывания итераций. Поэтому быстрое действие МКР-моделей в Lotus 1-2-3 не зависит от производительности видеокарты конкретного компьютера. К сожалению, таблицы Excel не имеют такой интересной особенности временного отключения видеорежима, но автор обнаружил интересное недокументированное свойство Excel для ускорения пересчета моделей в Excel. В результате таблицы Excel рассчитывают МКР-модель примерно в два раза быстрее, чем Lotus 1-2-3.

Рис. 121. Сравнительное  
быстродействие расчета  
МКР-моделей в  
электронных таблицах



Таблицы Microsoft Excel для Windows с начала 1990-х годов получили массовое распространение. Начиная с версии Excel 5.0 ©1993, в таблицах появился весьма удобный интерпретирующий язык программирования Visual Basic for Application (VBA) [175]. До него Excel имели язык макросов, то есть язык макрокоманд. Следует отметить, что макропрограммирование используется также в электронных таблицах SuperCalc фирмы Computer Associates и Lotus 1-2-3 фирмы Lotus Development Corporation.

Наибольшего совершенства достигла версия Microsoft Excel 97 © 1997, где VBA получил отдельную оболочку. Сравнительное быстродействие при расчете МКР-моделей в SuperCalc 4.0 (Sc4), SuperCalc 5.0 (Sc5), Lotus 1-2-3 и Excel 97 показано на рис. 121. Данный рисунок получен автором по результатам разработки большого числа компьютерных моделей в перечисленных программных продуктах.

Таким образом, автором окончательно были выбраны таблицы Microsoft Excel 97 (русская версия) для моделирования методом конечных разностей (МКР), а методика получила название МКР-Excel. Версия Excel 2000 изменилась несущественно, и в данной книге описание методики МКР-Excel сделано с использованием версии Excel 97, учитывая ее массовое распространение в вузах России на компьютерах средней производительности типа Intel Pentium, Pentium-MMX, Celeron, Pentium-II с тактовой частотой 100–400 МГц и оперативной памятью 32–96 Мб. Работы проводились в операционной системе Microsoft Windows 98.

В середине 1990-х годов ведущий программист компании Microsoft (США) Чарльз Симони сделал интересное заявление о том, что разработка новых языков программирования была прекращена из-за огромного количества наработанных кодов [105]. Написание прикладных программ вышло на новый, более высокий уровень. В то же время программирование стало доступным и непрофессионалам — огромной армии исследователей.

У проектировщика, научного работника, аспиранта, студента, связанных с защитой от подтопления, постоянно возникает потребность в получении достоверного расчёта дренажных систем. Традиционная методика расчёта

по формулам изложена в справочном пособии к СНиП [208]. Однако сложные расчёты приходится моделировать. Наиболее чистым способом является компьютерное моделирование.

Рассмотрим концепцию применения новейшей OLE-технологии при компьютерном моделировании задач фильтрации при защите от подтопления территорий застройки [257].

Программировать «с нуля» нерационально, да и не нужно изобретать велосипед. Технология OLE (Object Linking and Embedding), начиная с версии 2.0, появившаяся в конце 1993 г. [320], позволяет самостоятельно собрать в единый пользовательский пакет, настроить и заставить работать на исследователя необходимые ему части общедоступных фирменных программных продуктов. Эта технология при использовании для программирования языка Visual Basic for Application (VBA) наилучшим образом подходит для непрофессиональных программистов, коими в большинстве своём являются исследователи в технических науках.

Использование OLE 2.0 (ActiveX) имеет перспективу на много лет, так как её разработчик Microsoft объявила эту версию базовой, а все дальнейшие шаги будут просто добавлением новых функциональных средств [319]. Таким образом, прикладные программы исследователей не теряют своей работоспособности в будущем, а их возможности можно будет наращивать эволюционно.

Таблицы Microsoft Excel для Windows имеют массовое распространение. Начиная с версии 5.0 выпуска 1993 года, в них встроен язык программирования Visual Basic for Application [175], сокращённо VBA. Этот язык позволяет автоматизировать моделирование фильтрации с помощью OLE 2.0, вернее, её части — OLE Automation. В версии Excel 97 технология OLE Automation переименована в технологию ActiveX [291], но концепции программирования изменились несущественно, например, появилась возможность работать с длинными именами файлов в 32-битных Microsoft Windows 95, Windows 98 и более поздних версиях.

Рассмотрим основы применения OLE-технологии (ActiveX) с МКР-моделями. Моделирование осуществляется в три этапа:

- 1) визуальный монтаж модели в среде MS Excel 97 (или более поздней) с использованием сборочных формул (формул моделирования);
- 2) итерационный расчётный процесс;
- 3) подключение дополнительных программных средств с помощью технологии OLE Automation (ActiveX) и построение карт потенциальных полей уровней, напоров подземных вод, влажности и т.д.

На всех этапах моделирования могут быть использованы управляющие программы VBA, чтобы автоматизировать утомительные рутинные процессы ввода исходной информации, генерирования модели, оптимизации её расчёта

и выдачи результатов. Одним из мощных средств автоматизации является применение OLE-технологии (ActiveX). Суть ее состоит в том, что из одной программы в среде Windows можно не только запустить другую, но и управлять ее действиями по запросам из вызывающей программы. Первую (вызывающую) программу называют клиентом, а вторую, которая работает по запросам первой, — сервером. Однако это не простой динамический обмен информацией, иначе такой процесс назывался бы DDE-технологией, которая сейчас отошла в прошлое как устаревшая и исчерпавшая себя [135].

Технология OLE Automation (ActiveX) есть управление из одной программы другой программой в качестве объекта. Глубинные процессы OLE (ActiveX) поясним следующим примером. Когда пишут код на языке VBA Excel (клиент), то в строки этого кода включают команды макроязыка сервера, например диалекта Бейсика GS Script программы Surfer для Windows фирмы Golden Software. Таким образом, архитектура прикладных программ всё больше и больше открывается для пользователя: когда из Excel запускается макрос VBA, он захватывает управление в Surfer и производит автоматические действия в этом объекте.

Первый этап моделирования производят так. Модель фильтрации наиболее наглядно и доступно реализуется сеткой в конечных разностях. Среда MS Excel есть таблица с ячейками. Каждую ячейку представляем как узел сетки. Шаг принимаем постоянный  $DL$  по всем осям координат. Каждый узел сетки связываем с соседним узлом по закону фильтрации Дарси или задаем граничные условия I, II, III или IV рода [49]. Сборка модели в Excel 97 весьма удобна при использовании обеих кнопок манипулятора-мыши с интуитивным интерфейсом ввода. Например, в модели размером  $100 \times 100$  узлов можно в одном узле записать формулу взаимосвязи с соседними ячейками, а затем протаскиванием мыши по модели быстро заполнить все другие ячейки соответствующими формулами, причем программа сама корректирует ссылки. Коэффициенты фильтрации, водоотдачи, инфильтрации и другие лучше задавать в виде отдельной таблицы исходных данных, присваивая каждому параметру свое имя. В ячейку вводится формула в символьном виде, где каждый символ или слово — это имя переменной или константы. Excel автоматически связывает исходные данные через имена с ячейками модели, в формулах которых эти имена набраны. После сборки модели изменением именных исходных значений можно быстро просчитывать различные варианты поведения изучаемого объекта.

При сборке модели надо максимально использовать визуальные средства Windows-программ. Например, перед вводом данных в узлы сетки вначале можно прорисовать границы области фильтрации, применяя разные цвета линий для разного рода границ. Это производят мышью с помощью панели инструментов «Рисование» Excel, рисуя прямо по листу-worksheet. Части

модели области фильтрации с разными параметрами можно раскрасить по-разному. После такой подготовки существенно облегчаются ориентировка на модели и ввод информации.

После сборки модели в Excel задается количество итераций и точность расчёта через меню (русская версия Excel 97):

Сервис / Параметры... / Вычисления / Итерации.

Циклический счёт модели запускается в Excel функциональной клавишей F9. Средняя модель размером около 20000 узлов рассчитывается на компьютере Intel Pentium MMX 200MHz 32 Mb RAM примерно за одну минуту. Предшествующая же сборка модели занимает обычно от минуты до часа. Результатом расчёта являются численные значения напоров в ячейках сетки — это итог второго этапа моделирования.

Третьим этапом моделирования является построение карт потенциальных полей уровней и напоров подземных вод. Технология построения таких карт изолиний зависит от имеющейся у исследователя фирменной программы. Автор рассмотрел много таких программ и остановился на довольно распространенном пакете Surfer 6.04 для Windows ©1996 фирмы Golden Software. Эта программа занимает на жестком диске (винчестере) чуть больше 7 Мбайт, то есть довольно небольшая. Может работать как в 16-битном, так и в 32-битном режиме с длинными именами файлов. Surfer обладает широким набором опций и, что весьма важно, встроенным языком макропрограммирования GS Script. Этот язык подобен VBA и, самое главное, написан по стандартам Microsoft OLE Automation (ActiveX). Таким образом, программа Surfer может работать по запросам программы Excel посредством OLE-связи между VBA Excel и GS Script. Результатом является профессионально построенная карта изолиний.

### Пример 55. VBA-программа с OLE Automation (ActiveX)

Вот пример небольшой макропрограммы на VBA с использованием OLE Automation (ActiveX):

```
Sub SurferMapContours()  
    Dim objSurfer As Object  
    Set objSurfer = CreateObject("Surfer.App")  
    objSurfer.GridData("File.txt")  
    objSurfer.MapContour("File.grd")  
End Sub
```

Таким образом, VBA Excel объявляет Surfer своим объектом и после этого получает возможность использовать такие команды макроязыка GS Script, как GridData и MapContour как свои собственные для управления работой Surfer по построению карты изолиний напоров в водоносном пласте. Это и есть суть применения технологии OLE Automation (ActiveX) применительно к целям моделирования фильтрации. Этот пример лишь иллюстративный. Профессиональная авторская VBA-программа ForSurfer() приведена в прил. 2.



Авторская VBA-программа ForSurfer() позволяет надежно строить карты изолиний, используя МКР-Excel-модели и запуская Surfer. Текст ForSurfer() см. в прил. 2. VBA-код программы следует набрать в «личной книге макросов», то есть через Excel 97 в специальном файле

Personal.xls.

Подготовленный файл Personal.xls нужно переместить в папку (в Windows 98):

C:\Program Files\Microsoft Office\Office\XLStart.

При моделировании необходимо файлы-модели Excel \*.xls сохранять в папке:

C:\Мои документы.

Такое требование сохранять файл модели в папке C:\Мои документы связано с обеспечением корректной работы прикладной макропрограммы ForSurfer(). Это требование не является обременительным для пользователей методики МКР-Excel, так как вообще большинство профессиональных Windows-программ автоматически используют для сохранения файлов эту папку. Это предусмотрено по умолчанию разработчиком Windows 95/98 фирмой Microsoft. Например, такие известные пакеты, как Excel 97/2000, Word 97/2000, AutoCAD 14/2000, MathCAD 2000, MatLab 5/6 используют эту папку для сохранения своих файлов. При выполнении перечисленных условий построение карт изолиний с помощью ForSurfer() из Excel в пакете Surfer происходит безупречно. Практика занятий автора со студентами по компьютерному моделированию показала, что моделирование методом МКР-Excel с построением карт изолиний через Surfer легко воспринимается с первого же занятия. Перед построением карты изолиний надо выделить прямоугольный массив модели с координатными осями в Excel и не забыть сохранить файл в вышеназванной папке. Затем запустить VBA-макропрограмму ForSurfer() с помощью меню Excel:

Сервис / Макрос / Макросы... / PERSONAL.XLS!ForSurfer / Выполнить.

В процессе работы макроса ForSurfer() каждой ячейке- узлу выделенной прямоугольной матрицы Excel, содержащей численное значение напора  $H$  или другого расчетного показателя, будут присвоены соответствующие двумерные координаты  $x$  и  $y$ . Для каждого узла конечно-разностной сетки макрос автоматически запишет в виде вертикальной таблицы из трех колонок-столбцов, начиная с 501-й строки таблицы Excel, три числовых значения:  $x$ ,  $y$  и  $H$ . Затем, когда вертикальная таблица будет заполнена, макрос запишет ее на жесткий диск как текстовый файл с именем файла модели, файл модели закрывается, запускается программа Surfer, которая строит карту изолиний напоров. Вся эта кропотливая работа выполняется автоматически.

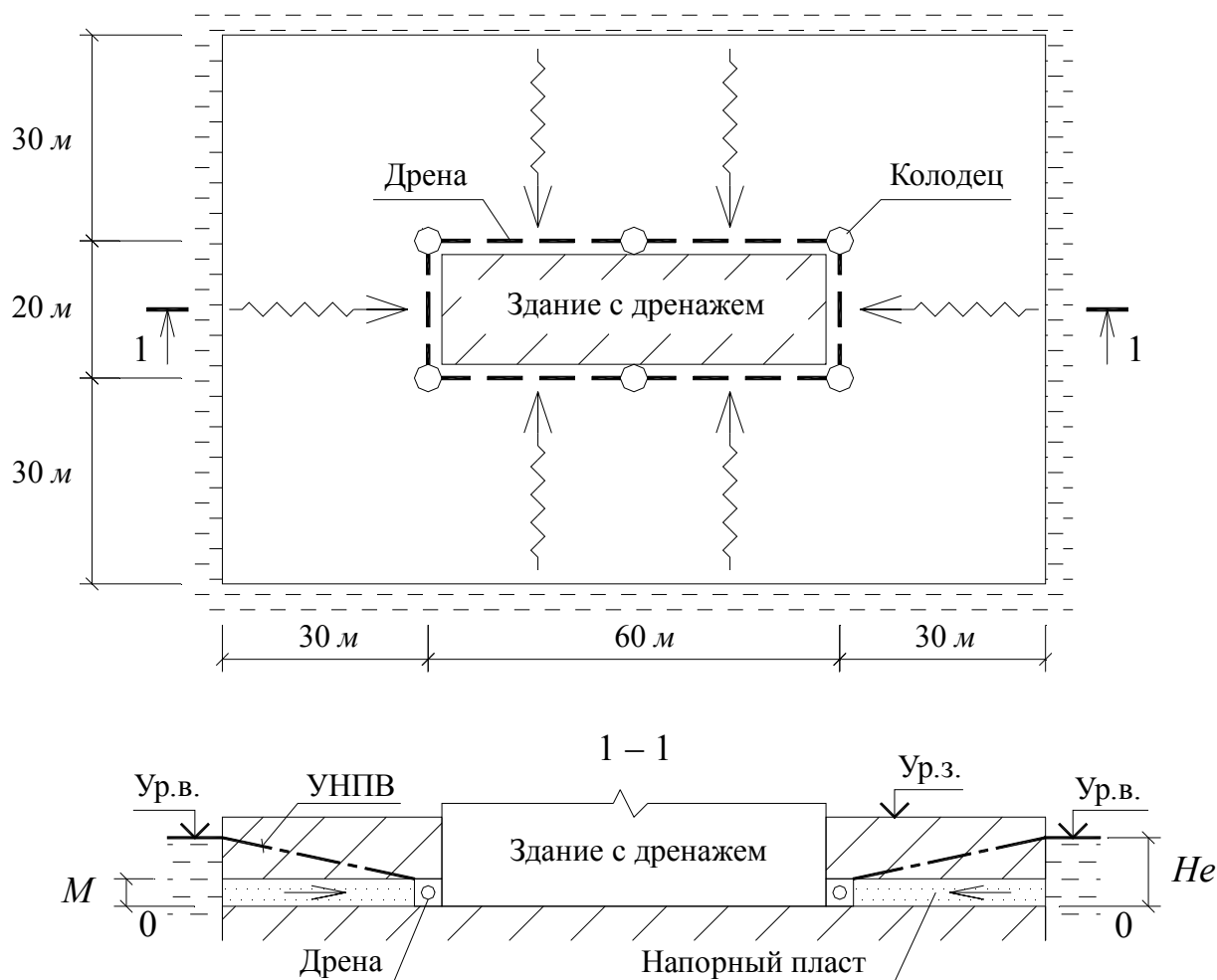


Рис. 122. Пристенный дренаж в напорном пласте

### Пример 56. Моделирование пристенного дренажа в напорном пласте

Рассмотрим простой пример моделирования поля напоров для плановой задачи двухмерной стационарной фильтрации напорных подземных вод в пристенный дренаж. Схематизированные план здания с дренажем, окружающей территорией и разрез показаны на рис. 122.

На расстоянии 30 м от дренажа здания находится траншея, наполненная водой вследствие аварийной утечки. Траншея окружает здание. Дрены заложены в слое песка мощностью  $M = 0,8$  м. Коэффициент фильтрации песка  $k = 7,5$  м/сут. Горизонтальная плоскость отсчета напоров 0-0 принята по поверхности водоупорных глин, подстилающих песок (см. рис. 122). Напор в траншее (естественный напор)  $He = 4,2$  м, напор в дрене  $Hd = 0,8$  м. Снаружи подвальной стены здания устроена гидроизоляция, соприкасающаяся с обсыпкой дрены, для гарантированной защиты здания от проскока подземных вод через дрину. Покровный суглинок над песком тоже принят за водоупор. Он служит кровлей техногенному напорному горизонту, приуроченному к пескам. Требуется найти моделированием в МКР-Excel:

- 1) поле напоров техногенных подземных вод;

- 2) водоприток в дренаж (общий водоприток и на 1 погонный метр дрены);
- 3) сравнить с напорами и расходами по аналитическим формулам.

В данном примере покажем основные идеи и приемы моделирования МКР-Excel (за исключением нестационарных задач, которые рассмотрим в примере 58). Сразу сделаем оговорку, что область фильтрации, показанная на рис. 122, имеет две оси симметрии: горизонтальную и вертикальную. Поэтому при моделировании рациональнее было бы построить лишь один квадрант данной области, что в четыре раза уменьшило бы число узлов модели. Так и будем поступать в дальнейшем. Однако в данном примере для наглядности промоделируем всю область фильтрации, то есть все здание с дренажом и окружающую его траншеей.

Запустим из-под Windows 98 электронные таблицы Microsoft Excel 97/2000. Создадим новый файл с помощью меню **ФАЙЛ / СОЗДАТЬ...** Для создания нового файла можно также использовать пиктографическую кнопку «Создать» или комбинацию клавиш **CTRL+N**. Подробно возможности Excel 97/2000 можно изучить по какому-либо руководству пользователя.

Запишем в ячейке **A1** заголовок файла «Пристенный дренаж в напорном пласте». В дальнейшем ячейку **A1** рекомендуется использовать для заголовка файла. Шрифт заголовка лучше увеличивать, делать жирным и раскрашивать, например, синим цветом. Запишем файл на жесткий диск в директорию «C:\Мои документы» под некоторым именем, например ПристДр-жНапПласт.xls. Через меню Excel 97

#### Сервис / Параметры... / Вычисления

отметим щелчком мыши радиокнопку «Вычисления вручную» и уберем флажок с параметра «Пересчет перед сохранением».

Строки 2, 3 и 4 отведем под таблицу исходных данных с именами. Напечатаем в ячейке **A2** «Исходные данные:». Ниже, в строках 3 и 4 создадим таблицу (рис. 123).

Числовым значениям таблицы присвоим имена следующим образом. Поместим курсор в ячейку **A4**, где находится числовое значение мощности напорного пласта  $M$ . В верхней части экрана Excel 97 находится

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>2</b>	Исходные данные:			
<b>3</b>	M, м	$k$ , м/сут	He, м	Hd, м
<b>4</b>	0.8	7.5	4.2	0.8

Рис. 123. Таблица исходных данных с именами

строка формул, а слева от нее — выпадающий список «Имя». Щелкнем мышью по имени **A4** в этом списке и оно выделится синим цветом. Напечатаем латинскую букву  $M$  и нажмем клавишу **ENTER**. В результате мы заменили стандартное имя **A4** на имя  $M$ . То же сделаем с ячейками **B4**, **C4**, **D4**, присвоив им имена соответственно  $k$ , He, Hd. В дальнейшем мы увидим, как удобно работать с именами. Если была допущена ошибка при вводе имени, то ее можно исправить через меню Excel 97:

#### Вставка / Имя / Присвоить...

Обратим внимание, что в качестве разделителя целой и дробной частей в числах исходных данных таблицы (см. рис. 123) проставлена не запятая, как обычно в русских версиях Excel, а точка, в соответствии с английским стандартом чисел с дробной частью. Договоримся впредь применять именно английский стандарт разделителя-точки. Это понадобится для английской версии программы Surfer 6.04, строящей карты изолиний.

а)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Пристенный дренаж в напорном пласте													
2	Исходные данные:													
3	M, м	k, м/сут	He	Hd										
4	0.8	7.5	4.2	0.8										
5														
6	80	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
7	70	4.2												4.2
8	60	4.2												4.2
9	50	4.2			0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8			4.2
10	40	4.2			0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8			4.2
11	30	4.2			0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8			4.2
12	20	4.2												4.2
13	10	4.2												4.2
14	0	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
15		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120

б)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Пристенный дренаж в напорном пласте													
2	Исходные данные:													
3	M, м	k, м/сут	He	Hd										
4	0.8	7.5	4.2	0.8										
5														
6	80	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
7	70	4.2	3.895823	3.587188	3.308736	3.170006	3.113214	3.098319	3.113214	3.170006	3.308736	3.587188	3.895823	4.2
8	60	4.2	3.596104	2.944192	2.27775	2.058072	1.984533	1.966846	1.984533	2.058072	2.27775	2.944192	3.596104	4.2
9	50	4.2	3.344402	2.315725	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.315725	3.344402	4.2
10	40	4.2	3.265778	2.174307	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.174307	3.265778	4.2
11	30	4.2	3.344402	2.315725	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.315725	3.344402	4.2
12	20	4.2	3.596104	2.944192	2.27775	2.058072	1.984533	1.966846	1.984533	2.058072	2.27775	2.944192	3.596104	4.2
13	10	4.2	3.895823	3.587188	3.308736	3.170006	3.113214	3.098319	3.113214	3.170006	3.308736	3.587188	3.895823	4.2
14	0	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
15		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120

Рис. 124. МКР-Excel-модель пристенного дренажа в напорном пласте:

а — заготовка модели с сеткой; б — рассчитанная модель

Настройку разделителя целой и дробной частей чисел в Windows 98 можно произвести так:

- 1) сверните все работающие Windows-программы;
- 2) на рабочем столе Windows 98 дважды щелкните мышью значки в такой последовательности: МОЙ КОМПЬЮТЕР / ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ / ЯЗЫК И СТАНДАРТЫ;
- 3) далее одиночными щелчками мыши выберите ЧИСЛА / РАЗДЕЛИТЕЛЬ ЦЕЛОЙ И ДРОБНОЙ ЧАСТЕЙ ЧИСЛА;
- 4) наберите на клавиатуре точку и щелкните кнопку ОК, закройте ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ.

Создадим под таблицей исходных данных заготовку модели, то есть координатные оси в декартовой системе X-Y и сетку ячеек. По оси X участок имеет длину 120 м, а по оси Y — 80 м (см. рис. 122). Назначим шаг сетки. В рассматриваемом случае имеем двухмерную задачу, для которой проще всего принимать квадратную сетку с размером стороны  $DL$ . Квадратные сетки рекомендуют многие руководства по численному моделированию [20; 72; 138; 188; 226]. Это упрощает формулы моделирования и вычислительный процесс. Д.Ю. Панов [188] рекомендовал первую модель собирать с минимальным числом шагов сетки — не менее двух шагов  $DL$ , то есть не менее трех узлов-ячеек по каждой стороне моделируемой области. Эта рекомендация совершенно правильная. Она была проверена нами [259] при моделировании верховодки на слабопроницаемой линзе. После реализации грубой модели можно измельчить сетку и получить более точное решение. Таким образом, принимаем шаг квадратной сетки  $DL = 10$  м, так как ширина дома с дренажом 20 м. Подчеркнем, что каждая ячейка Excel показывает ТОЧКУ в центре блока МКР-сетки. В данном примере блок сетки квадратный в плане с размером стороны  $DL = 10$  м.

Создадим оси координат X-Y. В ячейке A6 наберем без знака равенства 80 и нажмем клавишу ENTER. Ниже, в ячейку A7, также введем 70. Выделим мышью обе ячейки, подведем курсор мыши справа снизу выделенной области из двух ячеек A6-A7, пока на экране не появится черный крестик  $\mathbf{+}$ . Это курсор копирования. Нажмем с удерживанием левую кнопку мыши (ЛКМ) и осторожно потянем черный крестик вниз. При этом рядом с крестиком справа появится маленький прямоугольный счетчик координат. Будем тянуть курсор-крестик вниз до тех пор, пока счетчик не покажет нулевую координату, и отпустим ЛКМ. В результате получим ось Y с разбиением координат по узлам сетки (от ячейки A6 до A14). Поместим курсор в ячейку B15 и так же, но по горизонтали, скомпонуем ось X с разбиением координат от 0 до 120 с шагом 20 м (от ячейки B15 до N15). Обратим внимание, что ячейка B14 соответствует точке с нулевыми координатами  $X = 0$  и  $Y = 0$ .

Теперь выделим мышью по диагонали диапазон ячеек сетки B6:N14. Инструментом «Границы» панели «Форматирование» разлинуем сетку, то есть каждая ячейка станет видна в прямоугольнике. Отключим общую сетку Excel 97 через меню:

Сервис / Параметры ... / Вид / Параметры окна / Сетка (снимем «птичку»).

Теперь заготовка модели с сеткой и координатными осями готова (рис. 124).

Нанесем контур дома с дренажом и проставим граничные условия (ГУ). Левый нижний угол контура дренажа в плане (см. рис. 122) имеет координаты  $X = 30$  м,  $Y = 30$  м. Поместим курсор мыши в точку с этими координатами, то есть в ячейку E11. Наберем на клавиатуре

=Hd

и нажмем клавишу ENTER. В результате в ячейке E11 появится число 0,8, то есть с помощью имени Hd мы ввели напор в дрене 0,8 м, причем формат числа английский (с точкой). Подведем курсор мыши снизу справа к данной ячейке E11, чтобы появился черный крестик + (курсор копирования). Нажмем ЛКМ и скопируем содержимое ячейки E11 до ячейки K11 включительно. Не убирая выделенный диапазон ячеек E11:K11, с помощью курсора + скопируем весь диапазон вверх до строки 9. Мы получили прямоугольную область ячеек E9:K11, заполненную числовыми значениями напора в дрене: Hd = 0,8 м. Заметим, что внутри подвала здания для простоты мы считаем напор равным напору в дрене 0,8 м, хотя на самом деле никакого напора в подвале не будет, если дренаж и гидроизоляция работают нормально. Такое упрощение напора будет удобно для дальнейшего построения поля напоров с помощью программы Surfer, это условное упрощение. По контуру области фильтрации, где проходит траншея с водой, введем напор He = 4,2 м также с помощью имени He в английском формате с разделителем-точкой (4.2). В результате получим контуры граничных условий 1-го рода (ГУ I), то есть границы области фильтрации со значениями функции напора He (внешняя граница) и Hd (внутренняя граница). Между границами находится область фильтрации, то есть напорный пласт, по которому вода из траншеи фильтруется в пристенный дренаж здания.

Ячейки области фильтрации между траншеей и дренажем пока пустые (см. рис. 124). В них надо ввести формулу моделирования. Покажем вывод формулы моделирования. Пласт напорный, однородный и изотропный со стационарной фильтрацией. Такой случай хорошо изучен математически [188], но все же рассмотрим его подробно с физическим смыслом, как гидрогеологи.

Математик А.А. Самарский [226] ввел понятие интегро-интерполяционного принципа (принципа баланса) при построении конечно-разностных формул моделирования для схем-шаблонов. Гидрогеологи Е.А. Ломакин, В.А. Мироненко и В.М. Шестаков [126, с. 18] указали, что принцип баланса «... позволяет строить полностью консервативные схемы, аналогичные получаемым в рамках МКЭ» (метода конечных элементов). Консервативность схемы МКР означает, что на ней выполняется разностный аналог физического закона сохранения [226].

Уравнение баланса фильтрующейся воды для схемы-шаблона составим с использованием закона Дарси и связи расхода, скорости фильтрации и площади живого (поперечного) сечения потока. Возьмем, например, ячейку D12 (см. рис. 124). Ее окружают с четырех сторон ячейки C12, D11, E12, D13. Таким образом, имеем схему-шаблон, показанную на рис. 125 в двух вариантах.

Действительное направление фильтрации воды показано на рис. 125 зигзагообразной стрелкой. Однако в сеточном представлении считаем, что вода движется по линиям, соединяющим узлы-ячейки, как по трубам (см. рис. 125, а). Согласно закону сохранения массы, сумма входящих расходов в узел 0 (ячейку D12 с напором  $H_0$ ) равна сумме выходящих:

$$Q_{1-0} + Q_{4-0} = Q_{0-2} + Q_{0-3}.$$

Раскрывая значения каждого расхода через скорость фильтрации по закону Дарси, умноженную на площадь живого сечения потока, получим уравнение баланса воды в виде

$$k \cdot \frac{H_1 - H_0}{DL} \cdot DL \cdot M + k \cdot \frac{H_4 - H_0}{DL} \cdot DL \cdot M = k \cdot \frac{H_0 - H_2}{DL} \cdot DL \cdot M + k \cdot \frac{H_0 - H_3}{DL} \cdot DL \cdot M,$$

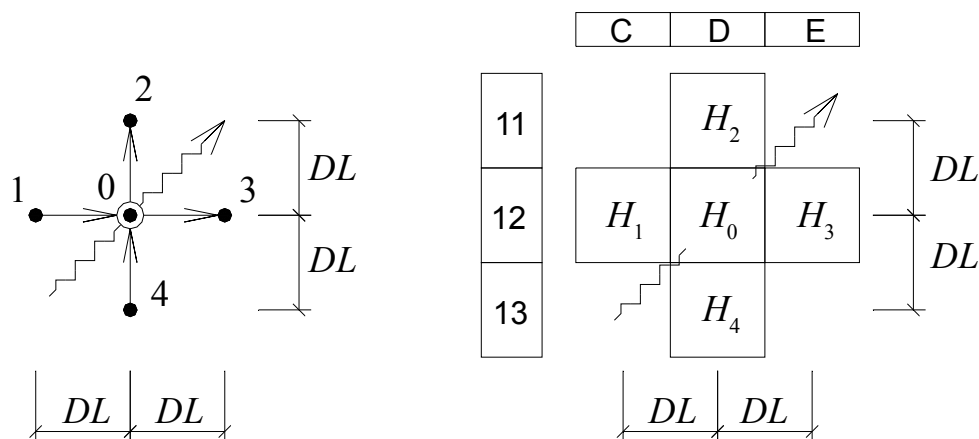


Рис. 125. Схемы-шаблоны двумерной напорной фильтрации в однородном изотропном пласте: а — традиционная схема [188]; б — схема-шаблон в МКР-Excel

откуда выразим напор в центральной ячейке D12 (см. рис. 125, б), то есть получим известную формулу моделирования (сборочную формулу) [188]:

$$H_0 = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) / 4. \quad (322)$$

Формулу (322) в Excel для ячейки D12 следует набрать так:

$$= (C12 + D11 + E12 + D13) / 4$$

причем многие адреса ячеек можно не набирать на клавиатуре, а вводить щелчками мыши по соответствующим ячейкам, окружающим центральную ячейку D12. После нажатия клавиши ENTER в ячейке D12 появится число 0. Так оно и должно быть, так как в соседних четырех ячейках C12, D11, E12, D13 пока тоже нули. Скопируем мышью с помощью курсора-крестика + содержимое ячейки D12 во все пустые ячейки области фильтрации. Эти ячейки заполнятся нулями. Первый этап — визуальный монтаж модели в среде MS Excel 97 с использованием сборочных формул (формул моделирования) — закончен. Заметим, что для наглядности в Excel 97 ячейки с разными граничными условиями и разными коэффициентами лучше раскрашивать в разные цвета, не очень темные. Тогда ориентироваться на больших моделях значительно легче и меньше происходит случайных ошибок.

На втором этапе рассчитаем модель. Назначим максимальное количество итераций 32767 через меню Excel 97:

Сервис / Параметры... / Вычисления / Итерации.

Относительную погрешность результата назначим 0.0000000001 через то же меню. Эту высокую точность расчета будем назначать впредь с целью получения достоверных результатов моделирования. Уведем модель с экрана с помощью клавиши PageDown, чтобы были видны лишь пустые ячейки Excel. Запустим расчет модели (циклические итерации) клавишей F9. Например, на компьютере Pentium MMX с тактовой частотой 200 МГц и оперативной памятью 64 Мбайта время расчета не превышает одной секунды. При этом общее число узлов-ячеек модели  $13 \times 9 = 117$ . Результаты моделирования показаны на рис. 124,б.

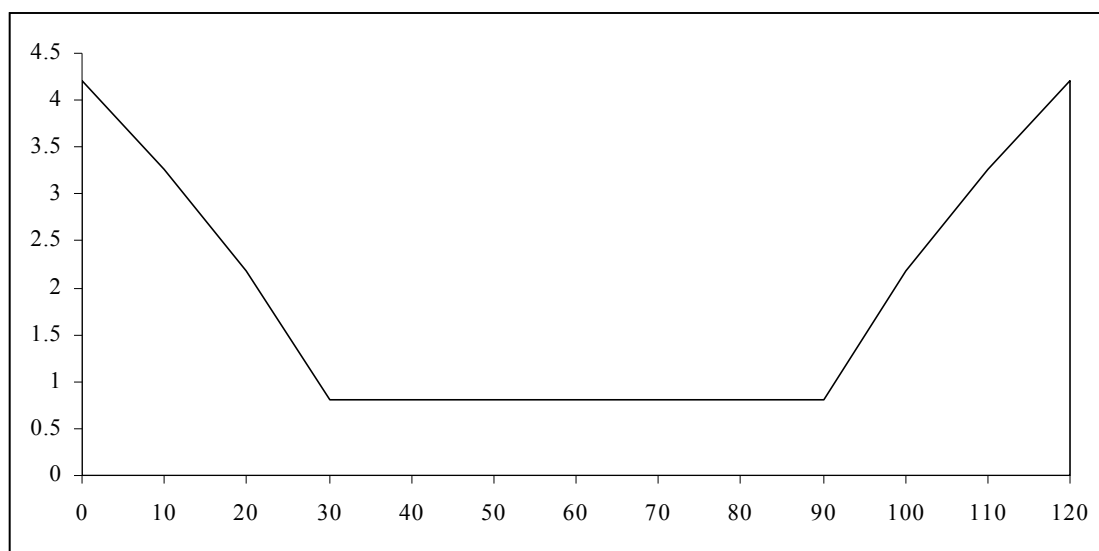


Рис. 126. График кривой депрессии УНПВ

На третьем этапе моделирования получим кривую депрессии УНПВ, карту напоров и водоприток в дренаж (общий и на 1 погонный метр).

Кривая депрессии легко строится средствами Excel 97. Например, построим кривую депрессии по разрезу 1-1 (см. рис. 122). Выделим мышью ячейки с B10 по N10. Щелкнем пиктографическую кнопку «Добавить диаграмму» или выберем меню Excel 97:

Вставка / Диаграмма ...

Выберем стандартную диаграмму «С областями», первый тип. В результате получим график кривой депрессии УНПВ при работе пристенного дренажа в напорном пласте (рис. 126).

Карту напоров в пласте при работе дренажа можно построить непосредственно в Excel 97 с помощью диаграммы «Поверхность». Вид ее упрощенный, так как изолинии не гладкие и не имеют значений напоров (рис. 127). Однако в некоторых случаях диаграмма «Поверхность» может быть весьма удобна для быстрого просчета вариантов водопонижения, например при размещении скважин. Для этого диаграмму надо отредактировать в Excel 97 с прозрачным фоном и наложить на сетку МКР-Excel модели. Размер ячеек подобрать так, чтобы их грани совпали с клетками диаграммы. Затем можно на модели вводить новые варианты граничных условий, нажимать клавишу пересчета F9 и тут же прослеживать по диаграмме эффективность данного варианта водопонижения.

Однако лучше всего для моделей МКР-Excel строить карты изолиний с помощью программы Surfer 6.04 ©1996 фирмы Golden Software при автоматизации нашей макропрограммой ForSurfer(), написанной на языке Visual Basic for Application (VBA). Текст программы ForSurfer() приведен в прил. 2.

Выделим мышью рассчитанную модель (см. рис. 124) по диагонали от ячейки A6 до ячейки N16, то есть вместе с координатными осями X-Y. Сохраним файл модели в папке

C:\ Мои документы.

Запустим наш VBA-макрос ForSurfer() через меню Excel 97:

Сервис / Макрос / Макросы... / PERSONAL.XLS!ForSurfer / Выполнить.



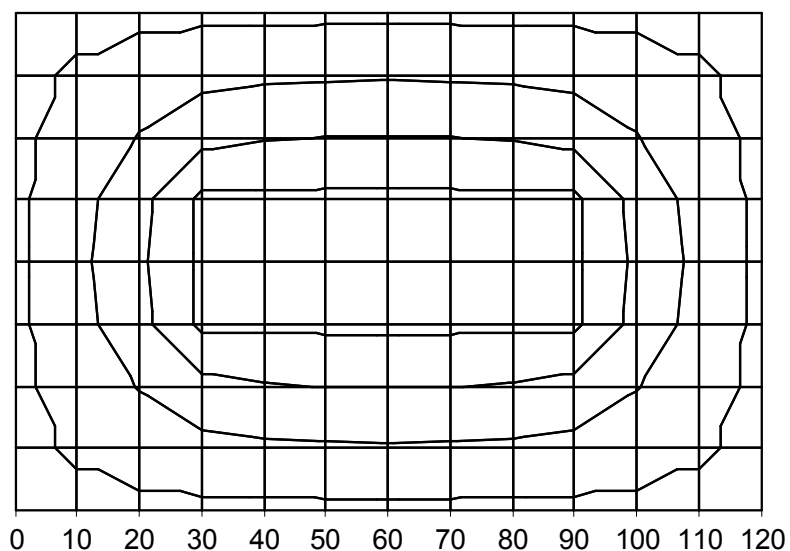


Рис. 127. Карта напоров при работе дренажа, построенная в Excel 97 с помощью диаграммы «Поверхность»

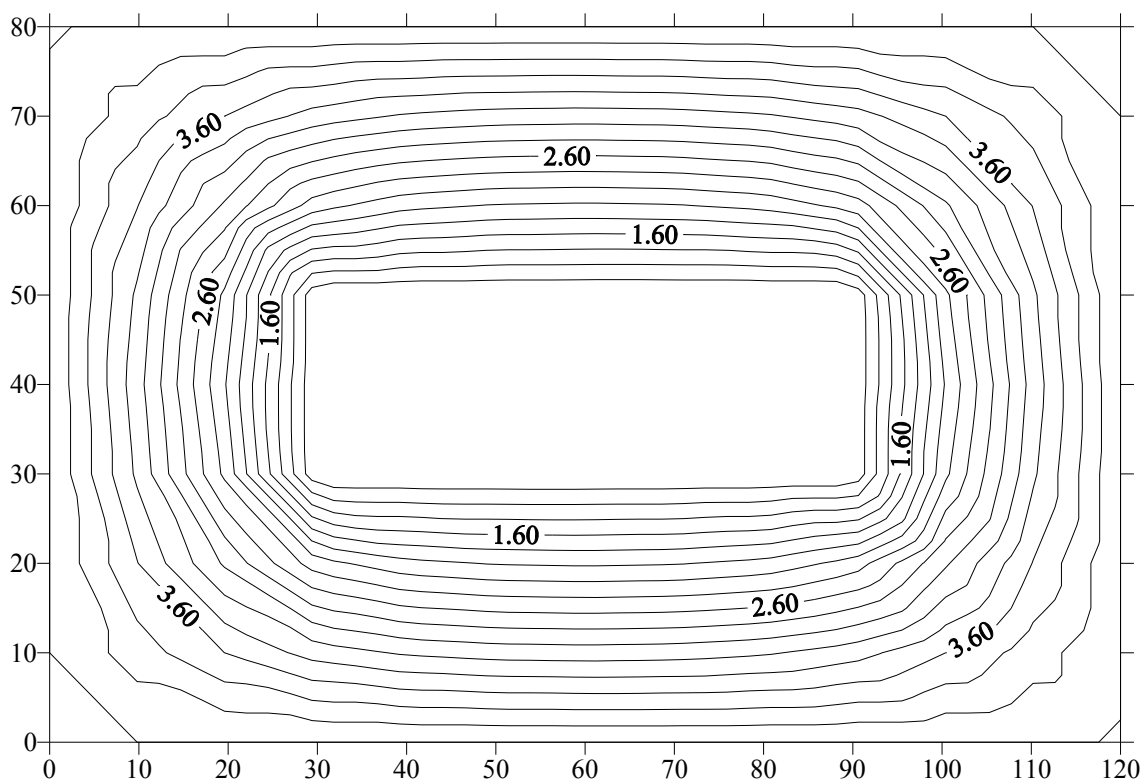


Рис. 128. Карта напоров при работе дренажа, построенная в Surfer 6.04

Примерно через 14 секунд на компьютере Pentium MMX с тактовой частотой 200 МГц и оперативной памятью 64 Мбайта построена карта изолиний напоров (рис. 128). Многочисленные параметры карты можно редактировать средствами пакета Surfer: сгущать или прореживать изолинии, расставлять их числовые значения, стирать местами изолинии, чтобы поместить другое изображение и т.д. Например, на рис. 128 изолинии слишком сгущены, имеет смысл проредить их. Для этого в среде Surfer надо дважды щелкнуть

мышью по карте. Откроется диалоговое окно Contour Map, в котором надо выбрать кнопку Level... и в опции Interval набрать вместо имеющегося числа другое, например, вдвое большее. Тогда изолинии будут располагаться в два раза реже на карте. После набора числа надо нажать на кнопку ОК, и карта будет отредактирована должным образом.

В Surfer имеется 8 типов обработки данных при проведении и сглаживании изолиний (автор предпочитает пользоваться самым точным способом Triangulation w/Linear Interpolation) и даже есть опция учета анизотропии.

Определим водоприток в дренаж по данным моделирования. Общий расход в дренаж определим так. В сеточном представлении (см. рис. 125) вода движется по линиям, соединяющим как трубы соседние ячейки-узлы. Живое (поперечное) сечение каждой такой трубы есть произведение мощности пласта  $M$  на шаг сетки  $DL$ . Скорость фильтрации находим по закону Дарси. Произведение скорости фильтрации на живое сечение каждого узла дает расход через узел-ячейку. Сумма таких расходов есть водоприток. Покажем это на примере нашей модели.

Единичный водоприток к ячейке-узлу дрены:

$$Q_i = k \cdot M \cdot DL \cdot \frac{H_i - Hd}{DL} = kM (H_i - Hd), \quad (323)$$

где  $H_i$  — напор в пласте около дрены в ближайшей ячейке-узле.

Суммируя  $Q_i$ , получим общий водоприток в дренаж

$$Q = kMN \left( \frac{\sum H_i}{N} - Hd \right), \quad (324)$$

где  $N$  — число единичных водопритоков. В нашем случае  $N = 16 + 4 = 20$ , так как угловые ячейки E9, E11, K9, K11 имеют по два единичных водопритока. Формулу (324) вводим на листе Excel так (см. рис. 124,б):

$$=k*M*20*((\text{СУММ}(E8:K8;E12:K12;D9:D11;L9:L11))/20-Hd)$$

Здесь использована функция Excel СУММ().

В результате общий водоприток  $Q = 160,96 \text{ м}^3/\text{сут} = 1,863 \text{ л/с}$ .

Водоприток на 1 погонный метр дрены  $q$  находим делением  $Q$  на периметр дренажа:

$$q = Q / (2 \cdot 60 + 2 \cdot 20) = 1,006 \text{ м}^3/\text{сут} = 0,0116 \text{ л/с}.$$

Водоприток можно найти по формуле Дюпюи [208]:

$$Q = \frac{2\pi k M (He - Hd)}{\ln(R/r_0)}, \quad (325)$$

где  $R$  — приведенный радиус контура питания;  $r_0$  — приведенный радиус дренажа. Обе величины можно найти по методике Н.К. Гирина [3], по которой прямоугольный участок длиной  $A$  и шириной  $B$  приводят к эквивалентному кругу радиусом

$$r = \mu (A + B) / 4, \quad (326)$$

где  $\mu$  — коэффициент формы по табл. 18, составленной Н.К. Гириным [3].

В/А	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu$	1	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18

Находим приведенные радиусы по формуле (326):

$$R = 1,18(120 + 80)/4 = 59 \text{ м};$$

$$r_0 = 1,18(60 + 20)/4 = 22,93 \text{ м}.$$

Водоприток в дренаж определяем по формуле (325):

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7,5 \cdot 0,8(4,2 - 0,8)}{\ln(59/22,93)} = 135,64 \text{ м}^3/\text{сут},$$

что на 15,7 % меньше водопритока, полученного на модели. Дело в том, что методика Н.К. Гиринского приближенная, а модель позволяет находить более точные значения. В книге [3] А.Ж. Муфтахов указывал, что водоприток может быть определен с погрешностью до 15 %. В данном примере мы убедились с применением моделирования МКР-Excel, что это действительно так.

*Недокументированные возможности Excel.* В процессе моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel были обнаружены интересные недокументированные возможности (особенности, свойства) электронных таблиц Excel, которые позволяют существенно ускорить процесс моделирования. Это делает МКР-Excel-модели весьма эффективными, не уступающими по технологии сборки, скорости расчета и визуальным возможностям специализированным коммерческим пакетам.

Недокументированные возможности Excel следующие:

- 1) быстрый расчет модели обеспечивается так. После окончательной сборки модели перед ее запуском надо пролистать экран вниз до совершенно пустых ячеек таблицы и после этого запустить счет модели клавишей F9. Итерации будут происходить весьма быстро (см. пример 56);
- 2) пересчет в листах-worksheets Excel при итерациях происходит в следующем порядке: слева направо, затем переход на нижележащую строку, опять слева направо и т.д. Этот порядок пересчета нужно учитывать в динамических моделях;
- 3) в версии Excel 97 и более поздних улучшена работа с оперативной памятью. Если в процессе моделирования в файле модели накапливается большое количество данных, то они почти не замедляют работу. Можно затереть ненужные промежуточные данные и продолжать моделировать. Эта особенность подробно пояснена при работе с макропрограммой ДопЛистСсыл();
- 4) максимально возможное число итераций, которое можно назначить в Excel через меню СЕРВИС/ПАРАМЕТРЫ/ВЫЧИСЛЕНИЯ, равно 32767;

- 5) быстрая нумерация координатных осей модели может быть сделана с помощью двух начальных цифр оси. Эти цифры должны быть набраны без предварительного введения знака равенства «=». Выделив две начальные цифры, копируют мышью с помощью курсора-крестика **+** в направлении оси. В процессе копирования появляется индикатор, указывающий текущее значение координаты оси, которое изменяется в том направлении, куда тянут мышь (см. пример 56);
- 6) имена на листе-worksheet Excel вводятся автоматически, если в первом столбце таблицы набирать обозначения параметров, которые предполагается использовать в качестве имен, а во втором столбце вводить численные значения параметров;
- 7) в моделях размером 100x100 узлов и более для ускорения расчета нужно предварительно разбить область модели на подобласти с помощью полос с фиксированными значениями напоров;
- 8) перед расчетом новой модели надо перезагрузить компьютер для максимального освобождения оперативной памяти;
- 9) с помощью обычных графиков-диаграмм Excel можно создать анимационные графики, если встроенные итерации применить в динамической МКР-Excel-модели, ячейки которой (МКР-узлы) связать с графиком-диаграммой.

*Особенности технологии моделирования МКР-Excel.* Окинем общим взглядом технологию моделирования фильтрации методом конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel) и попытаемся оценить ее качество с помощью метрик, применяемых в психологии программирования [318].

Моделирование с помощью МКР-Excel производится в оперативных системах Windows 95/98/Me/2000 и более поздних. Таблицы Microsoft Excel имеют массовое распространение. Они снабжены встроенным языком макропрограммирования Visual Basic for Application (VBA). Пакет Excel с помощью VBA можно настраивать на автоматическую совместную работу с другими программными продуктами, например, с картографическим пакетом Surfer. Это обеспечивается новой информационной технологией OLE Automation (ActiveX).

МКР-Excel наследует все основные полезные качества упомянутых программных систем [318]: доступность, завершенность, коммуникативность, модифицируемость, надежность, независимость от устройств, ориентированность на человека, полнота функций, понимаемость, расширяемость, согласованность, тестируемость, точность, удобство переноса, удобство поддержания, устойчивость. Специализированные коммерческие пакеты по моде-

лированию не полностью отвечают перечисленным критерием качества (метрикам), поэтому автор рекомендует к широкому использованию МКР-Excel.

Акцент при моделировании в нашей работе сделан на фильтрацию воды, так как это наиболее полно отвечает теме работы по защите от подтопления в городском строительстве. Формулы моделирования для других процессов (фильтрация воздуха, фильтрационная консолидация, влаготеплоперенос, электроосмос) приведены по мере необходимости при изучении конкретных методов борьбы с подтоплением.

Из предшествующих работ наиболее близкими по идейному содержанию к нашей являются справочник Д.Ю. Панова [188] и книги Г.Н. Каменского, И.К. Гавич, Н.А. Мясниковой и С.М. Семеновой [55; 91]. В них формулы моделирования приведены в такой же форме записи, как и у нас, то есть относительно последующего значения искомой величины (в явном виде). В нашей работе формулы выведены обобщенно, что позволяет переходить к частным случаям моделирования с единой методикой. Набор формул представлен достаточно полный для большинства практических задач по борьбе с подтоплением в городском строительстве.

В многочисленных публикациях подавляющее большинство авторов не применяют непосредственной формы записи формул моделирования при работе на больших ЭВМ и персональных компьютерах. Это можно объяснить тем, что в процессе программирования моделей они применяют матричную алгебру, где уравнения для моделирования удобнее записывать в форме разностей, в большинстве случаев неявно относительно искомых величин (неявные схемы).

В МКР-Excel произведен возврат к первоначальной точке зрения. Большинство формул моделирования записаны в явном виде относительно искомой величины. Это позволяет снять с пользователя разработанной методики обременительный груз дополнительного изучения математических правил матричных операций, чтобы сосредоточить усилия непосредственно на физике процессов и получении модельных результатов.

Явные схемы при нестационарном моделировании имеют преимущество перед неявными в задачах с двумя и более пространственными переменными [24, с. 199; 90, с. 391]. Это послужило дополнительным аргументом к преимущественному использованию явных схем. Неявные схемы тоже реализованы в МКР-Excel с помощью метода прогонки в одномерных задачах.

В последующих параграфах данной главы приводится сводка формул моделирования. Особое внимание уделено одно- и двумерным формулам в нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску, так как такие задачи почти не решаются аналитически (за редкими исключениями, что рассмотрено в § 16 – 17). Подборка формул отвечает научным интересам автора и теме представленной работы.

## § 20. Выбор и построение МКР-сетки

В начале моделирования рекомендуется проделать аналитические расчеты по известным зависимостям. Это позволит получить первоначальное представление о поведении объекта защиты от подтопления. В ходе расчетов приходится схематизировать изучаемую область фильтрации. Принятая схема в дальнейшем может служить отправной точкой при выборе МКР-сетки.

Компьютерные модели, также как и расчеты, лучше разрабатывать в направлении от простых к сложным. Нет смысла браться с первого раза за трехмерную модель, утяжеленную различными особенностями. Лучше начать с одномерной, проследить поведение объекта и по мере необходимости усложнить. Точно так же не следует сразу мельчить сетку модели. Начинать моделировать надо с минимальным и достаточным числом узлов сетки.

Д.Ю. Панов [188, с. 42] рекомендует первую модель собирать с минимальным числом шагов сетки — не менее двух пространственных шагов, то есть не менее трех узлов-ячеек по каждой стороне моделируемой области. Эта рекомендация совершенно правильная. Она проверена нами [259] при моделировании верховодки на слабопроницаемой линзе. Этот прием приведен в примере 56. После реализации грубой модели можно измельчить сетку и получить более точное решение.

При моделировании с помощью МКР-Excel по горизонтальной (в плоскости таблицы) координатной оси максимальное число узлов с учетом ячейки с координатой лучше задавать не более 255, что связано с количеством ячеек Excel в строке, равным 256. Однако число 256 не является пределом для горизонтальной оси, так как матрицу модели можно продлить ниже в таблице Excel. По вертикали, начиная с таблиц версии Excel 97, максимальное число строк равно 65536. Таким образом, в Excel можно создавать малые, средние и даже большие МКР-модели. Возможности моделирования возрастают с увеличением производительности компьютера, что зависит от вида процессора, количества оперативной памяти, возможностей видеокарты, шины передачи данных, тактовой частоты и т.д.

Как показала практика нашего моделирования, для быстрых и эффективных исследований весьма удобны модели с числом шагов 10–50 по каждой координате. Это позволяет создавать модели, которые рассчитываются весьма быстро — за секунды, минуты.

Начинать моделировать рекомендуется с простейших одномерных задач, чтобы хорошо отработать технологию моделирования. При выборе такой модели в первую очередь следует определить, какой системе координат ближе всего соответствует процесс фильтрации. Основные системы координат, применяемые в теории фильтрации при защите от подтопления, — декартова (рис. 129, а) и цилиндрическая (рис. 129, б). Например, подавляющее боль-

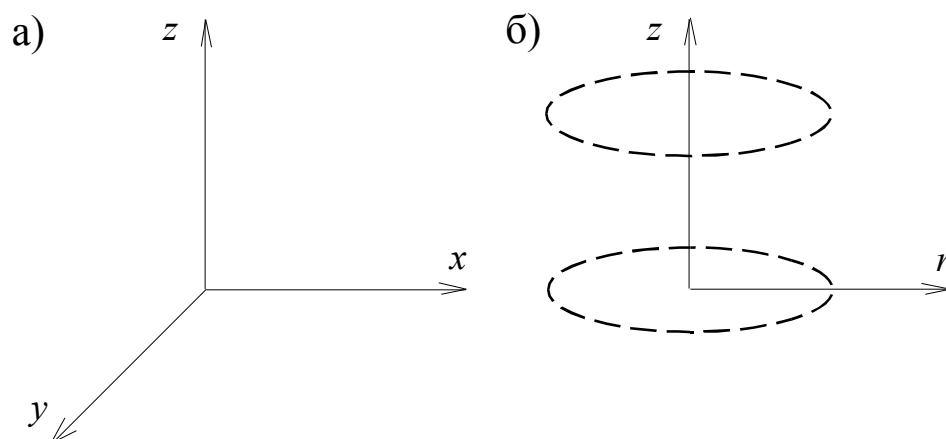


Рис. 129. Системы координат: а — декартова (трехмерная);  
б — цилиндрическая (двухмерная)

шинство аналитических зависимостей в справочном пособии к СНиП [208] решены именно в этих двух координатных системах. То же относится к гл. 3 данной книги.

Осью  $z$  в обеих системах координат обозначают вертикальную ось. Одномерные горизонтальные задачи в декартовой системе принято совмещать с осью  $x$ . В цилиндрической системе координатой  $r$  обозначают не точку, а цилиндрическую поверхность радиусом  $r$ .

Вытянутые в плане объекты, например траншеи или реки с прямым руслом, принимают фильтрующиеся в них воды преимущественно с двух сторон. Поэтому проводят поперечный разрез по линии течения, с которым совмещают горизонтальную ось  $x$  декартовой системы координат. Такие простейшие одномерные модели рассмотрены в примерах 54 и 58, где использована декартова система координат. Такой вид течения по горизонтали называют плоскопараллельной фильтрацией [152, с. 98].

Если фильтрация зависит от двух пространственных декартовых координат, то возможны два случая:

- 1) плановая фильтрация, когда течение подземных вод происходит преимущественно по горизонтали, оси координат тогда называют  $x$  и  $y$ ;
- 2) профильная (или плоская) фильтрация, при движении в вертикальной плоскости, оси координат соответственно обозначают как  $x$  и  $z$  (вертикальная);

Модели плановой фильтрации обычно связаны с достаточно крупными объектами (см. пример 56). Модели профильной фильтрации чаще всего применяют для изучения локальных случаев фильтрации, например для моделирования шпунтовых ограждений котлованов.

Цилиндрическую систему координат применяют для задач с осевой симметрией. Примеры использования цилиндрической системы координат приведены в гл. 3: верховодка на слабопроницаемой круглой в плане линзе; язык подтопления при радиальной в плане фильтрации; растекание круглого в плане купола грунтовых вод в основании здания или сооружения; подъем УГВ под влиянием круглого в плане очага техногенной инфильтрации воды в пределах здания; водоотлив из круглого в плане котлована. Упомянутые примеры связаны с одномерными цилиндрическими задачами (координата  $r$ ), которые по-другому называют радиальными [290].

Задачу называют осесимметричной [199; 290], или профильно-радиальной [130, с. 191], если фильтрация зависит от двух пространственных цилиндрических координат ( $r$  и  $z$ ). Подобные задачи возникают при изучении гидродинамически несовершенных скважин и котлованов, которые своим дном не доходят до водоупорной подошвы водоносного пласта (см. рис. 98).

Критерии, по которым можно в первом приближении определить, к какому одномерному виду относится течение подземных вод (плоскопараллельному или радиальному), приведены в § 13.

Приведем рекомендации по назначению пространственного шага сетки. Сетки с равномерным шагом рекомендуют многие руководства по численному моделированию [20; 72; 138; 188; 226]. Это упрощает формулы моделирования и вычислительный процесс. Равномерное разбиение модели равными шагами показано в примерах 54, 56 и 58.

На одномерных горизонтальных моделях мы обозначаем равномерный пространственный шаг в декартовых координатах  $DL$  или  $Dx$ , а в радиальных моделях —  $Dr$  (цилиндрическая координата).

Для двумерных моделей мы применяем следующие обозначения равномерного пространственного шага:

- 1) в декартовых координатах при квадратных МКР-сетках  $DL$ , при прямоугольных сетках плановых моделей  $Dx$  и  $Dy$  и профильных  $Dx$  и  $Dz$  (по вертикали);
- 2) в цилиндрических координатах профильно-радиальных моделей  $Dr$  и  $Dz$  (по вертикали).

На трехмерных моделях, которые собирают только в декартовых координатах, обозначаем равномерные пространственные шаги МКР-сетки  $Dx$ ,  $Dy$  и  $Dz$  (по вертикали).

Иногда требуется использовать переменный пространственный шаг. Эти случаи обычно возникают на плановых моделях [213], а также радиальных и профильно-радиальных [130; 290]. В книгах [79, с. 85; 130, с. 192] приведена формула Р. Столлмена [350] для определения последующей радиальной координаты МКР-узла  $r_{i+1}$  через предыдущую координату  $r_i$ , что можно записать в виде



$$r_{i+1} = r_i \cdot 10^{0,25}. \quad (327)$$

Более обоснованной является формула В.С. Усенко [290, с. 168] при разбиении неравномерной сетки в цилиндрических координатах для определения последующей радиальной координаты МКР-узла  $r_{i+1}$  через предыдущую координату  $r_{i+1}$ , которую можно записать так:

$$r_{i+1} = r_i \exp \left[ \frac{\ln(R/r_0)}{N_{\text{ш}}} \right], \quad (328)$$

где  $R$  — максимальный радиус круговой области фильтрации, например, радиус влияния скважины до контура питания;  $r_0$  — минимальный радиус круговой области фильтрации, например радиус скважины;  $N_{\text{ш}}$  — общее число неравномерных шагов, на которые надо разбить область фильтрации по радиальной координате  $r$ .

#### Пример 57. Неравномерный шаг сетки по В.С. Усенко

Допустим, требуется исследовать на профилно-радиальной модели с помощью МКР-Excel установившийся водопиток в гидродинамически несовершенную скважину в напорном пласте (рис. 130) и сравнить с имеющимися аналитическими решениями для таких скважин [140; 150].

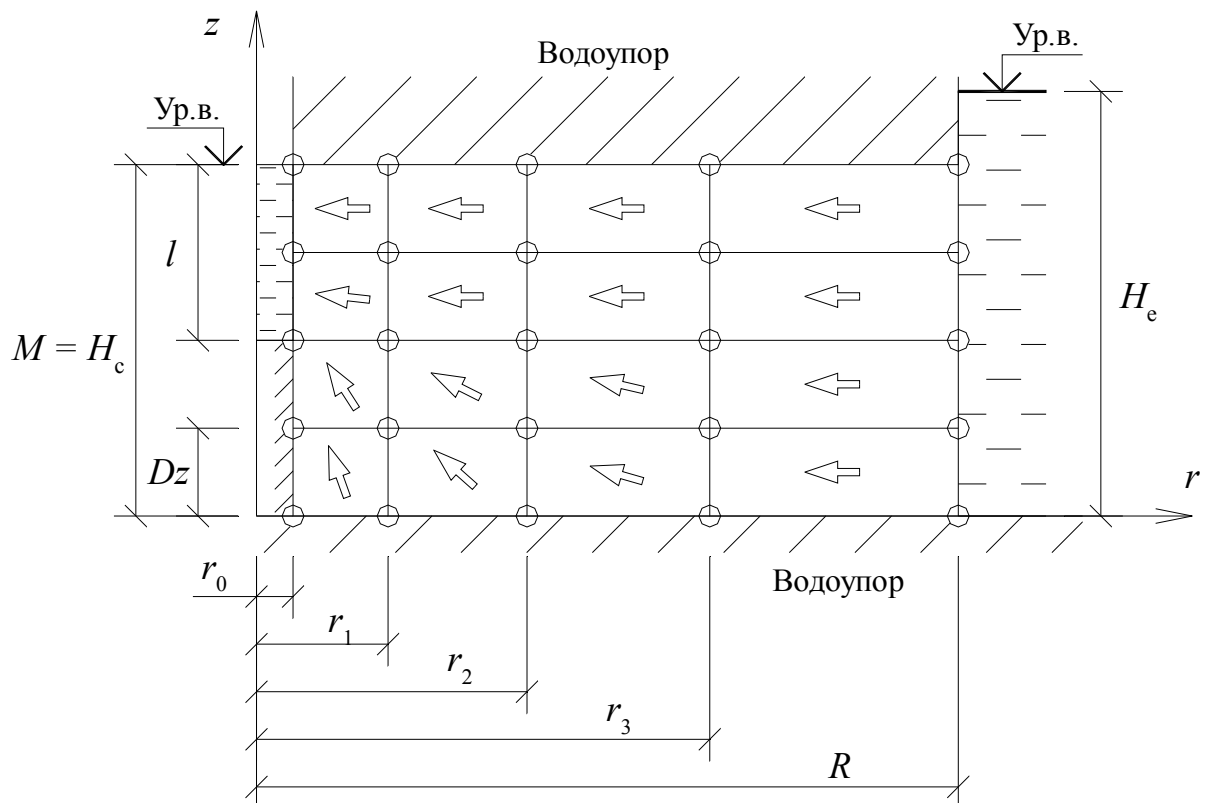


Рис. 130. Схема модели несовершенной напорной скважины

Мощность напорного пласта  $M$ . Скважина радиусом  $r_0 = 0,2$  м оборудована фильтром длиной  $l = M/2$ , который расположен в верхней части напорного пласта. В нижней части пласта размещена глухая труба-отстойник скважины. Естественный напор в пласте  $H_e$ , напор в скважине при работе насоса  $H_c$ . Скважина находится в центре круглого острова и окружена водой на расстоянии от оси  $R = 50$  м (радиус питания скважины).

Стрелками на рис. 130 показаны векторы скорости фильтрации вдоль линий тока. Заметно, что в нижней части пласта подземная вода вблизи скважины поднимается вдоль ее отстойника к фильтру почти вертикально, а в верхней части пласта движение воды практически горизонтальное. Такое искривление линий тока вызывает дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенной скважины, поэтому такие скважины при одинаковой разности напоров  $\Delta H = H_e - H_c$  дают дебит (водоприток) несколько меньший, чем совершенные скважины, оборудованные фильтром на всю мощность водоносного пласта.

Так как движение подземных вод направлено по радиусам к скважине, то систему координат принимаем цилиндрическую. Вследствие наличия горизонтальных и вертикальных составляющих скоростей фильтрации течение подземных вод является профилно-радиальным, то есть зависит от двух координат:  $r$  и  $z$ . Таким образом, для данной задачи требуется двухмерная модель в цилиндрических координатах.

Узлы МКР-сетки обозначим кружками (см. рис. 130). Они в Excel соответствуют ячейкам таблицы. По вертикали толщину пласта разобьем на четыре равномерных шага  $Dz = 5$  м. По горизонтали применим неравномерный шаг, и радиальные координаты узлов найдем по формуле (328). Вначале положим, что между  $r_0$  и  $R$  будет четыре шага, то есть  $N_{ш} = 4$ . Затем найдем координаты

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,2 \cdot \exp \left[ \frac{\ln(50/0,2)}{4} \right] = 0,79527 \text{ м}; \\ r_2 &= 0,79527 \cdot \exp \left[ \frac{\ln(50/0,2)}{4} \right] = 3,1627 \text{ м}; \\ r_3 &= 3,1627 \cdot \exp \left[ \frac{\ln(50/0,2)}{4} \right] = 12,574 \text{ м}; \\ R &= 12,574 \cdot \exp \left[ \frac{\ln(50/0,2)}{4} \right] = 50 \text{ м}. \end{aligned}$$

Последний радиус  $R = 50$  м был вычислен для проверки. Таким образом, мы разбили, по В.С. Усенко, радиальные узлы МКР-сетки. Минимальный шаг

$$Dr_{\min} = r_1 - r_0 = 0,79527 - 0,2 = 0,59527 \text{ м}.$$

В Excel такую разбивку можно автоматизировать. Покажем, как это сделать. МКР-модель состоит из  $5 \cdot 5 = 25$  узлов (см. рис. 130). В Excel это квадратная таблица, например от ячейки B1 по диагонали до ячейки F5 (рис. 131). Внизу и слева этой таблицы надо предусмотреть оси цилиндрической системы координат соответственно  $r$  и  $z$ .

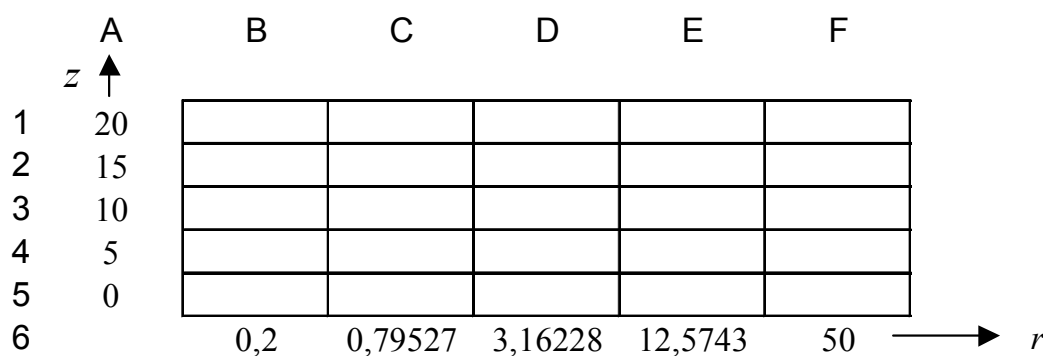


Рис. 131. Шаблон профильно-радиальной модели МКР-Excel

Автоматизация разбивки координатной оси с равномерным шагом в Excel показана в примере 56. Так можно разбить вертикальную ось  $z$ , показанную на рис. 131.

Ось  $r$  разобьем, используя формулу (328). Вначале в ячейку B6, имеющую координату  $r_0 = 0,2$  м, введем число 0,2 и нажмем клавишу ENTER. Затем в ячейке C6 наберем формулу  $=B6*EXP(LN(50/0,2)/4)$

и нажмем ENTER. В результате в ячейке C6 Excel вычислит радиус узла  $r_1 = 0,79527$ . Далее скопируем мышью формулу из ячейки C6 в ячейки D6, E6 и F6. Для пересчета таблицы нажмем клавишу F9 и получим разбивку оси  $r$  по В.С. Усенко, как показано на рис. 131.

Собрав таким способом модель гидродинамически несовершенной скважины в напорном пласте конечной мощности, мы промоделировали стационарную фильтрацию воды при разных соотношениях длины фильтра скважины  $l$  и мощности пласта  $M$ . Полученные водопритоки на модели были сравнены со значениями водопритоков, вычисленных по методике М. Маскета [140] и Н.Н. Веригина [150]. Расхождения модельных и расчетных водопритоков оказались меньше 2–3 %. Из этого можно сделать два вывода:

- 1) методика расчета скважин, несовершенных по степени вскрытия водоносного пласта, по Н.Н. Веригину [150] и М. Маскету [140], практически идентичная;
- 2) раз водопритоки, полученные на профильно-радиальной модели МКР-Excel, совпали с водопритоками, рассчитанными по известным (многократно проверенным) методикам, следовательно, модель была откалибрована верно и даже такое небольшое количество узлов сетки ( $5 \times 5 = 25$ ) обеспечило неплохую точность моделирования.

В ходе исследований при моделировании нестационарных нелинейных процессов фильтрации грунтовых вод малой мощности мы обнаружили, что в этом случае целесообразно использовать переменный пространственный шаг по формуле (328) не только для осесимметричных, но и для плоскопараллельных процессов. Малый начальный шаг надо назначать около источника возмущения (траншеи с водоотливом, водопонижением или вытянутого в плане очага инфильтрации). Это можно объяснить тем, что с течением времени скорость распространения воронки депрессии или кривой подпора замедляется.

## § 21. Критерии устойчивости нестационарных моделей

При расчете нестационарных моделей с помощью МКР-Excel мы используем формулы моделирования так называемого явного вида или по явной конечно-разностной схеме [90, с. 301]. Из теории и практики моделирования методом конечных разностей известно [20; 49; 126; 152; 168; 178; 213; 226; 227; 286], что перед расчетом таких моделей надо определенным образом подобрать соотношение пространственных и временных шагов. Это необходимо для обеспечения устойчивости счета.

Критерии устойчивости нестационарных моделей приводим по указанным литературным источникам, а также по результатам нашей практики моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel. Они даны для моделирования фильтрации подземных вод, так как это основной изучаемый физический процесс при защите от подтопления в городском строительстве. Критерии устойчивости для других процессов (фильтрация воздуха, фильтрационная консолидация, влагоперенос, электроосмос) можно принять по аналогии, переосмысливая их соответствующим образом. Это пояснено в примерах следующих параграфов.

Критерии устойчивости нестационарных МКР-моделей даны для одно-, двух- и трехмерных процессов фильтрации воды. Они выражены относительно максимально возможного шага времени  $Dt_{\max}$  на модели. Шаг времени на модели  $Dt$  в принятых единицах измерения (обычно в сутках) надо назначать так, чтобы он был равен или меньше величины  $Dt_{\max}$ . Если шаг времени  $Dt = Dt_{\max}$ , то формулы моделирования упрощаются, что показано в примере 58. Однако при этом величина  $Dt = Dt_{\max}$  может оказаться не круглой, например не в целых сутках, как в примере 58, когда получилось  $Dt_{\max} = 46,875 \text{ сут}$ . В таком случае шаг времени можно принять в целых числах, соблюдая условие  $Dt < Dt_{\max}$ , а формулы моделирования будут без упрощения. При построении конкретной модели надо выбрать шаг времени или  $Dt_{\max}$ , или  $Dt < Dt_{\max}$ . Следует заметить, что при  $Dt < Dt_{\max}$  начальные шаги расчета будут происходить более гладко, чем при  $Dt_{\max}$ . При дальнейших шагах времени моделируемые процессы динамики подземных вод происходят достаточно гладко в любом случае, то есть начальные неровности как бы «забываются».

Нельзя для явных МКР-схем назначать  $Dt > Dt_{\max}$ , иначе счет модели станет расходящимся и произойдет переполнение ячеек Excel недопустимо большими числами. В таком случае в ячейке Excel появляется сообщение

#ЧИСЛО!

о недопустимом для компьютера большом числе, выходящем из диапазона его возможностей. Например, в версии Excel 97 числа не должны выходить из пределов от  $-1 \cdot 10^{307}$  до  $1 \cdot 10^{307}$ .

Для одномерных плоскопараллельных и радиальных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени [90, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL_{\min})^2}{2a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (329)$$

где  $DL_{\min}$  — минимальный пространственный шаг из принятых на модели, для плоскопараллельных  $DL_{\min} = Dx_{\min}$  и радиальных  $DL_{\min} = Dr_{\min}$  (см. пример 57);  $a_{\max}$  — максимальная пьезопроводность (для напорного пласта) или максимальная уровнепроводность (для безнапорного пласта);  $k_{\max}$  — максимальный коэффициент фильтрации;  $M_{\max}$  — максимальная мощность напорного или безнапорного пласта (мощность грунтовых вод  $h_{\max}$ ) в течение прогнозируемого периода;  $\mu_{\min}$  — минимальный коэффициент водоотдачи (или недостаток насыщения) напорного или безнапорного пласта. Если какие-то параметры из перечисленных в течение прогнозируемого периода изменяются, то для расчета  $Dt_{\max}$  по формуле (329) надо брать их экстремальные значения. Если этого не предусмотреть, то на каком-то шаге времени может произойти нарушение устойчивости и разрушение модели.

Таким образом, на модели надо отыскать такой узел, где параметры в формуле (329) принимают упомянутые минимаксные значения и по ним сделать расчет  $Dt_{\max}$ . Нельзя для расчета брать средние значения параметров, например среднюю мощность грунтовых вод  $h_c$  в качестве  $M_{\max}$ , так как это может привести к потере устойчивости счета модели. В таком случае надо принять  $M_{\max}$ , равное максимальной мощности грунтовых вод  $h_{\max}$ , например максимально возможную высоту купола грунтовых вод при выходе УГВ на поверхность земли. О расчете  $Dt_{\max}$  см. пример 58.

Все эти подробно приведенные пояснения и предостережения по применению критерия устойчивости (329) для одномерных моделей относятся также и к двух-, трехмерным МКР-моделям, использующим явные схемы формул моделирования.

Для двухмерных плановых моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для прямоугольной сетки, по Н.Н. Калиткину [90, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[ \frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dy_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (330)$$

где  $Dx_{\min}$  и  $Dy_{\min}$  — минимальные шаги соответственно по осям  $x$  и  $y$  из принятых на модели; остальные обозначения см. пояснение к формуле (329).

Для двухмерных плановых МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для квадратной сетки [286, с. 600]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL)^2}{4a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (331)$$

где  $DL$  — пространственный шаг квадратной сетки; остальные обозначения см. пояснение к формуле (329).

Для двухмерных профильных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для прямоугольной сетки [90, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[ \frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (332)$$

а для квадратной сетки — по (331).

Для двухмерных профилно-радиальных (осесимметричных) МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для прямоугольной сетки [90, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[ \frac{1}{(Dr_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (333)$$

для квадратной сетки — по формуле (331).

Для трехмерных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени в случае сетки с шагами, разными по всем трем осям декартовых координат [90, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[ \frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dy_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (334)$$

а для кубической сетки [286, с. 601]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL)^2}{6a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (335)$$

где  $DL$  — пространственный шаг кубической сетки; остальные обозначения см. пояснение к формуле (329).

## § 22. Формулы моделирования МКР-Excel

Основой моделей МКР-Excel являются формулы моделирования (сборочные формулы), которые нужно ввести в ячейки электронной таблицы Microsoft Excel, имитирующие узлы конечно-разностной сетки.

Классификация основных формул моделирования построена с учетом наиболее часто встречающихся схем защиты от подтопления в городском строительстве. Наиболее часто моделируют уровни подземных вод (УПВ) при защите от подтопления территорий застройки (ЗПТЗ) и отдельных объектов.

Формулы моделирования фильтрации методом конечных разностей в электронных таблицах можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) количество пространственных измерений в задаче: одно-, двух-, трехмерные (двухмерные подразделяются на плановые и профильные);
- 2) система координат: декартова, цилиндрическая (одномерная радиальная или двухмерная осесимметричная);
- 3) фактор времени: стационарные и нестационарные процессы;
- 4) моделирование времени: статическое (в ячейках Excel) и динамическое (в оперативной памяти компьютера встроенными итерациями Excel или программным путем);
- 5) тип узла МКР-сетки: внутренний и граничный; по явной, неявной или смешанной схеме (в нестационарных задачах);
- 6) вывод формул: с помощью балансового принципа А.А. Самарского (является предпочтительным) или же непосредственно из исходных дифференциальных уравнений;
- 7) степень схематизации процесса: линейный (или линеаризованный), нелинейный (нелинеаризованный);
- 8) физика процесса: фильтрация воды, воздуха, фильтрационная консолидация, влаготеплоперенос, электроосмос; при этом моделируются напор, давление, пористость, влажность, температура, электрическое напряжение;
- 9) гидрогеология и механика грунтов: напорные воды с упругой фильтрацией или с жесткой (без деформации грунта); грунтовые воды и верховодка со свободной поверхностью в недеформируемых грунтах или же в грунтах, дающих осадку при осушении; напорно-безнапорная фильтрация и т.д.

Формулы моделирования весьма разнообразны и многочисленны. Здесь мы даем лишь самые основные формулы. Подробные сведения по формулам моделирования изложены последовательно с примерами в тексте книги.

В примерах 54 и 56 § 19 проиллюстрированы соответственно одно- и двухмерные формулы моделирования. Использована декартова система

координат. В обоих случаях рассмотрены стационарные процессы фильтрации воды. Формулы моделирования потребовались лишь для внутренних узлов, так как все граничные условия в рассмотренных примерах были I рода (см. § 13) и в граничных узлах были просто заданы постоянные напоры. Впрочем, задание напора в узле также является простейшей формулой моделирования. При граничных условиях II, III и IV рода требуется отдельно выводить формулу моделирования, что показано в дальнейших примерах.

В примере 56 § 19 указано, что наиболее корректным способом вывода формулы моделирования является балансовый принцип А.А. Самарского [227]. Этот принцип продемонстрирован в примерах 54 и 56. Наоборот, при выводе зависимостей (197) и (201) в § 16 был использован другой принцип вывода формул моделирования непосредственно из исходных дифференциальных уравнений фильтрации.

В упомянутых примерах область фильтрации была сильно схематизирована как в разрезе, так и в плане. Принятие гипотезы о напорном строении водоносного пласта с постоянной мощностью (толщиной)  $M$  обусловило линейность, в математическом смысле, процесса фильтрации. Физика процесса представлена чисто фильтрацией воды. В отношении гидрогеологии и механики грунтов рассмотрена жесткая напорная фильтрация в недеформируемом проницаемом грунте.

В следующем примере рассмотрено моделирование нестационарной фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью в линеаризованной и нелинейной гидравлических постановках по Буссинеску [199].

#### Пример 58. Моделирование подпора УГВ речной поймы

Рассмотрим простой пример одномерной нестационарной фильтрации. Про моделируем подпор уровня грунтовых вод (УГВ) в речной пойме после перегораживания реки плотиной. Освоение пойм имеет большое значение в градостроительстве [163]. Процесс подпора УГВ изображен на схематизированном гидрогеологическом разрезе (рис. 132). Задача является одномерной по горизонтали в декартовой системе координат. Грунтовые воды гидравлически связаны с рекой.

Ширину поймы  $L = 1000$  м расчленим сечениями с пространственным шагом  $DL = 250$  м. По линии водоупорной подошвы проведём горизонтальную плоскость отсчёта напоров 0-0. В начальный момент времени  $t = 0$  напор грунтовых вод поймы повсюду  $H_e = 5$  м. На линии уреза реки ставим граничное условие 1-го рода (ГУ1), то есть принимаем напор в реке  $H_p = 10$  м при любом  $t$ . На примыкании речной поймы к водоупорному коренному берегу ставим нулевой градиент напора (ГУ2). Это означает, что на контакте поймы с коренными породами расход воды нулевой. Грунт поймы имеет коэффициент фильтрации  $k = 10$  м/сут и недостаток насыщения  $\mu = 0,15$ . Таким образом, грунтовые воды речной поймы представляют моделируемую область фильтрации.

Возмущение УГВ  $\Delta H = H_p - H_e = 10 - 5 = 5$  м. Отношение  $\Delta H/H_e = 5/10 = 0,5$  превышает 10 — 25 % естественной мощности водоносного пласта. Следовательно, по критериям (102) и (103) данную задачу нельзя линеаризовать, она является нелинейной и



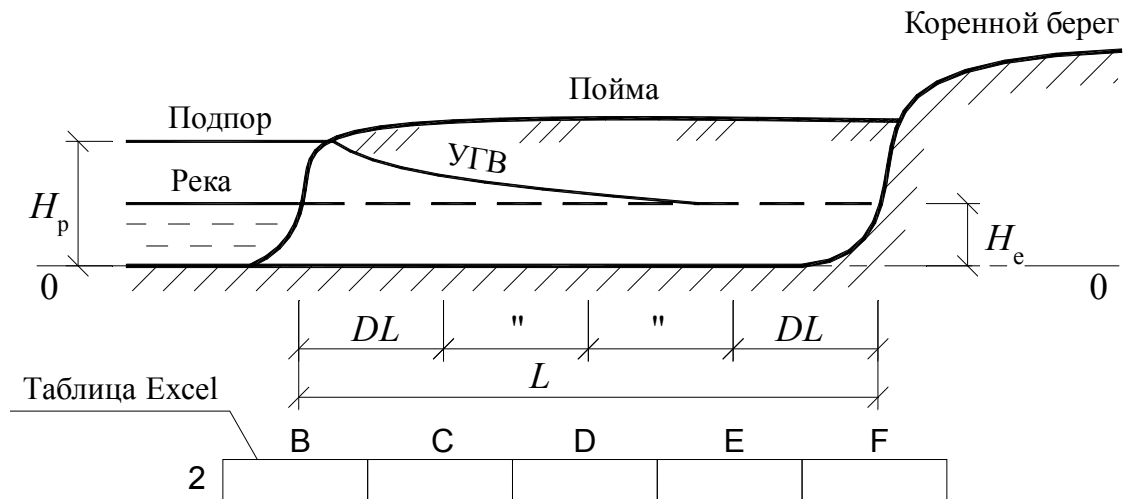


Рис. 132. Схема подпора УГВ речной поймы с узлами сетки и ячейками таблицы

ее следует решать в нелинейной постановке. По критерию А.Ж. Муфтахова [156], отношение  $H_e/L = 5/1000 = 0,005 = 0,5\%$ , что существенно меньше  $10\%$ . Следовательно, задачу можно моделировать в гидравлической постановке, пренебрегая вертикальными составляющими скорости фильтрации. Таким образом, с учетом этих двух критериев, наиболее корректной будет одномерная нелинейная гидравлическая модель. Однако для сравнения вначале построим линеаризованную гидравлическую модель, причем используем рекомендации П.Я. Полубариновой-Кочиной [198; 199] и Н.П. Куранова [118] о том, что в задачах подпора лучше применять линеаризацию нелинейного уравнения Буссинеска по I способу (см. § 8 гл. 2).

Формулы моделирования получим с использованием закона Дарси и балансового принципа [227]. Рассмотрим три внутренних узла C, D и E, которые для общности выкладок назовем соответственно  $i-1$ ,  $i$  и  $i+1$  (см. рис. 132, 133, 134). Предыдущие значения нестационарных напоров грунтовых вод обозначим верхним индексом  $S$ , а последующие — через шаг времени  $Dt$  — индексом  $S+1$ .

При I способе линеаризации для грунтовых вод (см. рис. 133) вводится средняя мощность водоносного пласта  $h_c = (H_p + H_e)/2 = 7,5$  м. Таким образом, переменная мощность грунтовых вод аппроксимируется постоянной мощностью  $h_c$  согласно I способу линеаризации по Буссинеску. Эта линеаризация условно превращает грунтовые воды как бы в напорные (псевдонапорные) с мощностью  $M = h_c$ .

Запишем исходное балансовое уравнение нестационарной фильтрации воды в линеаризованной постановке по I способу для внутреннего узла  $i$  сетки (см. рис. 133) в виде

$$k \frac{H_{i-1}^S - H_i^S}{DL} \cdot h_c \cdot 1 - k \frac{H_i^S - H_{i+1}^S}{DL} \cdot h_c \cdot 1 = DL \cdot 1 \cdot \mu \cdot \frac{H_i^{S+1} - H_i^S}{Dt},$$

откуда получим известную формулу моделирования [49, с. 123]:

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{2aDt}{(DL)^2} \left( \frac{H_{i-1}^S + H_{i+1}^S}{2} - H_i^S \right); a = kh_c/\mu, \quad (336)$$

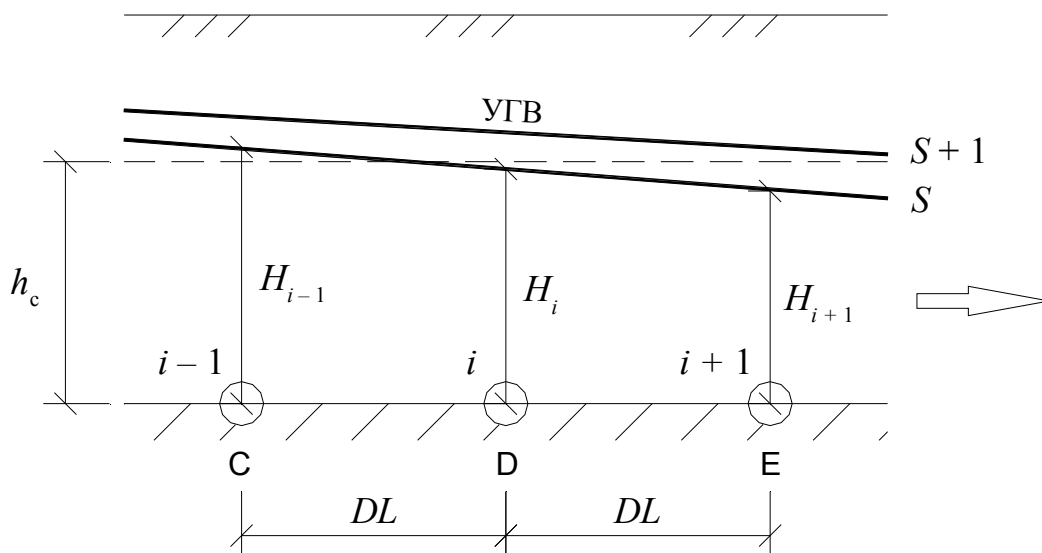


Рис. 133. Схема-шаблон одномерной безнапорной нестационарной фильтрации в однородном изотропном пласте в гидравлической постановке при линеаризации по I способу

где  $a$  — уровнепроводность водоносного пласта, значение которой

$$a = kh_c / \mu = 10 \cdot 7,5 / 0,15 = 500 \text{ м}^2 / \text{сут}.$$

Исходное балансовое уравнение нестационарной фильтрации воды в нелинейной гидравлической постановке для внутреннего узла  $i$  сетки (см. рис. 134) имеет вид

$$k \frac{H_{i-1}^S - H_i^S}{DL} \cdot \frac{H_{i-1}^S + H_i^S}{2} \cdot 1 - k \frac{H_i^S - H_{i+1}^S}{DL} \cdot \frac{H_i^S + H_{i+1}^S}{2} \cdot 1 = DL \cdot 1 \cdot \mu \cdot \frac{H_i^{S+1} - H_i^S}{Dt},$$

откуда получается формула моделирования

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{k \cdot Dt}{\mu (DL)^2} \left[ \frac{(H_{i-1}^S)^2 + (H_{i+1}^S)^2}{2} - (H_i^S)^2 \right]. \quad (337)$$

В полученных формулах (336) и (337)  $S$  означает количество дискретных шагов времени (номер шага времени  $S = 1, 2, 3$  и т.д.). Последующее значение напора  $H_i^{S+1}$  через один шаг времени вычисляется с помощью предыдущих значений напоров  $H_{i-1}^S$ ,  $H_i^S$  и  $H_{i+1}^S$ . Такие схемы вычислений называют явными или в явном виде [90, с. 301]. Шаг времени  $Dt$  для одномерных задач явных схем нужно назначать с соблюдением критерия устойчивости счета модели [90, с. 390] не более максимально допустимой величины шага времени

$$Dt_{\max} = \frac{(DL_{\min})^2}{2a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} H_{\max}}{\mu_{\min}}. \quad (338)$$

В нашем примере максимальный шаг времени для линеаризованной модели

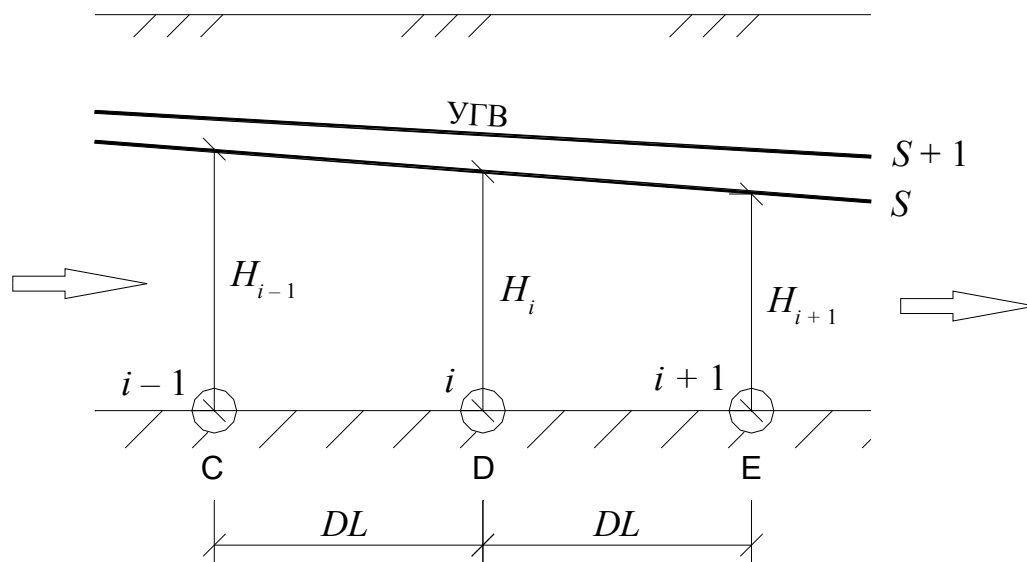


Рис. 134. Схема-шаблон одномерной безнапорной нестационарной фильтрации в однородном изотропном пласте при нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску

$$Dt_{\max} = \frac{(DL_{\min})^2}{2a_{\max}} = \frac{(250)^2}{2 \cdot 500} = 62,5 \text{ сут.}$$

Для нелинейной модели

$$Dt_{\max} = \frac{\mu_{\min} (DL_{\min})^2}{2k_{\max} H_{\max}} = \frac{0,15(250)^2}{2 \cdot 10 \cdot 10} = 46,875 \text{ сут.}$$

Больше этих значений шаг времени назначать нельзя, иначе счет моделей будет расходящимся. Если в линеаризованной модели шаг времени принять по максимуму  $Dt = Dt_{\max}$ , то формула (336) упростится до вида [49, с. 124]

$$H_i^{S+1} = [H_{i-1}^S + H_{i+1}^S] / 2. \quad (339)$$

На примере последней формулы покажем, как в Excel реализовать статическое (в ячейках Excel) и динамическое (в оперативной памяти компьютера встроенными итерациями Excel) моделирование нестационарного процесса фильтрации. Не забудем про правую границу II рода (см. рис. 132), связанную с коренным берегом. Сравним левую и правую границы области фильтрации. Для левой границы I рода напор постоянен весь прогнозный период  $H_p = 10 \text{ м}$ . Для правой границы на контакте с водоупорным коренным берегом, как уже было сказано, расход равен нулю (рис. 135), а напор будет меняться в сторону увеличения, так как коренной берег играет роль непроницаемой стенки бассейна.

Балансовое уравнение нестационарной фильтрации воды в линеаризованной постановке по I способу для граничного узла  $i$  сетки (моделируется ячейкой F) с условием II рода (см. рис. 135) можно записать в виде

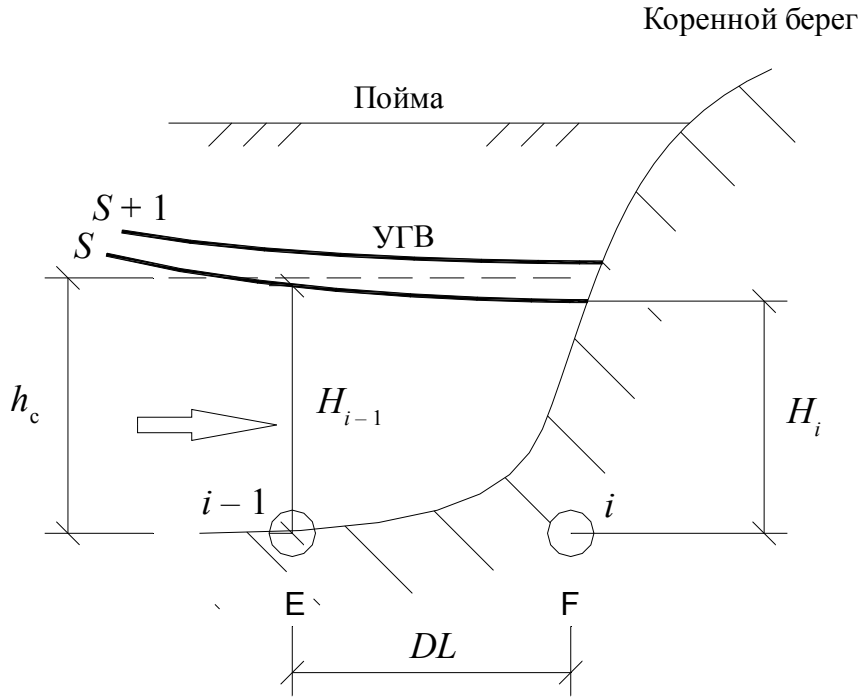


Рис. 135. К выводу формулы моделирования граничного условия II рода для линеаризованной модели

$$k \frac{H_{i-1}^S - H_i^S}{DL} \cdot h_c \cdot 1 = \frac{DL}{2} \cdot 1 \cdot \mu \cdot \frac{H_i^{S+1} - H_i^S}{Dt},$$

откуда находим формулу моделирования

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{2aDt}{(DL)^2} \left( \frac{H_{i-1}^S + H_{i+1}^S}{2} - H_i^S \right); a = kh_c / \mu, \quad (340)$$

причем мы намеренно не стали складывать  $H_{i-1}^S$  и сокращать на двойку, чтобы на будущее обратить внимание на следующую особенность граничного условия II рода с абсолютным водоупором. По принципу зеркального отображения [106, с. 714] формулу (340) можно получить из (336), если вместо  $H_{i+1}^S$  подставить «отраженное значение»  $H_{i-1}^S$ . Поэтому в (340) стоят два значения  $H_{i-1}^S$ .

Если в (340) шаг времени принять максимальный по (338), то формула (340) упростится до вида

$$H_i^{S+1} = H_{i-1}^S. \quad (341)$$

Статическое моделирование предполагает, что дискретные состояния напоров водоносного пласта в таблице Excel чередуются друг за другом в виде строк, столбцов или массивов (матриц, диапазонов) в направлении счета таблицы (см. 2-ю недокументированную особенность Excel в § 19). На рис. 136 шаги времени идут построчно вниз, что соответствует направлению счета в Excel. Чем больше проходит дискретных шагов вре-

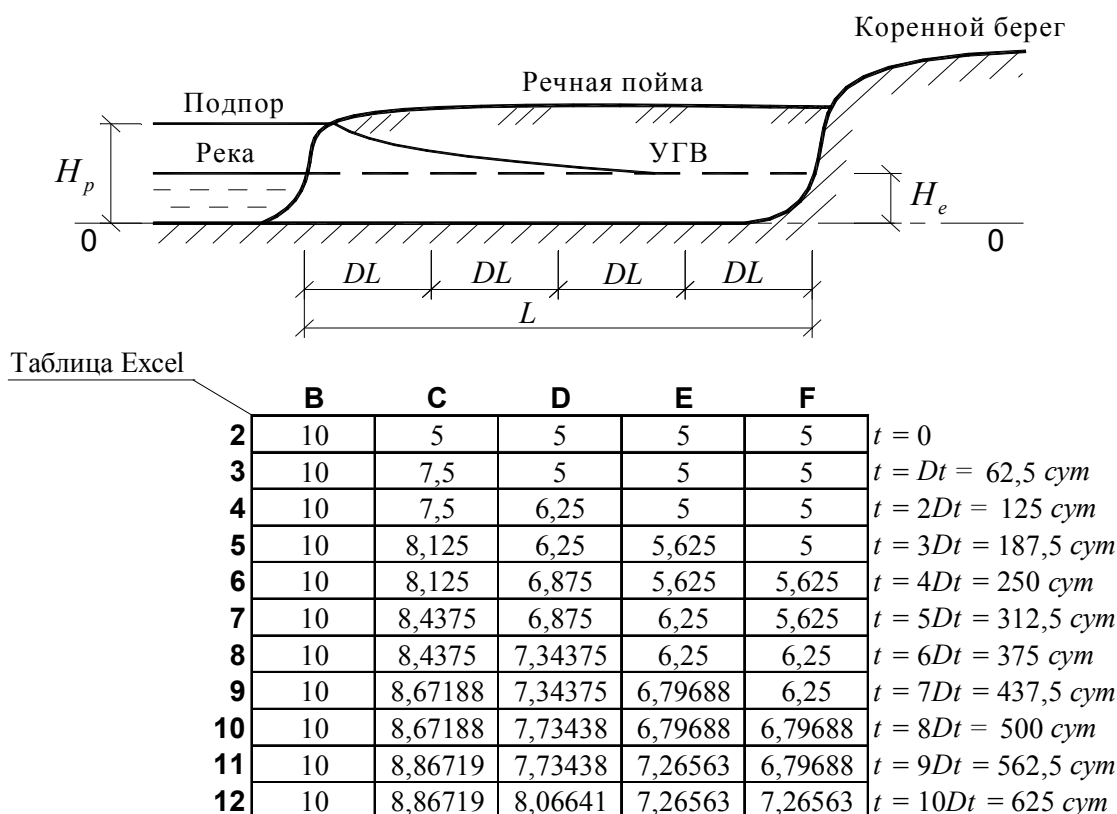


Рис. 136. Статическая линейризованная модель МКР-Excel подпора УГВ речной поймы

мени  $Dt$ , тем больше состояний напоров накапливается в файле модели. Положительное свойство статического моделирования заключается в том, что в конце расчетного периода времени можно вернуться в таблице к каким-то промежуточным временным состояниям и посмотреть распределение напоров. Кроме того, непрерывное чередование временных состояний позволяет строить графики временного прослеживания нестационарных процессов средствами Excel с помощью «Мастера диаграмм». Наоборот, недостатком статического моделирования является увеличение размера файла модели, особенно для больших моделей и при продолжительных во времени процессах, так как в файле сохраняются все состояния напоров для каждого шага  $Dt$ .

Модель, изображенная на рис. 136, собрана так. Прежде всего, как уже было рассказано в примере 56, надо подготовить файл модели: заготовить таблицу исходных данных с именами, установить опцию «Вычисления вручную» и т.д.

Первая строка таблицы от ячейки В2 до F2 содержит начальное распределение напоров при  $t = 0$ . Каждая ячейка этой строки соответствует узлу одномерной сетки с шагом  $DL$ . Нижележащие строки таблицы, начиная от строки с ячейками В3 — F3 и ниже, моделируют дискретные состояния напоров водоносного пласта через интервалы времени  $Dt = 62,5 \text{ сут}$ . Справа от модели-таблицы проставляется дискретная шкала времени:  $t = 0$ ;  $t = Dt = 62,5 \text{ сут}$ ;  $t = 2Dt = 125 \text{ сут}$  и т.д. (см. рис. 136) до окончания прогнозного периода времени, например до момента времени  $t = 10Dt = 625 \text{ сут}$ .

После набора начальных значений напоров с строке В2—F2 надо ввести формулу моделирования (339) в ячейку С3 в виде

$$= (B2 + D2)/2$$

и нажать клавишу ENTER. Затем из этой ячейки с помощью мыши скопировать формулу в соседние ячейки D3, E3 (как копировать, см. пример 56). Выделив мышью три ячейки С3, D3 и E3, в которые введена формула моделирования (339), надо скопировать формулу в нижележащие ячейки модели вплоть до строки с ячейками С12, D12 и E12 включительно.

В ячейке F3 (см. рис. 136), моделирующей правую границу, нужно ввести формулу (341) в виде

$$= E2$$

Постоянное значение напора в реке (левая граница I рода) надо скопировать из ячейки В2 в нижележащие до ячейки В12.

Таким образом, статическая модель в диапазоне по диагонали от ячейки В2 до F12 полностью готова к расчету. Осталось нажать клавишу F9, модель сразу же рассчитается. Результаты линеаризованной статической модели изображены на рис. 136. Например, по ним можно судить, что примерно через два месяца после устройства плотины при  $t = Dt = 62,5$  сут подпор УГВ распространится на расстояние от реки 250–500 метров, а через 625 суток подпор охватит всю пойму, угрожая подтоплением расположенной здесь застройке.

Решим ту же линеаризованную задачу с помощью динамической модели МКР-Excel (в оперативной памяти компьютера встроенными итерациями Excel).

Для моделирования в Excel используем область таблицы, состоящую из шести столбцов А, В, С, D, E, F и четырёх строк 1, 2, 3 и 4 (рис. 137). Столбцы от В до F соответствуют сечениям одномерной сетки, то есть её узловым точкам с напорами. Вначале в меню Excel СЕРВИС / ПАРАМЕТРЫ / ВЫЧИСЛЕНИЯ пометим щелчком «мыши» опцию ВРУЧНУЮ для возможности запуска расчёта модели вручную клавишей F9. Поставим «птичку» на опции ИТЕРАЦИИ, назначим предельное число итераций, равное 1, и щелкнем по кнопке ОК. Последняя опция необходима, чтобы при одном нажатии клавиши F9 происходила одна итерация (однократный пересчет таблицы).

В столбце В от 2 до 4 строки набираем константу 10 — напор в реке  $H_p$ . В ячейках второй строки от С2 до F2 в печатаем 5 — естественный напор грунтовых вод  $H_e$ . Таким образом, в ячейках от В2 до F2 набраны начальные условия задачи (см. рис. 137).

Ячейки третьей строки В3, С3, D3, E3, F3 моделируют положение УГВ в моменты времени, соответствующие нечётным шагам 1, 3, 5 ...  $Dt$ . Ячейки четвёртой строки В4, С4, D4, E4, F4 соответствуют значениям УГВ по чётным шагам 2, 4, 6 ...  $Dt$  (см. рис. 137). В ходе циклических итераций эти ячейки должны попеременно ссылаться друг на друга, согласно формуле моделирования, однако при первом шаге ( $S = 1$ ) ячейки С3–F3 должны брать начальные условия из второй строки с ячейками В2–F2. Поэтому формулы ячеек С3–F3 должны содержать логическую функцию ЕСЛИ(), которая встроена в Excel.

Таким образом, набираем в С3:

$$= \text{ЕСЛИ}(\$A\$2 = 1; (B2 + D2) / 2; (B4 + D4) / 2)$$

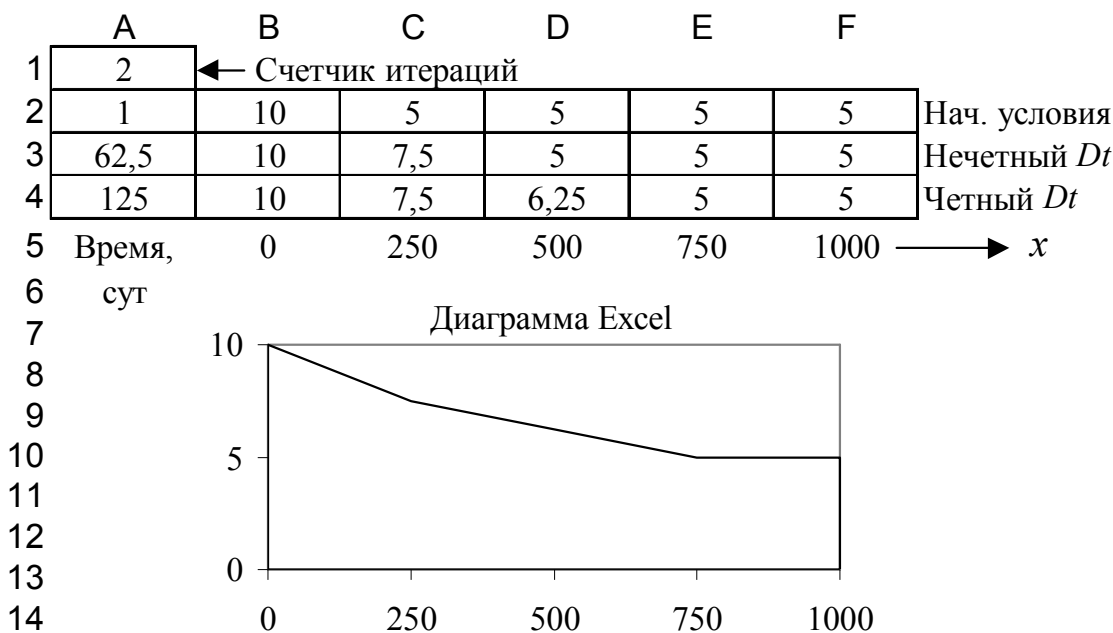
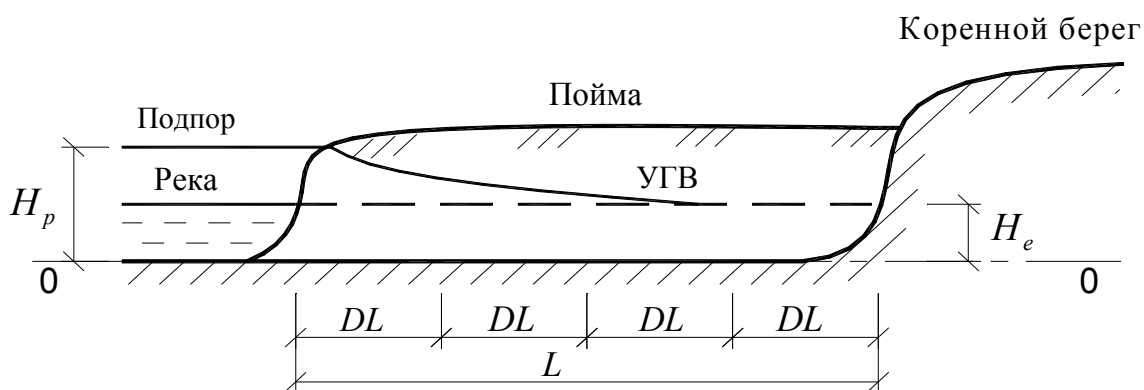


Рис. 137. Динамическая линейаризованная модель МКР-Excel подпора УГВ речной поймы (с анимационной диаграммой)

и нажимаем клавишу ENTER. Копируем из C3 в D3 и E3 протягиванием «мыши» вправо.

В ячейке F3 с граничным условием второго рода (ГУ2) с учетом формулы (341) в печатаем:

$$= \text{ЕСЛИ}(\$A\$2 = 1; (E2 + E2) / 2; (E4 + E4) / 2)$$

и нажмем ENTER.

Знак доллара \$ означает фиксированную (абсолютную) ссылку на столбец A и строку 2. При копировании в другие ячейки эта ссылка остается неизменной.

В ячейке C4 набираем:

$$= (B3 + D3) / 2$$

и нажимаем ENTER. Скопируем в D4 и E4, а в F4 вводим:

$$= (E3 + E3) / 2$$

и нажимаем ENTER.

Обратим еще раз внимание на абсолютную ссылку \$A\$2. В четырех ячейках столбца A необходимо ввести счётчики циклических итераций и временных шагов.

Обозначим через ИТЕР число итераций, назначаемых через меню Excel

СЕРВИС / ПАРАМЕТРЫ / ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Ячейку A1 назовем «счетчик итераций» (см. рис. 137), который содержит ИТЕР+1 итераций. В этой ячейке нужно набрать

$$= A1 + 1$$

и нажать клавишу ENTER.

Ячейка A2 должна показывать действительное число произошедших итераций ИТЕР, поэтому сюда в печатаем

$$= A1 - 1$$

и нажмем ENTER.

Ячейка A3 служит индикатором прошедшего на модели времени, соответствующего какому-то нечетному шагу  $Dt$ . То есть A3 должна показывать величину  $2\text{ИТЕР} - 1$ , умноженную на  $Dt$  в сутках. В нашем примере  $Dt = 62,5 \text{ сут}$ . В A3 наберем

$$= (2 * A2 - 1) * 62,5$$

и нажмем ENTER. Попутно отметим, что шаг времени  $62,5 \text{ сут}$  лучше вводить с помощью имени  $Dt$  (о применении имен см. пример 56). Тогда в A3 надо набрать

$$= (2 * A2 - 1) * Dt$$

Кроме того, в качестве разделителя целой и дробной частей числа лучше использовать точку вместо запятой для обеспечения возможности совместного использования русских и англоязычных версий компьютерных программ (см. пример 56).

Ячейка A4 показывает время, соответствующее некоторому нечетному шагу  $Dt$ , то есть  $2\text{ИТЕР}$ , умноженное на  $Dt$ . В A4 в печатаем

$$= 2 * A2 * Dt$$

и нажмем ENTER.

Под телом модели в ячейках от B5 до F5 поместим шкалу  $x$ , на которой нанесем координаты узлов модели (см. рис. 137).

Таким образом, динамическая линейаризованная модель МКР-Excel готова к расчёту. Обнулим счётчик итераций (см. рис. 137), для чего дважды щёлкнем курсором «мыши» по ячейке A1 и нажмём клавишу ENTER.

Нажмем клавишу F9. В результате произойдет одна итерация (однократный пересчет таблицы) и в оперативной памяти компьютера будут рассчитаны напоры в водоносном пласте поймы на первый (нечетный) шаг времени  $t = Dt = 62,5 \text{ сут}$  в ячейках от C3 до F3 и на следующий второй (четный) шаг времени  $t = 2Dt = 125 \text{ сут}$  в ячейках от C4 до F4, что показано на рис. 137. Ячейка A2 показывает действительное число произошедших на модели итераций  $\text{ИТЕР} = 1$ .

Нестационарное изменение УГВ на модели можно проследивать в динамике, то есть создать визуальную анимацию с помощью «Мастера диаграмм» Excel. На рис. 137 под телом динамической модели помещена анимационная диаграмма Excel. На ней изображен разрез поймы, грунтовые воды заштрихованы. Положение УГВ соответствует одному нажатию клавиши F9 при  $\text{ИТЕР} = 1$  для момента времени  $t = 2Dt = 125 \text{ сут}$ . Значения напоров грунтовых вод для диаграммы соответствуют содержимому ячеек от B4 до F4.



Если последовательно нажимать клавишу F9, то УГВ на диаграмме Excel будет также последовательно изменяться. Можно нажать F9 и удерживать, тогда изменение УГВ будет происходить плавно, правда, для данной модели довольно быстро. На больших моделях МКР-Excel УГВ на диаграмме может изменяться медленно, так как при большом числе узлов счет модели будет медленный.

Такие анимационные графики-диаграммы придают большую наглядность и информативность динамическому моделированию с помощью МКР-Excel. Поясним, как получена анимационная диаграмма на рис. 137 в версии Excel 97.

Выделим мышью ячейки от B4 до F4. Выберем меню Excel

### ВСТАВКА/ДИАГРАММА.

В появившемся диалоговом окне «Мастер диаграмм» выберем стандартный тип «С областями» и нажмем кнопку «Готово». В результате получим диаграмму, для которой надо внизу добавить шкалу  $x$ . Для этого щелкнем правой кнопкой мыши по краю полученной диаграммы и в появившемся динамическом меню выберем команду «Исходные данные...». Появится окно «Исходные данные», в котором в строке «Подписи оси X» мышью щелкнем по цветной кнопке, укажем в таблице диапазон ячеек от B5 до F5 со значениями координат узлов, нажмем клавишу ENTER и кнопку ОК. В результате получим анимационный график-диаграмму (см. рис. 137). Он не очень гладкий, в виде ломаной линии, т.к. число узлов на модели невелико.

Оформление диаграмм Excel — штриховки, шрифты, заголовки и т.д. — мы предлагаем освоить самостоятельно. Рекомендуется использовать какое-нибудь хорошее руководство пользователя для таблиц Microsoft Excel.

Допустим, необходимо рассчитать подпор УГВ поймы на момент времени  $t = 625$  сут, что соответствует четному шагу  $10Dt$ . Значит, число итераций ИТЕР =  $10 / 2 = 5$ . Нажмем F9 четыре раза (так как одна итерация уже произошла) и получим результат расчёта нестационарной модели в четвёртой строке Excel от ячейки B4 до F4 (рис. 138).

	A	B	C	D	E	F	
1	6	← Счетчик итераций					
2	5	10	5	5	5	5	Нач. условия
3	562,5	10	8,86719	7,73438	7,26563	6,79688	Нечетный $Dt$
4	625	10	8,86719	8,06641	7,26563	7,26563	Четный $Dt$
	Время, сут	Напоры, м					

Рис. 138. Результаты динамической линейаризованной модели подпора УГВ поймы

Можно быстрее получить этот результат. Число итераций ИТЕР = 5, соответствующее  $t = 625$  сут, наберем через меню Excel СЕРВИС / ПАРАМЕТРЫ / ВЫЧИСЛЕНИЯ в графе «Предельное число итераций» и щёлкнем по кнопке ОК. Обнулим счетчик итераций вновь, как было указано выше. Нажмём один раз клавишу F9 и сразу же получим результат расчёта нестационарной модели в четвёртой строке Excel от ячейки B4 до F4 (см. рис. 138).

Реализуем динамическим способом нелинейную гидравлическую модель подпора УГВ поймы. Она отличается от рассмотренной линейаризованной модели максимально

	A	B	C	D	E	F	
1	Исходные данные:						
2	$k$	$\mu$	$DL$	$H_{max}$	$Dt_{max}$	$Dt$	
3	10	0,15	250	10	46,875	31,25	
4	Модель нелинейная гидравлическая: подпор УГВ поймы						
5	11	<--- Счетчик итераций					
6	10	10	5	5	5	5	Нач. условия
7	593,75	10	9,02634	8,07871	7,34514	7,06023	Нечетный $Dt$
8	625	10	9,06494	8,16029	7,46531	7,19704	Четный $Dt$
	<div> <div>Время, сут</div> <div>Напоры</div> </div>						

Рис. 139. Результаты расчета нелинейной динамической модели подпора УГВ поймы

возможным шагом времени  $Dt = 46,875 \text{ сут}$  и формулами моделирования. Для внутренних ячеек сетки применим формулу (337). Для правой границы области фильтрации (см. рис. 135, 137) по аналогии с (340) на основе формулы (337) запишем напор на контакте поймы с коренным водоупорным берегом в виде

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{k \cdot Dt}{\mu(DL)^2} \left[ \frac{(H_{i-1}^S)^2 + (H_{i+1}^S)^2}{2} - (H_i^S)^2 \right]. \quad (342)$$

Поместим над телом модели таблицу исходных данных с именами (рис. 139), так как формулы моделирования на этот раз сложнее и содержат разные параметры.

Имена для параметров рекомендуется использовать из латинских букв в целях корректности работы модели. Лучше, если имя почти совпадает с обозначением параметра. Например, коэффициенту фильтрации  $k$  можно так и назначить имя  $k$ , а недостатку насыщения  $\mu$  — имя  $mi$ .

Результат моделирования показан на рис. 139. Шаг времени выбран в два раза меньшим  $Dt = 31,25 \text{ сут}$  по сравнению с линеаризованной моделью  $Dt = 62,5 \text{ сут}$  с учетом ограничения по максимальному шагу на нелинейной модели  $Dt_{max} = 46,875 \text{ сут}$ . Результаты распределения напоров линеаризованной модели (см. рис. 138) и нелинейной (см. рис. 139) при  $t = 625 \text{ сут}$  отличаются не более чем на 2 %. Почти полное совпадение УГВ, рассчитанных на моделях с разными постановками, можно объяснить большой относительной протяженностью области фильтрации в горизонтальном направлении, когда  $H_c/L = 5/1000 = 0,005 = 0,5 \%$  (см. начало данного примера).

Приведенный пример подтверждает критерий (104) А.Ж. Муфтахова о том, что когда отношение средней мощности грунтовых вод  $h_c$  к длине области фильтрации  $L$  меньше 10 %, то можно применять гидравлическую теорию фильтрации. От себя добавим, что при  $h_c/L < 1 \%$  исходное уравнение Буссинеска (67) можно линеаризовать.

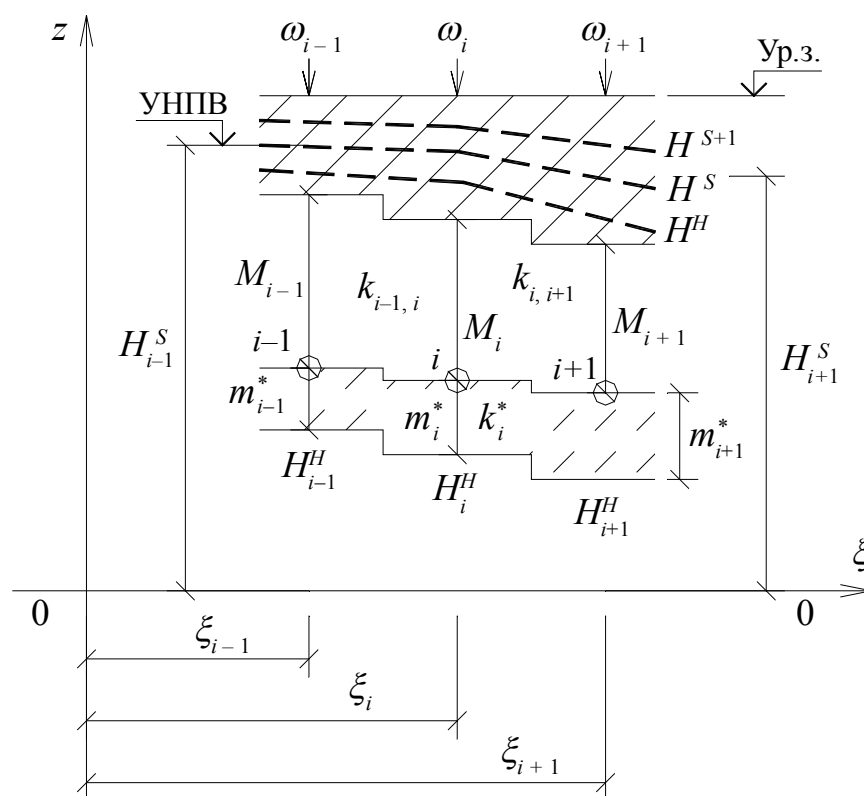


Рис. 140. Схема-шаблон обобщенной одномерной модели напорного пласта:  $\xi = x$  в декартовых координатах (плоскопараллельная фильтрация);  $\xi = r$  в цилиндрических координатах (радиальная фильтрация)

**Одномерные формулы моделирования.** Получим обобщенные одномерные формулы моделирования МКР-Excel в рамках гипотезы А.Н. Мятеева — Н.К. Гирина [198] о том, что в хорошо проницаемых водоносных пластах движение подземных вод преимущественно горизонтальное, а в прилегающих к ним снизу или сверху слабопроницаемых прослоях движение в основном происходит в вертикальном направлении. Такую гипотезу за рубежом называют теорией перетекания [199].

Одномерные формулы моделирования получим для условий напорного пласта с инфильтрационным питанием сверху и перетеканием через слабопроницаемый прослой снизу. Покажем, как от формул напорного пласта можно перейти к формулам безнапорного пласта. При этом рассмотрим два случая:

- 1) плоскопараллельная фильтрация в декартовых координатах;
- 2) радиальная фильтрация в цилиндрических координатах.

Схематичный разрез напорного пласта показан на рис. 140. Три кружка обозначены узлы одномерной МКР-сетки, которые в Excel соответствуют ячейкам таблицы. Здесь  $\xi$  — обобщенная координата.

Поясним обозначения рис. 140. Моделируемый напорный пласт имеет переменную мощность (толщину)  $M$ . Движение подземных вод происходит по нему слева направо. Коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$  данного пласта изменяются в горизонтальном направлении. Напорная линия пласта обозначена в двух положениях:  $H^S$  и  $H^{S+1}$ , что соответствует дискретным положениям при моделировании в предыдущий и последующий моменты времени с интервалом, равным шагу времени  $Dt$ .

Ниже расположен слабопроницаемый прослой переменной толщины  $m^*$  с коэффициентом фильтрации  $k^*$ , переменным в горизонтальном направлении. Через этот прослой вода фильтруется в вертикальном направлении под влиянием разности напоров  $H^S - H^H$  в основном пласте и пласте, расположенном под прослоем. Оба пласта напорные. Напоры отсчитываются от горизонтальной плоскости сравнения 0-0, которая совмещена с осью  $\xi$ . Пласт под прослоем имеет переменные в горизонтальном направлении, но неизменные во времени напоры  $H^H$ , чья напорная линия показана на рис. 140.

Выше моделируемого напорного пласта находится слабопроницаемый грунт (относительный водоупор), через который в напорный пласт с поверхности земли и из зоны аэрации может проникать инфильтрационная вода переменной интенсивности  $\omega$  в пространстве.

Узлы МКР-сетки размещаем по подошве основного напорного пласта на контакте с нижележащим слабопроницаемым прослоем. Уклоны этой подошвы считаем небольшими, практически не влияющими на длину пути фильтрации, то есть принимаем точку зрения как у Г.Н. Каменского [91]. Распределение напоров  $H^S$  не зависит от вертикальной координаты, что соответствует гидравлической постановке. То есть напоры на подошве и кровле пласта в любом вертикальном сечении равны в любой момент времени. Другими словами, в моделируемом напорном пласте движение подземных вод происходит лишь в горизонтальном направлении.

Узлы одномерной МКР-сетки обозначены индексами  $i-1, i, i+1$ . Соответственно индексы присвоены для напоров, мощностей, коэффициентов фильтрации и водоотдачи и инфильтрации. Коэффициенты фильтрации моделируемого пласта принимаем средними между блоками, например  $k_{i-1,i}$  (см. рис. 140). Величину  $k_{i-1,i}$  можно найти по формуле Г.Н. Каменского (115). Узлы сетки принимаем по центру тяжести блоков.

Исходное уравнение баланса нестационарной плоскопараллельной фильтрации воды в напорном пласте (см. рис. 140 при  $\xi = x$ ) запишем в виде

$$k_{i-1,i} \left( \frac{M_{i-1} + M_i}{2} \right) \left( \frac{H_{i-1}^S - H_i^S}{x_i - x_{i-1}} \right) - k_{i,i+1} \left( \frac{M_i + M_{i+1}}{2} \right) \left( \frac{H_i^S - H_{i+1}^S}{x_{i+1} - x_i} \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\omega_i (x_{i+1} - x_{i-1})}{2} - \frac{k_i^* (H_i^S - H_i^H) (x_{i+1} - x_{i-1})}{2m_i^*} = \\
& = \frac{\mu_i (H_i^{S+1} - H_i^S) (x_{i+1} - x_{i-1})}{2Dt},
\end{aligned}$$

откуда получим формулу моделирования

$$\begin{aligned}
H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{Dt}{\mu_i (x_{i+1} - x_{i-1})} & \left[ \frac{k_{i-1,i} (M_{i-1} + M_i) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{x_i - x_{i-1}} - \right. \\
& \left. - \frac{k_{i,i+1} (M_i + M_{i+1}) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{x_{i+1} - x_i} \right] + \\
& + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \tag{343}
\end{aligned}$$

где все обозначения оговорены выше.

Отметим, что в рекомендациях ПНИИСа [213] записана похожая формула, но в ней, в отличие от (343), использованы не коэффициенты фильтрации и мощности напорного пласта, а комплексы в виде их произведения, называемые проводимостью (водопроводимостью) пласта

$$T = kM. \tag{344}$$

Введение  $T$  вносит большую степень схематизации в моделирование, то есть несколько огрубляет результаты.

При использовании формулы (343) в модели МКР-Excel координаты  $x$  в ячейках надо набирать не непосредственно, так как это очень кропотливая работа, а в виде фиксированных (абсолютных) ссылок на значения оси координат  $x$ . О фиксированных (абсолютных) ссылках см. пример 58.

Из (343) можно получить формулу моделирования безнапорного пласта со свободной поверхностью УГВ, если сделать замены:

$$\begin{aligned}
M_{i-1} &= h_{i-1}^S = H_{i-1}^S - z_{i-1}; \\
M_i &= h_i^S = H_i^S - z_i; \\
M_{i+1} &= h_{i+1}^S = H_{i+1}^S - z_{i+1}, \tag{345}
\end{aligned}$$

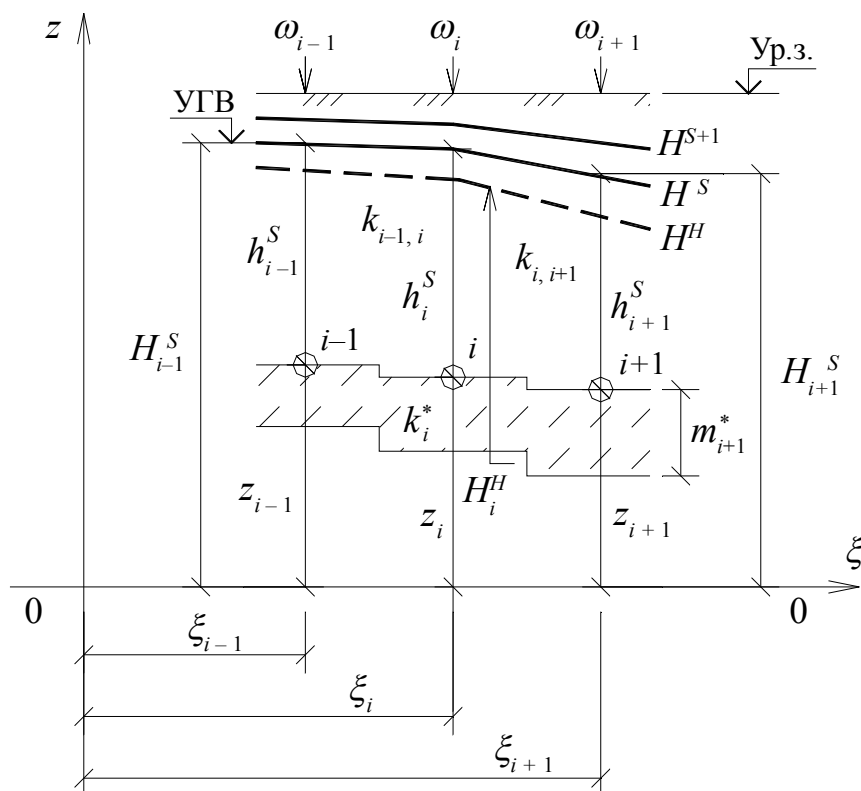


Рис. 141. Схема-шаблон обобщенной одномерной модели  
безнапорного пласта грунтовых вод:

$\xi = x$  в декартовых координатах (плоскопараллельная  
фильтрация);  $\xi = r$  в цилиндрических координатах  
(радиальная фильтрация)

где  $h_i^S$  и др. — переменные во времени мощности (толщины) грунтовых вод;  
 $z_i$  и др. — соответствующие отметки подошвы моделируемого водоносного  
пласта (рис. 141).

В таком случае обобщенная одномерная формула моделирования безна-  
порных грунтовых вод или верховодки будет выглядеть как

$$\begin{aligned}
 H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{Dt}{\mu_i (x_{i+1} - x_{i-1})} & \left[ \frac{k_{i-1,i} (h_{i-1}^S + h_i^S) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{x_i - x_{i-1}} - \right. \\
 & \left. - \frac{k_{i,i+1} (h_i^S + h_{i+1}^S) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{x_{i+1} - x_i} \right] + \\
 & + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \quad (346)
 \end{aligned}$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод  $h^S$  надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (345). Строго говоря, формула (346) уже не совсем одномерная, так как в ней присутствуют вертикальные координаты подошвы пласта  $z_i$  и др.

Получим обобщенную одномерную формулу моделирования напорных вод при радиальной нестационарной фильтрации в цилиндрических координатах (см. рис. 140 при  $\xi = r$ ). В этом случае блоки МКР-сетки представлены цилиндрами с основанием в виде кольца, площадь которого

$$F_{\kappa} = \frac{\pi}{4} \left[ (r_{i+1} + r_i)^2 - (r_i + r_{i-1})^2 \right], \quad (347)$$

где  $r_{i-1}$ ,  $r_i$  и  $r_{i+1}$  — радиальные координаты узлов МКР-сетки.

Запишем уравнение баланса воды через цилиндрический блок модели с узлом  $i$  с учетом логарифмической формулы Дюпюи водопритока в совершенный круглый в плане котлован [199] в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\pi k_{i-1,i} (M_{i-1} + M_i) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \frac{\pi k_{i,i+1} (M_i + M_{i+1}) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} + \\ & + \omega_i F_{\kappa} - \frac{k_i^* (H_i^S - H_i^H) F_{\kappa}}{m_i^*} = \frac{\mu_i (H_i^{S+1} - H_i^S) F_{\kappa}}{Dt}, \end{aligned}$$

откуда получим обобщенную формулу моделирования одномерной нестационарной радиальной фильтрации напорных вод с инфильтрацией и перетеканием в цилиндрических координатах в виде

$$\begin{aligned} H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi Dt}{\mu_i F_{\kappa}} & \left[ \frac{k_{i-1,i} (M_{i-1} + M_i) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \right. \\ & \left. - \frac{k_{i,i+1} (M_i + M_{i+1}) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \\ & + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}. \end{aligned} \quad (348)$$

Отметим, что моделированием радиальной фильтрации подробно занимался В.С. Усенко [290], но его формулы моделирования являются частным случаем формулы (348).

С помощью подстановок (345) из (348) получается формула моделирования одномерной нестационарной радиальной фильтрации безнапорных грунтовых вод или верховодки с инфильтрацией и перетеканием в цилиндрических координатах (см. рис. 141 при  $\xi = r$ ) в виде

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi Dt}{\mu_i F_k} \left[ \frac{k_{i-1,i} (h_{i-1}^S + h_i^S) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \frac{k_{i,i+1} (h_i^S + h_{i+1}^S) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \quad (349)$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод  $h^S$  надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (345).

Таким образом, обобщенные формулы (343), (346), (348), (349) позволяют создавать с помощью МКР-Excel различной степени сложности модели напорной и безнапорной одномерной фильтрации подземных вод в декартовых и цилиндрических координатах. Частные случаи разного моделирования на основе этих формул при защите от подтопления в городском строительстве приведены в примерах данной работы.

*Двухмерные формулы моделирования.* Выведем обобщенные двухмерные формулы моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel. На контактах с внутренними источниками-стоками и слабопроницаемыми прослоями, при наличии инфильтрации и перетекания используем гипотезу А.Н. Мятлева — Н.К. Гиринского [198], то есть аналогично, как было принято при выводе формул моделирования для одномерной фильтрации. Данная гипотеза относится к направлению, перпендикулярному к плоскости моделирования.

Двухмерные формулы моделирования вначале получим для условий напорного пласта с инфильтрационным питанием сверху и перетеканием через слабопроницаемый прослой снизу. Затем от формул напорного пласта перейдем к формулам безнапорного пласта грунтовых вод.



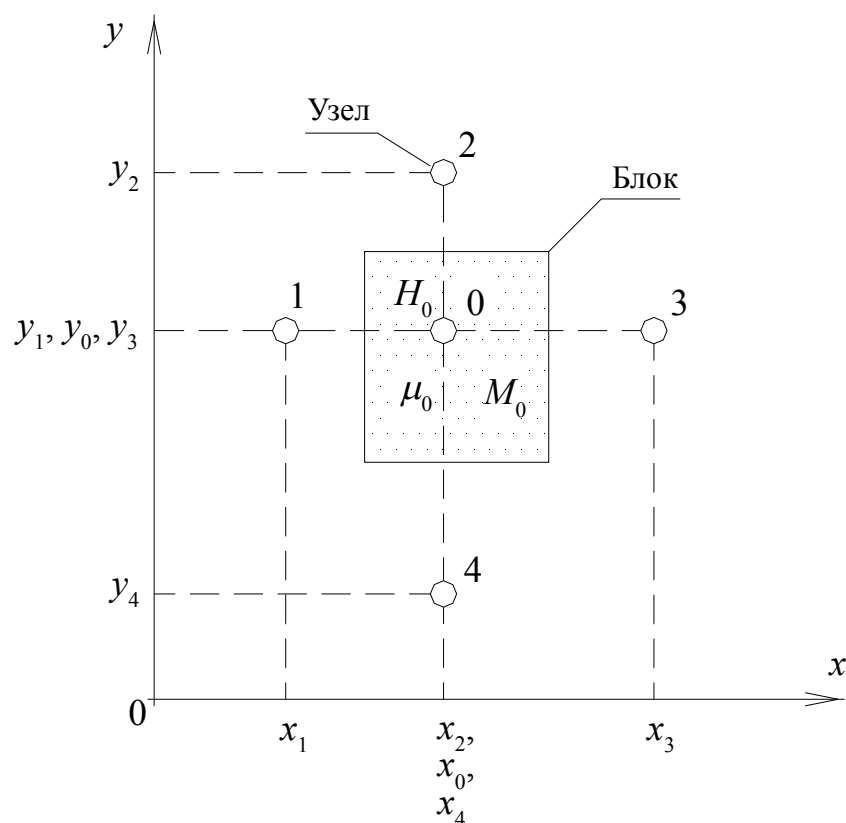


Рис. 142. Схема-шаблон обобщенной двухмерной модели плановой фильтрации (в горизонтальной плоскости) в напорном пласте

Рассмотрим три двухмерных случая обобщенных формул моделирования:

- 1) плановой фильтрации в горизонтальной плоскости в декартовых координатах; такие модели часто используют для разработки защиты от подтопления городских районов и микрорайонов [213];
- 2) плоской (профильно-плоской) фильтрации в вертикальной плоскости в декартовых координатах; область применения: локальные задачи моделирования водопритока в несовершенные траншеи, одно- и двухлинейный дренаж (см. рис. 21);
- 3) профильно-радиальной фильтрации в вертикальной плоскости в цилиндрических координатах; например, для изучения фильтрации в несовершенные скважины и котлованы (см. рис. 98).

Схема-шаблон МКР-сетки для случая плановой фильтрации воды в напорном пласте в горизонтальной плоскости показана на рис. 142. Кругами обозначены узлы двухмерной МКР-сетки, которые в Excel соответствуют ячейкам таблицы. Шаг узлов в общем случае неравномерный по обеим осям  $x$  и  $y$ . Индексы узлов двухмерной сетки в целях удобочитаемости приняты цифровые в отличие от буквенно-цифровых в одномерных моделях.

Моделируемый напорный пласт имеет переменную мощность (толщину)  $M$ . Движение подземных вод происходит по нему почти в горизонтальной плоскости. Коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$  данного пласта изменяются в горизонтальном направлении. Напоры данного пласта обозначены в двух положениях:  $H^S$  и  $H^{S+1}$ , что соответствует дискретным положениям при моделировании в предыдущий и последующий моменты времени с интервалом, равным шагу времени  $Dt$ .

Ниже моделируемого напорного пласта расположен слабопроницаемый прослой переменной толщины  $m^*$  с коэффициентом фильтрации  $k^*$ , переменным в горизонтальном направлении. Через этот прослой вода фильтруется в вертикальном направлении под влиянием разности напоров  $H^S - H^H$  в основном пласте и пласте, расположенном под прослоем. Оба пласта напорные. Напоры отсчитываются от некоторой горизонтальной плоскости сравнения  $0-0$ , которая расположена ниже напорных пластов. Например, это может быть плоскость отсчета абсолютных отметок от среднего уровня Балтийского моря [256, с. 12]. Пласт под прослоем имеет переменные в горизонтальном направлении, но неизменные во времени напоры  $H^H$ .

Выше моделируемого напорного пласта находится слабопроницаемый грунт (относительный водоупор), через который в напорный пласт с поверхности земли и из зоны аэрации может проникать инфильтрационная вода переменной интенсивности  $\omega$  в пространстве и времени.

Узлы МКР-сетки размещены по подошве основного напорного пласта на контакте с нижележащим слабопроницаемым прослоем. Уклоны этой подошвы считаем небольшими, практически не влияющими на длину пути фильтрации, то есть принимаем точку зрения Г.Н. Каменского [91]. Распределение напоров  $H^S$  не зависит от вертикальной координаты, что соответствует гидравлической постановке. То есть напоры на подошве и кровле пласта в любом вертикальном сечении равны в любой момент времени. Другими словами, в моделируемом напорном пласте движение подземных вод происходит лишь в горизонтальном направлении.

Узлы двумерной МКР-сетки обозначены цифровыми индексами: 0 — центральный узел блока и 1, 2, 3, 4 — узлы соседних блоков (см. рис. 142). Соответствующие индексы присвоены для напоров, мощностей, коэффициентов фильтрации и водоотдачи, инфильтрации. Коэффициенты фильтрации моделируемого пласта принимаем средними между блоками, например  $k_{0-1}$  (то есть между узлами 0 и 1) и т.д. Величину  $k_{0-1}$  и др. можно найти по формуле Г.Н. Каменского (115). Узлы сетки расположены по центру тяжести блоков.

Исходное уравнение баланса нестационарной плановой фильтрации воды в напорном пласте (см. рис. 142) запишем в виде

$$\begin{aligned}
 & k_{0-1} \left( \frac{y_2 - y_4}{2} \right) \left( \frac{M_1 + M_0}{2} \right) \left( \frac{H_1^S - H_0^S}{x_0 - x_1} \right) + k_{0-2} \left( \frac{x_3 - x_1}{2} \right) \left( \frac{M_2 + M_0}{2} \right) \left( \frac{H_2^S - H_0^S}{y_2 - y_0} \right) - \\
 & - k_{0-3} \left( \frac{y_2 - y_4}{2} \right) \left( \frac{M_0 + M_3}{2} \right) \left( \frac{H_0^S - H_3^S}{x_3 - x_0} \right) - k_{0-4} \left( \frac{x_3 - x_1}{2} \right) \left( \frac{M_0 + M_4}{2} \right) \left( \frac{H_0^S - H_4^S}{y_0 - y_4} \right) + \\
 & + \frac{\omega_0 (x_3 - x_1)(y_2 - y_4)}{4} - \frac{k_0^* (H_0^S - H_0^H)(x_3 - x_1)(y_2 - y_4)}{4m_0^*} = \\
 & = \frac{\mu_0 (H_0^{S+1} - H_0^S)(x_3 - x_1)(y_2 - y_4)}{4Dt},
 \end{aligned}$$

откуда получим обобщенную формулу моделирования нестационарной плановой фильтрации воды (в горизонтальной плоскости) в напорном пласте с учетом инфильтрации и перетекания в виде

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{\mu_0} & \left[ \frac{k_{0-1} (M_1 + M_0) (H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2} (M_2 + M_0) (H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{k_{0-3} (M_0 + M_3) (H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \\
 & \left. - \frac{k_{0-4} (M_0 + M_4) (H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*}, \quad (350)
 \end{aligned}$$

где все обозначения оговорены выше.

В [213] имеется подобная формула, но в ней, в отличие от (350), использованы не коэффициенты фильтрации и мощности напорного пласта, а проводимость по (344), что делает моделирование несколько грубее.

При использовании формулы (350) в модели МКР-Excel координаты  $x$  и  $y$  в ячейках надо набирать не непосредственно, так как это очень кропотливая работа, а в виде фиксированных (абсолютных) ссылок на значения осей координат  $x$  и  $y$ . О фиксированных (абсолютных) ссылках см. пример 58.

Из (350) можно получить формулу моделирования безнапорного пласта грунтовых вод или верховодки со свободной поверхностью, если сделать замены:

$$\begin{aligned}
M_0 &= h_0^S = H_0^S - z_0; \\
M_1 &= h_1^S = H_1^S - z_1; \\
M_2 &= h_2^S = H_2^S - z_2; \\
M_3 &= h_3^S = H_3^S - z_3; \\
M_4 &= h_4^S = H_4^S - z_4,
\end{aligned} \tag{351}$$

где  $h_0^S$  и др. — переменные во времени мощности (толщины) грунтовых вод;  $z_0$  и др. — соответствующие отметки подошвы моделируемого водоносного пласта, например абсолютные отметки.

В таком случае обобщенная двухмерная формула моделирования безнапорных грунтовых вод при плановой фильтрации (в горизонтальной плоскости) с учетом инфильтрации и перетекания имеет вид

$$\begin{aligned}
H_0^{S+1} &= H_0^S + \frac{Dt}{\mu_0} \left[ \frac{k_{0-1}(h_1^S + h_0^S)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \right. \\
&+ \frac{k_{0-2}(h_2^S + h_0^S)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{k_{0-3}(h_0^S + h_3^S)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \\
&\left. - \frac{k_{0-4}(h_0^S + h_4^S)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*}, \tag{352}
\end{aligned}$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод  $h^S$  надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (351). Строго говоря, формула (352) уже не совсем двухмерная, так как в ней присутствуют вертикальные координаты подошвы пласта  $z_0$  и др.

Схема-шаблон МКР-сетки для случая плоской фильтрации воды в водоносном (напорном или безнапорном) пласте показана на рис. 143 при  $\xi = x$ .

В моделируемом напорном или безнапорном пласте движение подземных вод происходит в вертикальной плоскости, которая разбита прямоугольной МКР-сеткой на блоки. Узлы сетки, соответствующие ячейкам Excel, приурочены к центрам тяжести блоков. Коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$  данного пласта изменяются в горизонтальном и вертикальном

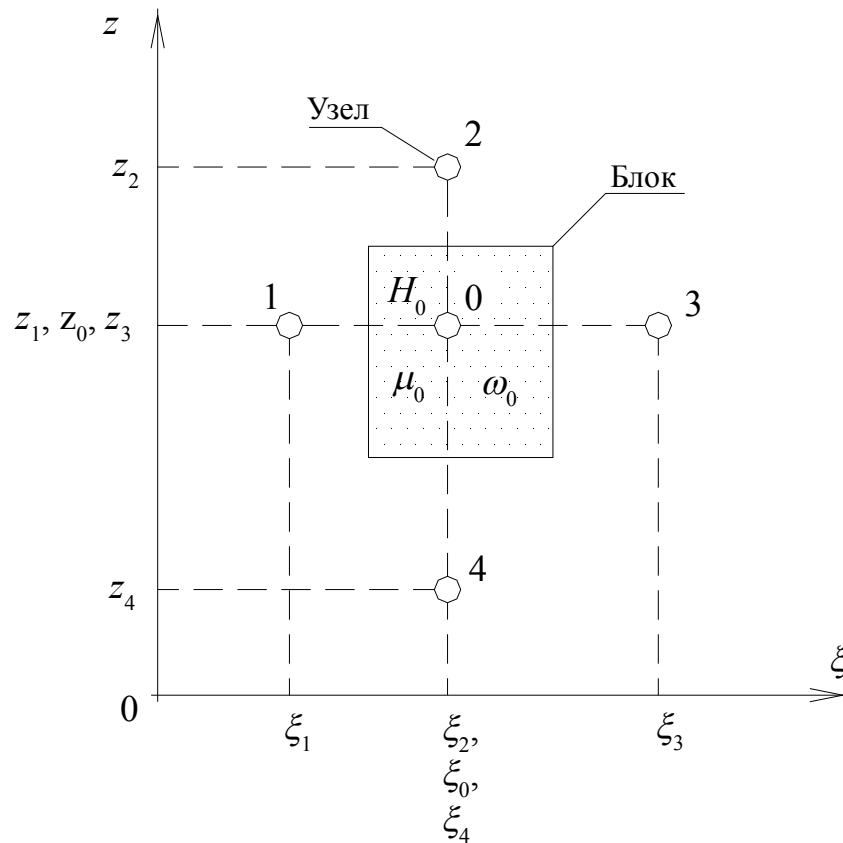


Рис. 143. Схема-шаблон обобщенной двухмерной модели фильтрации в вертикальной плоскости: плоской при  $\xi = x$ ; профилно-радиальной (осесимметричной) при  $\xi = r$

направлениях. Напоры в каждом блоке данного пласта обозначены в двух положениях:  $H^S$  и  $H^{S+1}$ , что соответствует дискретным положениям при моделировании в предыдущий и последующий моменты времени с интервалом, равным шагу времени  $Dt$ .

Как и в предыдущих формулах, учтем инфильтрацию (ГУ2) и перетекание (ГУ3), так как в пласте могут быть внутренние источники или стоки, например, трубы с утечками (граничное условие II рода — ГУ2 — задан расход), закольматированные дрены (ГУ3 — расход зависит от разности напоров). Кроме того, интенсивность инфильтрации  $\omega$  можно задать на верхнем узле сетки, моделирующем УГВ. Таким образом, как и ранее, выведем обобщенную формулу моделирования, причем заметим, что в вертикальной плоскости моделирование напорных и безнапорных задач имеет почти единую методику.

Анализ производственной деятельности изыскательских организаций [243] по определению фильтрационных параметров с помощью откачек из скважин показал, что определение коэффициента водоотдачи  $\mu$  производится обобщенно для некоторого интервала опробования  $M_0$ . Раз так, то нет смысла разделять этот коэффициент на водоотдачу гравитационную и упругую.

Вернее, это не возможно сделать корректно. Поэтому мы считаем, что при расчете и моделировании нестационарной фильтрации в двухмерных задачах в вертикальной плоскости достовернее использовать распределение коэффициента водоотдачи по интервалу опробования  $M_0$ , на котором он был определен в ходе изысканий.

Напротив, отнесение  $\mu$  только к свободной поверхности УГВ приводит к схеме жесткой фильтрации воды под УГВ [152]. Но тогда возникают искусственные погрешности и сложности:

- жесткий недеформируемый грунт при водопонижении не соответствует реальному грунту, которому свойственна осадка; поэтому по схеме жесткого грунта невозможно прогнозировать негативные последствия водопонижения;
- жесткая схема фильтрации вынуждает при моделировании прибегать к дополнительным многократным числовым итерациям для узлов под УГВ на каждом временном шаге, что на несколько порядков увеличивает затраты компьютерного времени.

Эти соображения побудили нас применять при нестационарном моделировании с помощью МКР-Excel физически реальную схему с суммарным коэффициентом водоотдачи, отнесенным к интервалу опробования  $M_0$ , вместо того, чтобы использовать жесткую схему фильтрации. Отметим, что жесткая схема фильтрации эффективна в аналитических методах решения плоских и осесимметричных задач, что было широко применено в гидродинамической постановке А.Ж. Муфтаховым при прогнозах подтопления промплощадок [156].

Уравнение баланса воды через блок МКР-сетки при плоской фильтрации (рис. 143 при  $\xi = x$ ) можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 & k_{0-1} \left( \frac{z_2 - z_4}{2} \right) \left( \frac{H_1^S - H_0^S}{x_0 - x_1} \right) + k_{0-2} \left( \frac{x_3 - x_1}{2} \right) \left( \frac{H_2^S - H_0^S}{z_2 - z_0} \right) - \\
 & - k_{0-3} \left( \frac{z_2 - z_4}{2} \right) \left( \frac{H_0^S - H_3^S}{x_3 - x_0} \right) - k_{0-4} \left( \frac{x_3 - x_1}{2} \right) \left( \frac{H_0^S - H_4^S}{z_0 - z_4} \right) + \\
 & + \frac{\omega_0 (x_3 - x_1)}{2} - \frac{k_0^* (H_0^S - H_0^H) (x_3 - x_1)}{2m_0^*} = \\
 & = \frac{\mu_0 (H_0^{S+1} - H_0^S) (x_3 - x_1) (z_2 - z_4)}{4M_0 Dt},
 \end{aligned}$$

где все обозначения оговорены выше. Отсюда получим формулу моделирования нестационарной плоской (профильно-плоской) фильтрации воды в виде

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{2M_0Dt}{\mu_0} & \left[ \frac{k_{0-1}(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{k_{0-2}(H_2^S - H_0^S)}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_4)} - \right. \\
 & \left. - \frac{k_{0-3}(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{k_{0-4}(H_0^S - H_4^S)}{(z_0 - z_4)(z_2 - z_4)} \right] + \\
 & + \frac{2\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0(z_2 - z_4)} - \frac{2k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* (z_2 - z_4)}, \quad (353)
 \end{aligned}$$

пригодном для напорных, безнапорных подземных вод и верховодки.

Схема-шаблон МКР-сетки для случая профильно-радиальной (осесимметричной) фильтрации воды в напорном или безнапорном пласте показана на рис. 143 при  $\xi = r$ . Блок МКР-сетки на этом рисунке изображен в виде прямоугольного сечения, но на самом деле это сечение цилиндрического кольца с площадью основания

$$F_k = \frac{\pi}{4} \left[ (r_3 + r_0)^2 - (r_0 + r_1)^2 \right], \quad (354)$$

где радиальные координаты узлов сетки см. рис. 143 при  $\xi = r$ .

Уравнение баланса имеет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{\pi k_{0-1}(z_2 - z_4)(H_1^S - H_0^S)}{\ln(r_0/r_1)} + k_{0-2} F_k \left( \frac{H_2^S - H_0^S}{z_2 - z_0} \right) - \\
 & - \frac{\pi k_{0-3}(z_2 - z_4)(H_0^S - H_3^S)}{\ln(r_3/r_0)} - k_{0-4} F_k \left( \frac{H_0^S - H_4^S}{z_0 - z_4} \right) + \\
 & + \omega_0 F_k - \frac{k_0^* F_k (H_0^S - H_0^H)}{m_0^*} = \\
 & = \frac{\mu_0 F_k (H_0^{S+1} - H_0^S)(z_2 - z_4)}{2M_0Dt},
 \end{aligned}$$

откуда получим формулу моделирования профильно-радиальной (осесимметричной) фильтрации воды в напорном, безнапорном пласте подземных вод или верховодке в виде

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{2M_0Dt}{\mu_0} & \left\{ \frac{\pi}{F_k} \left[ \frac{k_{0-1}(H_1^S - H_0^S)}{\ln(r_0/r_1)} - \frac{k_{0-3}(H_0^S - H_3^S)}{\ln(r_3/r_0)} \right] + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2}(H_2^S - H_0^S)}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_4)} - \frac{k_{0-4}(H_0^S - H_4^S)}{(z_0 - z_4)(z_2 - z_4)} \left. \right\} + \frac{2\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0(z_2 - z_4)} - \\
 & - \frac{2k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* (z_2 - z_4)}, \tag{355}
 \end{aligned}$$

причем при моделировании в эту формулу вместо площади  $F_k$  надо подставлять величины по выражению (354).

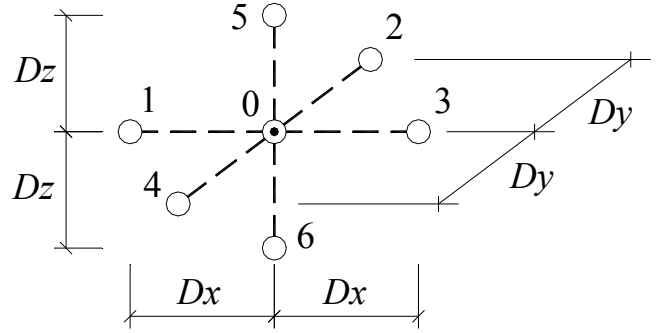
*Трехмерные формулы моделирования.* Более десяти лет назад авторы [161] писали: «В настоящее время разработка методов прогноза подтопления территорий и расчёта дренажных систем направлена в основном на решение плановых и профильных задач. Решение трёхмерных нестационарных задач не получило широкого распространения как из-за серьёзных трудностей при использовании аналитических методов, так и из-за больших затрат времени на ЭВМ ...».

Сейчас возросшее быстродействие компьютеров делает доступным моделирование сложных фильтрационных процессов. Рассмотрим трехмерную нестационарную фильтрацию в неоднородной среде.

Чтобы получить формулу моделирования для узла 0 сетки в конечных разностях применительно к трёхмерной фильтрации (рис. 144), надо составить баланс воды, проходящей через элементарный блок-параллелепипед с размерами ребер  $Dx$ ,  $Dy$  и  $Dz$ , по закону Дарси. Ход рассуждений почти такой же, как в [55], где авторы рассмотрели случай двухмерного потока. В нашем случае через элементарный объём блока МКР-сетки проходит фильтрационный поток, направление которого в общем случае не параллельно ни одной из декартовых осей координат. Введём значения коэффициентов фильтрации между соседними узлами  $k_{0-1}$ ,  $k_{0-2}$ ,  $k_{0-3}$ ,  $k_{0-4}$ ,  $k_{0-5}$ ,  $k_{0-6}$ , которые можно определить по формуле (115).



Рис. 144. Схема-шаблон  
трехмерной фильтрации



Исходное уравнение баланса воды через элементарный объем при разложении вектора потока нестационарной фильтрации по трём осям записывается в явном виде так:

$$\begin{aligned}
 & k_{0-1} Dy Dz \frac{(H_1^S - H_0^S)}{Dx} + k_{0-2} Dx Dz \frac{(H_2^S - H_0^S)}{Dy} + k_{0-5} Dx Dy \frac{(H_5^S - H_0^S)}{Dz} - \\
 & - k_{0-3} Dy Dz \frac{(H_0^S - H_3^S)}{Dx} - k_{0-4} Dx Dz \frac{(H_0^S - H_4^S)}{Dy} - k_{0-6} Dx Dy \frac{(H_0^S - H_6^S)}{Dz} + \\
 & + \omega_0 Dx Dy - \frac{k_0^*}{m_0^*} (H_0^S - H_0^H) Dx Dy = \frac{(H_0^{S+1} - H_0^S)}{Dt} Dx Dy \mu_0 \frac{Dz}{M_0},
 \end{aligned}$$

где  $H_0^{S+1}$  — искомый напор в центральном узле 0;  $H_0^S$ ,  $H_1^S$ ,  $H_2^S$ ,  $H_3^S$ ,  $H_4^S$ ,  $H_5^S$ ,  $H_6^S$  — предыдущие значения напора соответственно в узлах 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 на шаг времени  $Dt$  раньше;  $\mu_0$  — коэффициент, характеризующий ёмкостные свойства грунта (водоотдачу, недостаток насыщения или упругую ёмкость);  $\omega_0$  — коэффициент, отражающий точечный источник-сток (интенсивность инфильтрации, перетекание-отток или испарение);  $k_0^*$  — коэффициент фильтрации слабопроницаемого прослоя толщиной  $m_0^*$ , ниже которого находится водоносный пласт с напором  $H_0^H$  (перетекание). Величины  $\mu_0$  и  $\omega_0$  берутся в зависимости от типа решаемой задачи: напорный или безнапорный пласт и др. Коэффициент водоотдачи  $\mu_0$  надо брать по соответствующему интервалу опробования пласта  $M_0$ .

Формула моделирования трёхмерной нестационарной фильтрации в неоднородных грунтах получена в явном виде:

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{M_0 Dt}{\mu_0} & \left[ \frac{k_{0-1} (H_1^S - H_0^S) - k_{0-3} (H_0^S - H_3^S)}{(Dx)^2} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2} (H_2^S - H_0^S) - k_{0-4} (H_0^S - H_4^S)}{(Dy)^2} + \frac{k_{0-5} (H_5^S - H_0^S) - k_{0-6} (H_0^S - H_6^S)}{(Dz)^2} \Big] + \\
 & + \frac{\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0 Dz} - \frac{k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* Dz}.
 \end{aligned} \quad (356)$$

## § 23. Разные технологические приемы моделирования МКР-Excel

Рассмотрим полезные технологические приемы моделирования с помощью МКР-Excel, позволяющие существенно уточнить решение задач и увеличить производительность моделирования фильтрации при защите от подтопления в городском строительстве. Одни приемы известны из существующей практики аналогового и численного моделирования, другие были получены в ходе исследований автора, часть их проиллюстрирована на примерах в данной работе. Перечислим эти приемы:

- 1) моделирование водопонизительных скважин и дрен;
- 2) моделирование свободной поверхности УГВ подбором;
- 3) изобарное моделирование свободной поверхности УГВ;
- 4) комбинированное фрагментное моделирование;
- 5) моделирование по явным и неявным (метод прогонки) схемам;
- 6) моделирование с использованием OLE Automation и VBA.

При моделировании водопонизительных скважин и дрен возникает вопрос, при каком радиусе скважины  $r_c$  напор в скважине  $H_c$  или дрене тождественен напору в узле МКР-сетки  $H_0$ . Рассмотрим случай квадратной двумерной сетки (рис. 145). Ход рассуждений заимствуем из [152, с. 128-129].

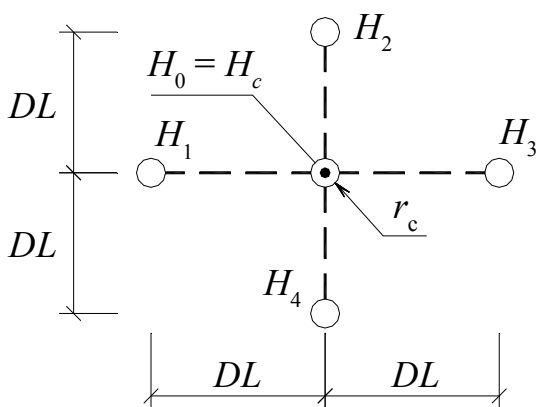


Рис. 145. К выводу  $r_c$

Предположим, в узле 0 помещена совершенная скважина радиусом  $r_c$  и напором  $H_c$  в напорном пласте мощностью  $M$  с коэффициентом фильтрации  $k$ . Скважину окружает контур питания радиусом  $DL$  с напорами в четырех точках  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  и  $H_4$ . Схема на рис. 145 относится к плановой модели. Обозначим средний напор на контуре питания как

$$H_k = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) / 4.$$

С одной стороны, дебит скважины по формуле Дюпюи

$$Q_c = \frac{2 \pi k M (H_k - H_c)}{\ln(DL/r_c)},$$

с другой стороны, сумма четырех плоскопараллельных потоков к узлу-скважине 0 от соседних квадратных блоков 1, 2, 3, 4 с соответствующими напорами  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  и  $H_4$  имеет вид

$$Q_c = kMDL \frac{H_1 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_2 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_3 - H_c}{DL} + \\ + kMDL \frac{H_4 - H_c}{DL} = 4kM(H_k - H_c).$$

Сравнивая два последних уравнения, получим критерий, при котором напор скважины (дрены)  $H_c$  на двухмерной модели с квадратной сеткой равен напору в единичном узле блока сетки  $H_0$ :

$$r_c = DL \exp(-\pi/2). \quad (357)$$

Заметим, что обычно [126, с. 46] выражение (357) используют в приближенном виде

$$r_c \approx 0,2 DL,$$

однако в Excel в этом нет необходимости и лучше использовать точную формулу (357). В некоторых случаях удобнее шаг квадратной МКР-сетки  $DL$  задавать по известному радиусу скважины  $r_c$ , обращая формулу (357).

Скважина может быть гидродинамически несовершенной, то есть оборудованной фильтром длиной  $l$  не на всю мощность пласта  $M$  (см. рис. 130). Дополнительное гидравлическое сопротивление несовершенной скважины  $\zeta$  в отечественной гидрогеологической практике принято вычислять с помощью таблиц Н.Н. Веригина [150, с. 55]. Критерий, при котором напор несовершенной скважины на двухмерной модели с квадратной МКР-сеткой равен напору в узле блока сетки, выводится аналогично и имеет вид

$$r_c = DL \exp\left(-\frac{\pi}{2} + \zeta\right). \quad (358)$$

Возможен случай, когда на модели радиус какой-либо скважины  $r_c$  не соответствует условию (357). Тогда в ячейке Excel, имитирующей эту скважину с постоянным напором  $H_c$  в напорном пласте, надо исправить напор так:

$$H_0 = \left( H_c + \alpha \sum_{i=1}^4 H_i / 4 \right) / (1 + \alpha); \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_c} - 1, \quad (359)$$

где  $H_i$  — напоры в соседних узлах квадратной МКР-сетки (см. рис. 145).

При моделировании безнапорного пласта — грунтовых вод — для скважины, работающей с постоянным напором  $H_c$ , при несоблюдении условия (357) надо исправлять напор в ячейке Excel по следующей формуле:

$$H_0 = \sqrt{\left( H_c^2 + \alpha \sum_{i=1}^4 H_i^2 / 4 \right) / (1 + \alpha)}; \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_c}. \quad (360)$$

В любом случае — при соблюдении или несоблюдении условия (357) — для скважины, работающей с постоянным напором  $H_c$ , величину расхода (дебита) скважины можно найти на модели с квадратной сеткой (см. рис. 145) по следующим соотношениям:

а) в напорном пласте

$$Q_c = 4kM \left( \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - H_0 \right); \quad (361)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$Q_c = 2k \left( \frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - H_0^2 \right). \quad (362)$$

Формулу (361) можно использовать для вычисления дебита скважины-катода за счет электроосмотической фильтрации (см. § 11) в виде

$$Q_c = 4k_3M \left( \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} - U_0 \right), \quad (363)$$

где  $k_3$  — коэффициент электроосмотической фильтрации;  $U$  с индексами — электрические потенциалы.

Когда на модели надо задать скважины с заранее известным постоянным дебитом (расходом)  $Q_c = \text{const}$ , то на радиус скважины  $r_c$  можно не обращать внимание, лишь бы он был меньше шага квадратной сетки  $DL$  вокруг скважины (см. рис. 145). Тогда напор в ячейке, моделирующей скважину, можно задать так:

а) в напорном пласте

$$H_0 = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - \frac{Q_c}{4kM}; \quad (364)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$H_0 = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - \frac{Q_c}{2k}}. \quad (365)$$

Если для таких скважин ( $Q_c = \text{const}$ ) есть необходимость вычисления меняющегося напора внутри скважины  $H_c$ , то он при несоблюдении условия (357) находится по формулам:

а) в напорном пласте

$$H_c = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - \frac{Q_c}{2\pi k M} \ln \frac{DL}{r_c}; \quad (366)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$H_c = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - \frac{Q_c}{\pi k} \ln \frac{DL}{r_c}}. \quad (367)$$

При соблюдении условия (357) значение напора в ячейке Excel и в скважине (при  $Q_c = \text{const}$ ) совпадают и соответствуют (364).

Приведенные формулы для моделирования скважин (357) – (367) при плановой фильтрации в горизонтальной плоскости пригодны для дрен на профильных моделях в вертикальной плоскости. Дополнительные соображения по моделированию скважин на МКР-сетках с неравномерным шагом приведены в [126, с. 46; 213, с. 136].

Свободная поверхность УГВ при стационарной фильтрации может быть найдена на профильной (плоской и осесимметричной) модели МКР-Excel постепенным подбором. При этом на УГВ надо добиваться наилучшего соблюдения условия совпадения напорной линии с отметкой УГВ [199]:

$$H = z, \quad (368)$$

где  $H$  — напор;  $z$  — отметка УГВ; обе величины отсчитываются от единой горизонтальной плоскости сравнения напоров 0-0. По-другому формулу (368) можно осмыслить так: на свободной поверхности УГВ пьезометрическая высота  $h_p = 0$ , избыточное давление  $p_{\text{изб}} = 0$  и полное давление равно атмосферному. Как известно из механики жидкости и газа [256], — это общее определение свободной поверхности жидкости.

Данный прием известен также из аналогового моделирования [78, с. 127]. Например, на бумажных моделях ЭГДА стационарную депрессионную поверхность находят по линии обреза бумаги, так как установившаяся кривая депрессии является линией тока. При этом можно ошибиться и обрезать бумаги больше, чем надо. Тогда нужно брать другой лист электропроводной бумаги.

Таких затрат и сложностей не существует при моделировании свободной поверхности УГВ на профильных моделях с помощью МКР-Excel. Подбор УГВ осуществляют так: надо, чтобы отметка напора совпала с высотной отметкой УГВ. Вернее, почти совпала, так как абсолютного совпадения обычно не получается вследствие дискретности МКР-модели.

В начале моделирования кривой депрессии лучше прорисовать ее предполагаемое положение прямо на модели. Это можно сделать средствами Excel

«Рисование». Например, если УГВ близок к параболе, то можно использовать для прорисовки кривой депрессии инструмент «Дуга» из основных фигур средства «Рисование». Остальные подробности моделирования УГВ рассмотрены в § 27.

Кривые депрессии при стационарной фильтрации можно моделировать другим способом — с помощью изобарного моделирования. П.Я. Полубаринова-Кочина продемонстрировала в книгах [198, с. 499; 199, с. 572] графический способ, предложенный Р.В. Соутвеллом (R.V. Southwell) в 1946 г.

Изобарное моделирование основано на факте, что давление на стационарной свободной поверхности грунтовых вод (УГВ) считается равным атмосферному. Пьезометрическая высота  $h_p$  [256, с. 28] связана с фильтрационным напором  $H$  и высотной отметкой  $z$  так:

$$h_p = H - z. \quad (369)$$

Изобарную модель МКР-Excel для стационарной фильтрации собирают из формул моделирования, в которых напоры заменены на пьезометрические высоты по (369). После расчета модели положение свободной поверхности УГВ можно найти по узлам сетки, в которых  $h_p = 0$ , то есть давление равно атмосферному. Рекомендуется изобарные линии получать с помощью нашей макропрограммы ForSurfer(). Листинг ForSurfer() приведен в прил. 2.

Комбинированное фрагментное моделирование известно из практики аналогового моделирования [79, с. 206]. В МКР-Excel целесообразно объединять фрагменты области фильтрации одно-, двух- и трехмерных моделей. Одномерное моделирование грунтовых вод малой мощности и верховодки наиболее корректно можно провести в нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску. Тогда свободные поверхности УГВ получаются довольно точными на некотором удалении от источников возмущения (дрен, скважин, очагов подтопления и т.д.). Зоны резкой деформации потоков около дрен и скважин лучше моделировать двух- и трехмерными фрагментами.

Основным методом моделирования любых задач (нестационарных и стационарных) с помощью МКР-Excel принят метод с использованием явных разностных схем, который рассмотрен достаточно подробно в нашей работе.

Моделирование нестационарных задач по неявным схемам методом прогонки с помощью МКР-Excel эффективно может быть реализовано как одномерное. К неявным схемам следует прибегать в том случае, если расчет на модели получается слишком медленный из-за мелкого шага времени  $Dt$ . Преимуществом неявных схем является отсутствие жестких ограничений на соотношения пространственных и временных шагов, а недостатком — трудность моделирования нелинейных задач [90, с. 271].

Из теории разностных схем известно, что неявные схемы эффективны для одномерных задач. Явные схемы при нестационарном моделировании

имеют преимущество перед неявными в задачах с двумя и более пространственными переменными [24, с. 199; 90, с. 391].

Книг по теории и практике метода прогонки достаточно много [20; 24; 25; 49; 59; 72; 90; 138; 152; 168; 178; 226; 228; 286]. Наиболее просто и доходчиво метод прогонки описан в [72, с. 314-319].

Как уже замечено Н.Н. Калиткиным, метод прогонки не эффективен для решения нелинейных задач [90, с. 271]. Этим методом можно решать линейные уравнения типа теплопроводности. Применительно к грунтовым водам это означает использование линеаризованных постановок уравнения Буссинеска в рамках гидравлической теории фильтрации [199], что достаточно тривиально для моделирования.

Технологическая последовательность расчета нестационарной задачи методом прогонки в динамической МКР-Excel-модели показана на рис. 146.

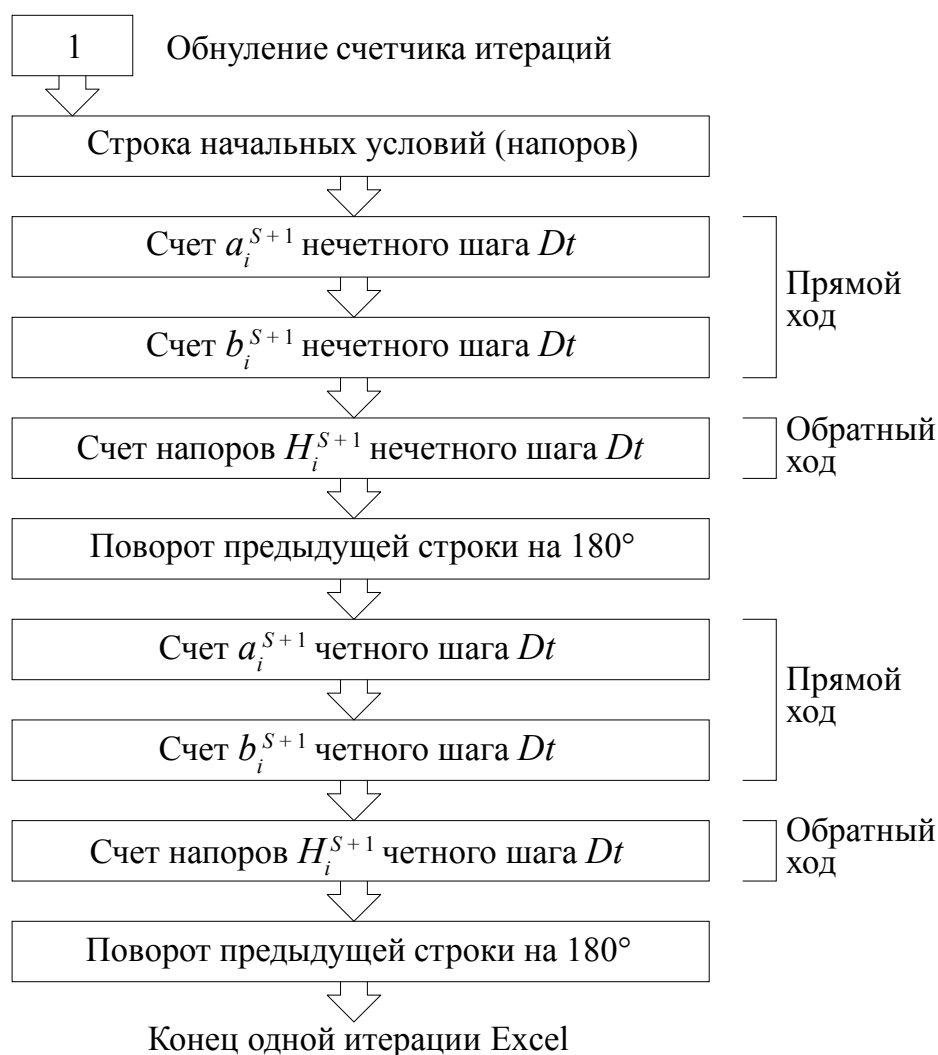


Рис. 146. Схема метода прогонки в динамической нестационарной модели МКР-Excel

### Пример 59. Метод прогонки по неявной схеме в МКР-Excel

Суть метода прогонки по неявной схеме с помощью МКР-Excel поясним на примере моделирования двухлинейного совершенного дренажа в линеаризованной постановке по I способу Буссинеска (рис. 147). Водоупор имеет небольшой уклон. Средняя мощность водоносного пласта при работе дренажа  $h_c = 3$  м. Напоры отсчитываем от оси  $x$  (горизонтальной плоскости 0–0). Естественные напоры грунтовых вод: слева на линии дренажа  $H_{LE} = 7$  м, справа  $H_{RE} = 8$  м. Напор в дренах: слева  $H_{LD} = 3$  м, справа  $H_{RD} = 4$  м. Коэффициент фильтрации грунта  $k = 1,2$  м/сут, коэффициент водоотдачи  $\mu = 0,05$ . Расстояние между дренами  $2L = 50$  м. Начальное распределение напоров в пласте подчиняется линейной закономерности равномерного потока на наклонном водоупоре в виде

$$H = H_{LE} + (H_{RE} - H_{LE}) x / (2L). \quad (370)$$

Естественная мощность грунтовых вод  $h_e = 4$  м. Понижение УГВ в дренах одинаковое:  $S_D = H_{LE} - H_{LD} = H_{RE} - H_{RD} = 4$  м. Требуется найти распределение напоров между дренами через двое суток работы дренажа, то есть в расчетное время от начала работы дренажа  $t = 2$  сут.

Проверим критерии С.Ф. Аверьянова и А.Ж. Муфтахова соответственно для применимости принципа суперпозиции и гидравлической теории фильтрации. Отношение  $S_D/h_e = 4/4 = 1$  (100 %), поэтому по С.Ф. Аверьянову принцип суперпозиции (сложение течений) нельзя применять. Отношение  $S_D/L = 4/25 = 0,16$  (16 %), поэтому по А.Ж. Муфтахову данную задачу нельзя решать с помощью упрощенной гидравлической теории фильтрации. Тем не менее в иллюстративных целях промоделируем эту задачу именно с использованием принципа суперпозиции и в гидравлической постановке по Буссинеску, то есть с нарушением указанных критериев.

Схему для моделирования в конечных разностях представим в виде (рис. 148). Модель имеет одиннадцать узлов сетки (на рис. 148 показано условно меньше). Пространственный шаг принят равномерный  $Dx = 5$  м, всего десять шагов.

Уравнение баланса воды по неявной схеме имеет вид

$$kh_c \frac{H_{i-1}^{S+1} - H_i^{S+1}}{Dx} - kh_c \frac{H_i^{S+1} - H_{i+1}^{S+1}}{Dx} = \mu Dx \frac{H_i^{S+1} - H_i^S}{Dt},$$

где  $H_i^{S+1}$  — нестационарный напор грунтовых вод при работе дренажа в  $i$ -узле сетки в последующий момент времени  $S+1$ ;  $S$  — предыдущий момент времени;  $Dt$  — шаг времени между этими моментами; остальные обозначения оговорены выше.

Вычислим уровнепроводность грунтовых вод

$$a = kh_c / \mu = 1,2 \cdot 3 / 0,05 = 72 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Перепишем уравнение баланса в виде

$$C(H_{i-1}^{S+1} - 2H_i^{S+1} + H_{i+1}^{S+1}) - H_i^{S+1} = -H_i^S; \quad C = (Dx)^2 / (aDt). \quad (371)$$

Запишем напор в узле  $i-1$  через напор в узле  $i$ , расположенном правее, в виде

$$H_{i-1}^{S+1} = a_{i-1}^{S+1} (b_{i-1}^{S+1} + H_i^{S+1}),$$



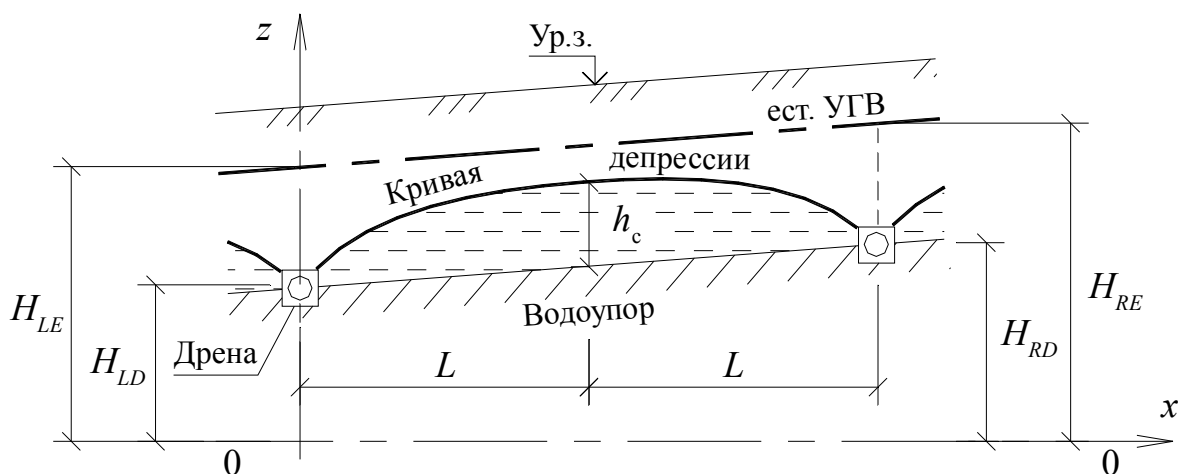


Рис. 147. Схема к моделированию двухлинейного дренажа методом прогонки

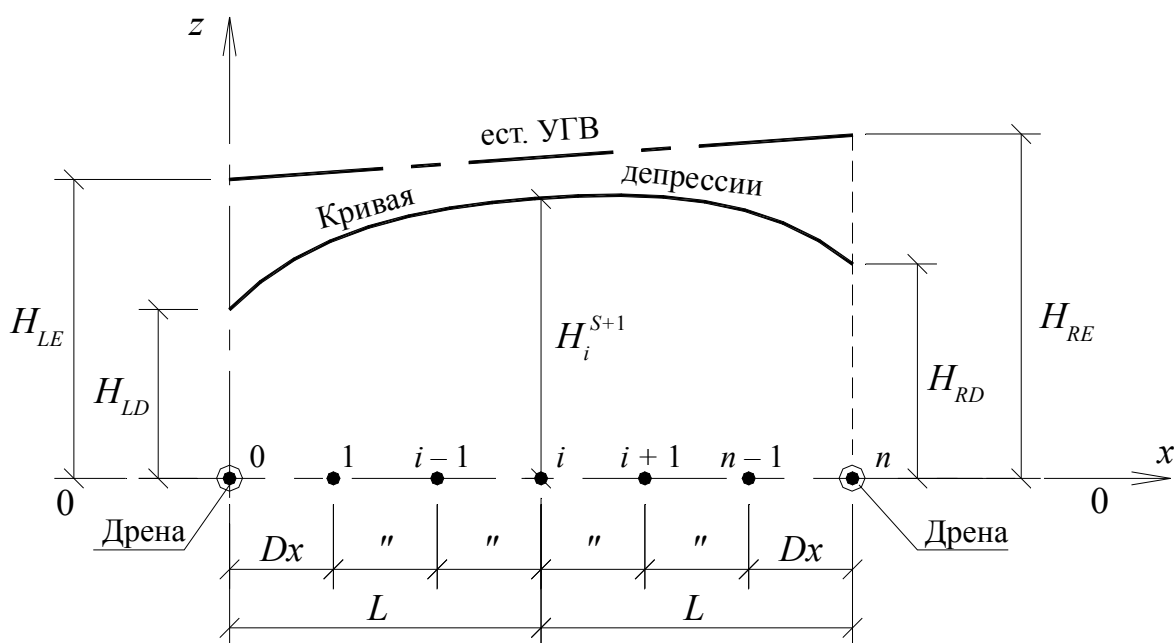


Рис. 148. Разбиение МКР-сетки для двухлинейного дренажа (неявная схема)

где  $a_{i-1}^{S+1}$  и  $b_{i-1}^{S+1}$  — прогоночные коэффициенты, подлежащие определению.

Запишем напор в узле  $i$  через напор в узле  $i+1$ , расположенном правее, в виде

$$H_i^{S+1} = a_i^{S+1} (b_i^{S+1} + H_{i+1}^{S+1}), \quad (372)$$

где  $a_i^{S+1}$  и  $b_i^{S+1}$  — прогоночные коэффициенты, также подлежащие определению.

Из последних трех уравнений выразим два прогоночных коэффициента для счета «прямой ход», то есть в направлении слева направо, в виде

$$\begin{aligned} a_i^{S+1} &= 1/(2 + C - a_{i-1}^{S+1}); \\ b_i^{S+1} &= a_{i-1}^{S+1} b_{i-1}^{S+1} + C H_i^S. \end{aligned} \quad (373)$$

Заметим, что в последних двух формулах прогоночные коэффициенты определяются через значения коэффициентов и напоров из узлов сетки, расположенных левее.

В Excel счет строк идет слева направо (см. § 19), то есть удобен для расчета прогоночных коэффициентов. Формулы для первых прогоночных коэффициентов в узле 1 (см. рис. 148) выводятся аналогично и имеют вид

$$\begin{aligned} a_1^{S+1} &= 1/(2 + C); \\ b_1^{S+1} &= H_{LD} + C H_1^S. \end{aligned} \quad (374)$$

Общий алгоритм расчета модели МКР-Excel с помощью прогонки представлен на рис. 146. Результаты сравнительного моделирования нестационарной фильтрации грунтовых вод в двухлинейный дренаж с линеаризованной постановкой задачи по I способу представлены на рис. 149. Шаг времени  $Dt = 0,2$  сут принят больше максимально возможного для модели по явной схеме  $Dt_{\max} = 0,174$  сут. Сравнение неявной модели (метод прогонки) и модели по явной схеме наглядно показывает, что при неявных схемах нет жестких ограничений на соотношение пространственных и временных шагов. На момент времени  $t = 2$  сут между дренами при  $x = 25$  м на модели с прогонкой напор  $H = 6,392$  м в ячейке Excel G13. На модели по явной схеме в этой точке  $H = 17,823$  м, что нереально, так как напор при дренировании пласта не может увеличиваться, а лишь уменьшается. На модели по явной схеме происходит неустойчивый счет, так как нарушен критерий устойчивости (329), по которому шаг времени  $Dt$  не может превышать максимально возможного

$$Dt_{\max} = \frac{(Dx)^2}{2a} = \frac{5^2}{2 \cdot 72} = 0,1736 \text{ сут.}$$

В то же время модель с явной схемой собрана совершенно правильно. Стоит шаг времени принять  $Dt = Dt_{\max} = 0,1736$  сут, и результаты моделей с явной и неявной схемами практически совпадут с разбросом значений меньше 5 %. Предлагаем проверить это самостоятельно.

Напор между дренами при  $x = 25$  м в момент времени  $t = 2$  сут можно определить по аналитической зависимости

$$H = H_{LD} + (H_{RD} - H_{LD})x/(2L) + S_D F_{26},$$

где  $F_{26}$  — функция по графику рис. 20 из справочного пособия к СНиП [208, с. 68], которая находится в зависимости от аргументов:

$$\bar{x} = x/L = 25/25 = 1; \quad fo = at/L^2 = 72 \cdot 2/25^2 = 0,23; \quad F_{26} = 0,72.$$

Тогда напор на междренье, найденный аналитически,

$$H = 3 + (4 - 3)25/(2 \cdot 25) + 4 \cdot 0,72 = 6,38 \text{ м,}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	$k$	$h_c$	$\mu$	$D_x$	$D_t$	$a$	$C$	$D_{tmax}$	$HLE$	$HRE$	$HLD$	$HRD$
2	1,2	3	0,05	5	0,25	72	1,389	0,174	7	8	3	4
3	Обнуление											
	Неявный метод прогонки:											
4	5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	4	3	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	4
6	$a$		0,295	0,323	0,326	0,327	0,327	0,327	0,327	0,327	0,327	
7	$b$		8,860	9,925	11,599	12,862	13,594	13,795	13,451	12,537	11,065	
8	$H$	4	4,919	5,700	6,254	6,547	6,577	6,347	5,854	5,100	4,119	3
9	Неч. $D_t$	3	4,119	5,100	5,854	6,347	6,577	6,547	6,254	5,700	4,919	4
10	$a$		0,295	0,323	0,326	0,327	0,327	0,327	0,327	0,327	0,327	
11	$b$		8,721	9,657	11,252	12,485	13,211	13,407	13,064	12,183	10,811	
12	$H$	4	4,836	5,558	6,081	6,364	6,392	6,164	5,681	4,958	4,036	3
13	Чет. $D_t$	3	4,036	4,958	5,681	6,164	6,392	6,364	6,081	5,558	4,836	4
14	Прошло времени по нечет. шагам, $\Sigma$ :							1,750				
15	Прошло времени по четным шагам, $\Sigma$ :							2,000				
16	Явный метод:											
17	Неч. $D_t$	3	-0,374	11,974	-1,493	12,537	0,850	12,737	-1,093	12,574	0,426	4
18	Чет. $D_t$	3	10,946	-6,613	18,305	-5,979	17,823	-5,779	18,705	-6,013	11,746	4

Рис. 149. Сравнительные результаты моделирования двухлинейного дренажа с помощью МКР-Excel: неявным методом прогонки и явным методом

что практически совпало с напором на междренье, найденным на модели методом прогонки,  $H = 6,392$  м. Отметим, что и в модели, и в аналитической зависимости использована идеализированная исходная постановка гидравлической теории фильтрации с линеаризацией по I способу Буссинеска.

Поясним по рис. 149, как собрана модель МКР-Excel по неявной схеме методом прогонки. На рисунке изображена таблица Excel 97. Вверху в диапазоне ячеек A1:L2 расположена таблица с именами (об использовании имен см. пример 56).

В диапазоне A4:L15 размещена динамическая модель, использующая метод прогонки. Еще ниже, в диапазоне A17:L18, для сравнения собрана другая динамическая модель по явной схеме (технология сборки аналогична модели в примере 58). Рассмотрим подробнее модель с прогонкой.

Эта модель на рис. 149 полностью соответствует общей технологической схеме прогонки, изображенной на рис. 146. В 5-й строке от В до L внесено начальное распределение напоров в пласте, соответствующее закономерности (370), за исключением точек на линии дрен, где заданы постоянные напоры в дренах.

В 6-й строке введены формулы (373)–(374) по вычислению прогоночных коэффициентов  $a$  для нечетного шага времени  $Dt$ . Например, в ячейке С6 введено

$$=1/(2+C)$$

где  $C$  — имя константы по формуле (371), численные значения которой находятся в ячейке G2.

В 7-й строке при вычислении коэффициентов  $b$  использована логическая функция Excel ЕСЛИ(;;). Например, в ячейку С7 введена формула

$$=ЕСЛИ(\$A\$5=1;HLD+C*C5;HLD+C*C13)$$

а в ячейку D7 — формула:

$$=ЕСЛИ(\$A\$5=1;C6*C7+C*D5; C6*C7+C*D13)$$

Подробнее о функции ЕСЛИ(;;) см. в примере 58, а также надо использовать какое-либо хорошее руководство пользователя по Microsoft Excel.

В 8-й строке вычисляются напоры в пласте, соответствующие нечетному шагу времени  $Dt$ , по формуле (372). Например, в ячейке C8 надо набрать

$$=K6*(K7+B8)$$

Отметим необычность этой формулы. Дело в том, что по (372) кажется на первый взгляд, что для ячейки C8 следует дать ссылки не на K6 и K7, а на вышележащие ячейки C6 и C7, так как формально у них одинаковый индекс  $i$  в формуле (372) при прогоночных коэффициентах  $a$  и  $b$ . Обратим также внимание, что напор в ячейке C8 должен вычисляться через напор ячейки той же строки, но расположенной правее, так как у нее индекс  $i+1$ . В приведенной же формуле ссылка на напор записана на ячейку B8. Это тоже не случайно.

В данном случае мы реализуем «обратный» ход счета (см. рис. 146). Мы не можем менять направление счета строки в Excel, счет всегда идет слева направо. Но мы можем манипулировать со ссылками на ячейки и с расположением данных в ячейках. Проще всего это реализовать с помощью манипулятора «мышь» (в дальнейшем без кавычек).

Представим, что Excel все-таки может считать строку справа налево. Введем в ячейку L8 напор в правой дрене (имя):

$$=HRD$$

Эта ячейка пронумерована как  $n$  (см. рис. 148). Введем в соседнюю слева ячейку с индексом  $n-1$  (см. рис. 148) формулу (372) так, если бы пересчет в строке был бы справа налево, то есть в ячейку K8 в виде

$$=K6*(K7+L8)$$

Выделим и перетащим мышью ячейку L8 на место ячейки B8, а ячейку K8 перетащим на место ячейки C8. В результате в ячейке C8 формула станет такой:

$$=K6*(K7+B8)$$

Заметим, что мы не набирали эту формулу, а просто произвели несложные манипуляции с помощью мыши. Теперь при обычном счете строки слева направо ячейка C8, соответствующая узлу  $n-1$  (см. рис. 148), будет рассчитываться «обратным» ходом, как и положено по формуле (372) в соответствии с технологией метода прогонки (см. рис. 146). Таким же способом меняем местами все ячейки 8-й строки.

Правильность ссылок в ячейках «обратного» хода 8-й строки можно проверить с помощью меню Excel СЕРВИС / ЗАВИСИМОСТИ / ВЛИЯЮЩИЕ ЯЧЕЙКИ.

В 9-й строке напоры из предыдущей 8-й строки надо расставить на место как положено. Это легко реализуется простыми ссылками. Например, напор в ячейке K8 должен стать на свое место в ячейку C9, для чего в C9 наберем формулу

$$=K8$$

и точно так же проставим другие ячейки. Не забудем вернуть на свои места граничные условия: напор в левой и правой дрене в ячейках соответственно B9 и L9 (см. рис. 149).

Сборка второй половины модели по четному шагу времени  $Dt$  от 10-й до 13-й строки выполняется совершенно аналогично. В 14-й и 15-й строках организованы счетчики (индикаторы) времени. Подробности по их созданию см. пример 58.

## **Практика моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel**

Данная глава содержит методику расширенного применения МКР-Excel для моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве. Большинство задач относятся к гидрогеологическому моделированию, так как основным моделируемым процессом является движение подземных вод. Сопутствующими физическими процессами, рассмотренными в данной главе, являются фильтрационная консолидация грунта и электроосмотическая фильтрация воды.

Разновидности моделирования при защите от подтопления можно перечислить следующие:

- 1) схематизационное моделирование;
- 2) моделирование обратных задач;
- 3) моделирование изменения проницаемости грунта под застройкой;
- 4) моделирование верховодки, подпора УПВ и куполов грунтовых вод;
- 5) моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа;
- 6) моделирование разных защитных мероприятий (от локальных до общегородских).

В этом порядке построены параграфы данной главы.

Более компактная классификация моделирования фильтрации дана И.К. Гавич [50], согласно которой решаются прямые и обратные задачи. В нашей работе в основном представлены прямые задачи моделирования, в которых целью является определение напоров, уровней и расходов подземных вод. Обратные задачи кратко рассмотрены в § 25.

### *§ 24. Схематизационное моделирование фильтрации*

В начале моделирования подтопления и (или) дренирования необходимо схематизировать природные и техногенные условия. Целью является разработка схемы области фильтрации, которая адекватно отражала бы реальные процессы фильтрации подземных вод, происходящие на объекте городского строительства. В то же время, если это допустимо, приходится делать компромиссы: уменьшать мерность задачи, отбрасывать некоторые несущественные влияния, спрямлять границы области фильтрации, осреднять фильтрационные характеристики грунтов и искусственных материалов, разбивать область фильтрации на фрагменты, использовать понятие абсолютного водоупора, принимать его поверхность за горизонтальную, не принимать во внимание инфильтрацию влаги, пренебрегать влиянием удаленных границ и т.д.

В первую очередь, для схематизации области фильтрации надо использовать известные теоретические и эмпирические критерии, которые перечислены в § 13.

В сложных случаях приходится прибегать к схематизационному моделированию, которое можно провести с помощью МКР-Excel. Мы вводим новый термин «схематизационное моделирование», хотя это понятие известно из практики производственного моделирования как «модельная аппроксимация природных условий» [213]. В понятие схематизационного моделирования мы вкладываем модельную аппроксимацию не только природных, но и техногенных условий в городском строительстве.

Схематизации в области фильтрации подлежат (см. подробнее в § 13):

- 1) геометрия (в плане и разрезе);
- 2) фильтрационные параметры ( $k$ ,  $\mu$ );
- 3) инфильтрационное питание  $\omega$  с испарением  $\varepsilon$ ;
- 4) гидродинамика (возможность линеаризации и суперпозиции);
- 5) краевые условия (ГУ1–ГУ4, начальные условия).

Геометрия области фильтрации зависит от масштаба рассмотрения процесса фильтрации и фильтрационных параметров, главным образом, от величин коэффициентов фильтрации грунтов.

Крупные объекты (городские районы, микрорайоны) обычно моделируют на плановых моделях [213]. Локальные объекты — котлованы и траншеи с водоотливом и водопонижением, отдельные здания и сооружения с дренажем — могут быть промоделированы как на плановых, так и на профильных моделях, не отвергая одномерные модели по горизонтали. И.С. Пашковский и А.М. Сойфер в ходе гидрогеологических исследований на орошаемых территориях [316] предложили вначале решать региональные задачи, а затем на их основе — локальные.

Моделирование региональных задач имеет значение для городов, расположенных на хорошо проницаемых грунтах. Например, оно актуально для многих городов европейской части России [163; 164]. Здесь достаточно традиционными задачами являются прогнозы подпора УГВ от действия рек и водохранилищ. Впервые в России нестационарный подпор от водохранилищ стал моделировать с помощью метода конечных разностей Г.Н. Каменский [91].

Региональный подход теряет смысл в условиях слабопроницаемых грунтов и малых мощностей грунтовых вод. Зоны и радиусы влияния водопонижительных и дренажных систем, а также языки подтопления невелики. Они могут измеряться всего лишь несколькими десятками метров. Поэтому в условиях слабопроницаемых грунтов основным является моделирование локальных задач, причем чаще всего нелинеаризованных и без использования принципа суперпозиции.

Городская застройка еще более усложняет моделирование фильтрации подземных вод. Здания и сооружения создают искусственные зоны неоднородностей (по проницаемости) в толще грунтов оснований. С одной стороны, грунты локально уплотняются и их проницаемость уменьшается. С другой — разнообразные траншеи и котлованы с применением песчаных и щебеночных постелей и подсыпок создают зоны повышенной проницаемости. Поэтому при проектировании мероприятий по защите от подтопления (водоотлива, водопонижения и дренажа) в городском строительстве нужно проработать не только природные геологические и климатические исходные данные, но и изучить техногенные условия рассматриваемой площадки: планировку зданий, сооружений и сетей, расположение их подземных частей и фундаментов по глубине геологического разреза и т.д.

В ходе оценочного изучения геометрии площадки, фильтрационных параметров грунтов и инфильтрационного питания с испарением рекомендуется использовать методический материал § 2, 13 и 15. Технология схематизационного моделирования входит составной частью в общую технологию прогнозирования подтопления и дренирования (см. рис. 49 и 50). Основываясь на изложенном материале по технологии МКР-Excel с примерами (см. гл. 4), в каждом конкретном случае можно провести схематизационное моделирование, которое очень тесно переплетается с моделированием обратных фильтрационных задач.

Схематизационную работу с областью фильтрации удобно проводить при совместном использовании известных компьютерных пакетов Excel 97, Surfer 6.04 и AutoCAD 14 или более поздних версий. Это позволяет существенно уменьшить расход бумаги и промежуточные рутинные расчеты по разбивке размеров модели. Последовательность работы можно принять следующую:

- 1) в Excel подготовить матрицы с абсолютными отметками земли, водоупора и естественного УПВ по отдельным известным точкам, проинтерполировать отметки;
- 2) построить в Surfer карты горизонталей абсолютных отметок земли, водоупора и естественного УПВ с помощью VBA-макропрограммы ForSurfer (см. прил. 2), экспортировать эти карты в формате файлов в AutoCAD с расширением файла dxf (этот пункт факультативный);
- 3) открыть в AutoCAD упомянутые карты в формате dxf и совместить с изображениями зданий в отдельных видовых слоях (этот пункт тоже факультативный);
- 4) заготовить в AutoCAD разбивочную конечно-разностную сетку на плане, совместить ее в отдельном слое с чертежами зданий и сооружений;
- 5) в Excel, пользуясь сеткой из AutoCAD с контурами зданий и сооружений, заготовить матрицу фильтрационных параметров (коэффициен-

тов фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$ ), при необходимости проинтерполировать их (этот пункт факультативный);

- б) в Excel, аналогично предыдущему пункту, заготовить матрицу (или матрицы) инфильтрационного питания, испарения с УГВ и глубинного питания (перетекания). В величину инфильтрационного питания можно включить утечки из водонесущих коммуникаций.

Возможность линеаризации и применения суперпозиции для фильтрационных моделей необходимо проверять с учетом § 13. То же относится к крайним (граничным и начальным) условиям. При этом надо помнить, что модель позволяет в меньшей степени упрощать условия области фильтрации, меньше ее схематизировать.

После проделанной работы нужно собирать модель и вводить формулы моделирования, но это уже выходит за рамки данного параграфа о схематизации области фильтрации для моделей МКР-Excel. Проиллюстрируем перечисленные пункты схематизационной работы.

#### Пример 60. Схематизация области фильтрации для моделирования

Разработаем фильтрационную схему корпусов СибАДИ (г. Омск) с целью прогнозного моделирования подтопления с помощью МКР-Excel. Генплан СибАДИ показан на рис. 150. Здесь, кроме зданий, показаны линии-горизонтали абсолютных отметок земли. Они построены с помощью компьютерных пакетов Excel и Surfer и вставлены в многослойный чертеж AutoCAD версии 14.

Рассматриваемый участок застройки имеет размеры в плане  $260 \times 240 \text{ м}^2$  в форме прямоугольника (см. рис. 150). Средний уклон рельефа  $0,025$  направлен с севера на юг в сторону реки Иртыша. В геологическом разрезе сверху залегают четвертичные осадочные отложения — супеси мощностью  $4 \text{ м}$ , с коэффициентами фильтрации  $k = 1 \text{ м/сут}$  и водоотдачи (недостатком насыщения)  $\mu = 0,05$ . Ниже расположены водоупорные неогеновые глины, уклон водоупора повторяет уклон рельефа дневной поверхности. Грунтовые воды приурочены к супесям, в естественном залегании имеют среднюю мощность  $h_e = 1,5 \text{ м}$  и двигаются в сторону естественной дрены — Иртыша. Здания построены на ленточных фундаментах с глубиной заложения  $2,5 \text{ м}$  от поверхности земли. Контуры рассматриваемого участка образованы дорогами с проложенными под ними коллекторами канализации на глубине около  $2,5 \text{ м}$ , что создает в гидрогеологическом отношении границы с постоянным напором в грунтовых водах. Требуется определить с помощью прогнозного моделирования влияние застройки на поток грунтовых вод (стационарная задача).

Так как размеры площадки в плане значительно превосходят мощность грунтовых вод, то фильтрация воды происходит преимущественно в горизонтальной плоскости. Следовательно, разработке подлежит модель плановой фильтрации: двухмерная в горизонтальной плоскости с декартовой системой координат  $x$  и  $y$  (см. рис. 150). Уровень грунтовых вод (УГВ) может подняться до поверхности земли, то есть с максимальным приращением (повышением)  $\Delta h = 2,5 \text{ м}$ . Так как отношение  $\Delta h/h_e = 1,67$  значительно больше величины  $0,1 \dots 0,25$ , то с учетом критериев (102) и (103) в § 13 для описания



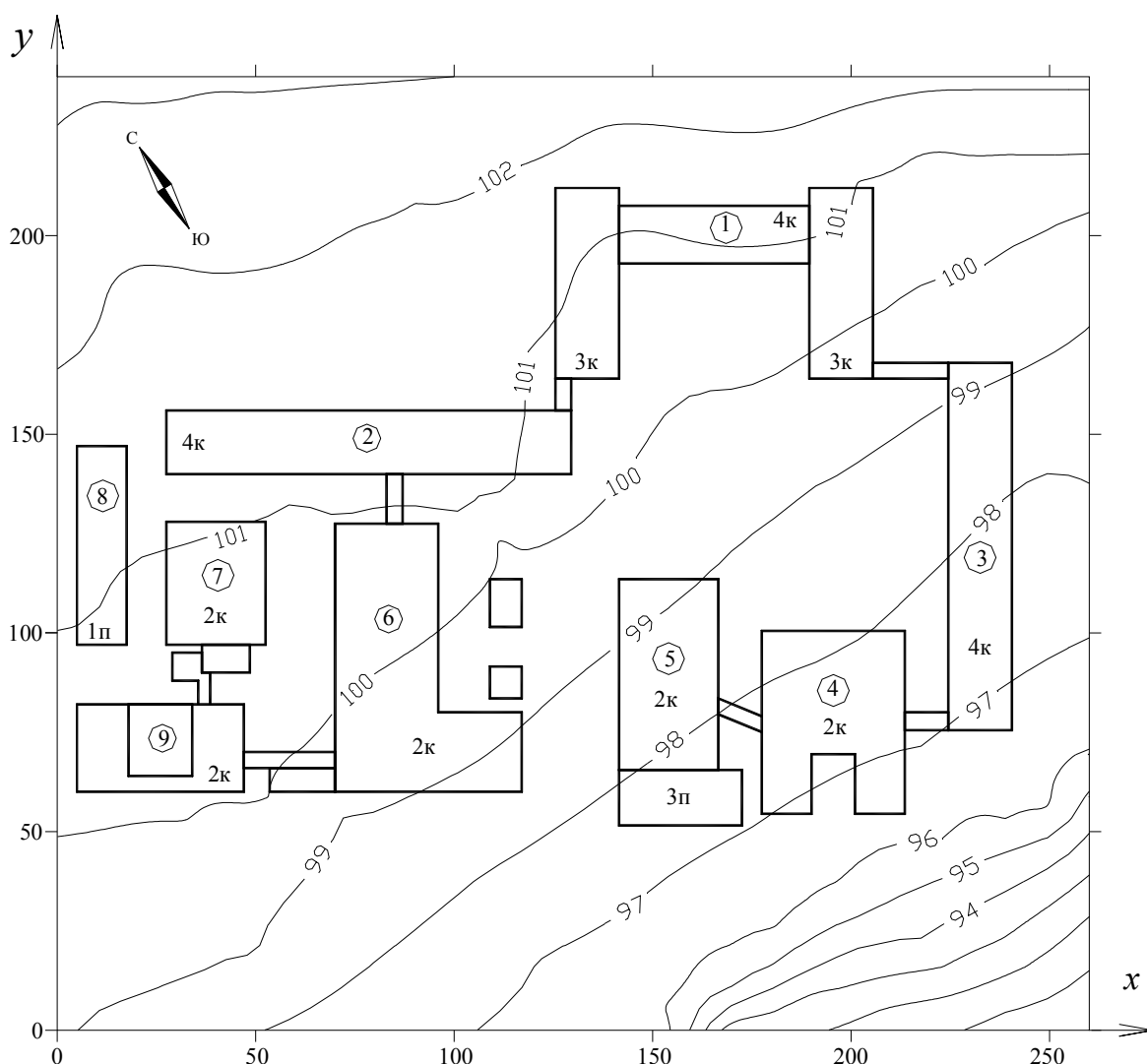


Рис. 150. Схематический генплан СиБАДИ: 1 — учебный корпус № 1; 2 — то же № 2; 3 — то же № 3; 4 — поточные аудитории; 5 — лабораторный корпус; 6 — грунтовый канал; 7 — учебный корпус; 8 — гаражи; 9 — столовая. Обозначено, например, 4к — 4-этажное здание со стенами из кирпича

движения грунтовых вод нельзя применять линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации. Поэтому данную задачу можно моделировать в рамках гипотезы Буссинеска (нелинейной гидравлической теории) без линеаризации.

Под зданиями коэффициент фильтрации супеси  $k$  уменьшится до  $k_* = 0,5 \text{ м/сут}$ , то есть в два раза. Такое уменьшение проницаемости грунта принято с учетом расчетов, приведенных в примере 51. Следовательно, здания надо моделировать как участки плановой неоднородности с пониженной проницаемостью.

Наименьший размер здания в плане — переходы между корпусами — 4,5 м. С учетом этого принят шаг конечно-разностной сетки одинаковый по обеим декартовым координатам:

$$Dx = Dy = DL = 5 \text{ м.}$$

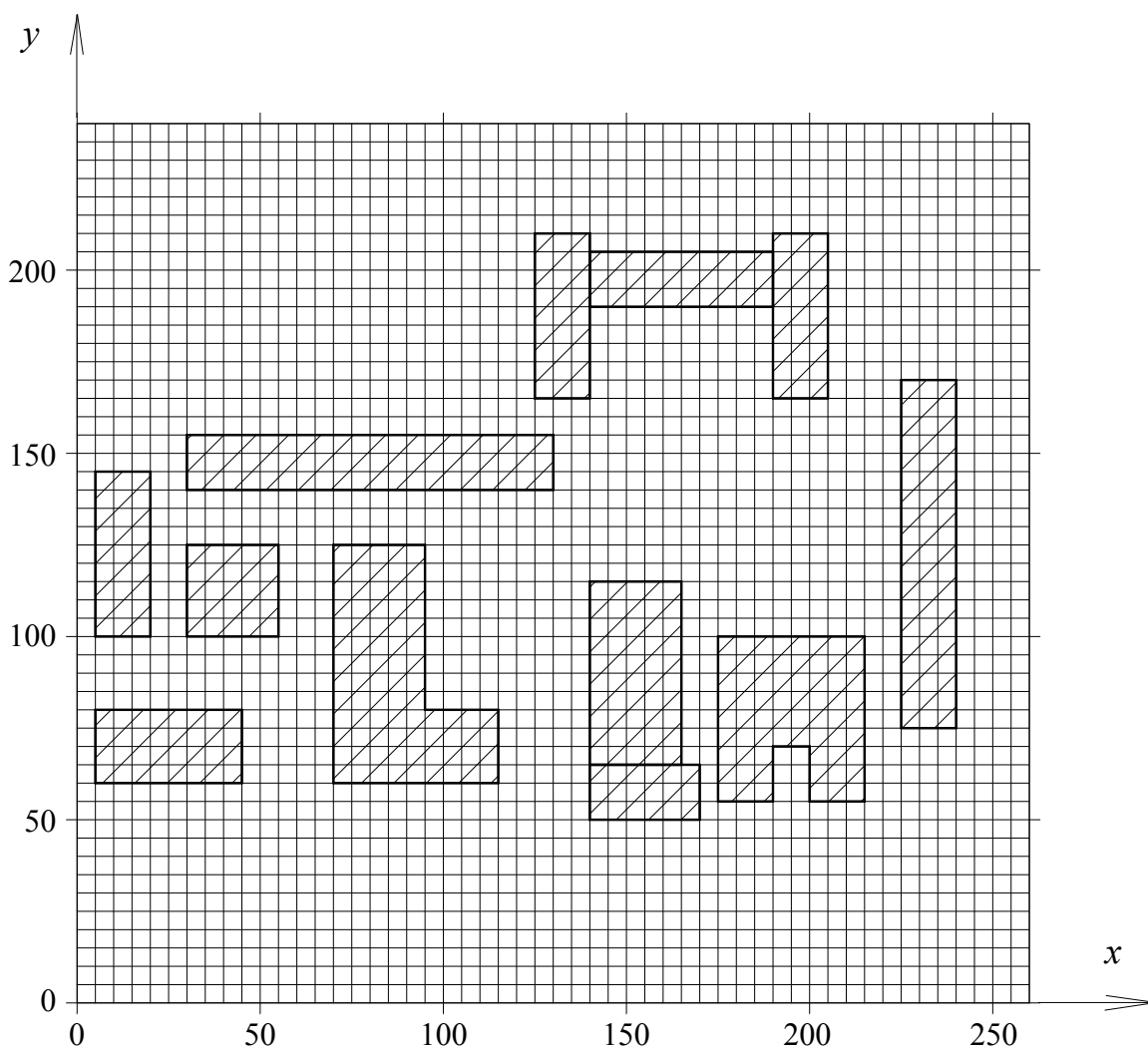


Рис. 151. Вписывание зданий в МКР-сетку

На основе такого пространственного шага изучаемая площадка в плане покрыта квадратной МКР-сеткой с размером стороны 5 м, где каждое пересечение сетки — это узел и соответственно ячейка электронной таблицы Excel. Здания аппроксимированы вписыванием их плановых контуров по линиям МКР-сетки (рис. 151). При этом были отброшены из рассмотрения мелкие одноэтажные здания и переходы между корпусами, практически не влияющие на поток грунтовых вод.

Инфильтрационное питание и испарение с поверхности грунтовых вод в данной модели не рассматривалось. Тем не менее следует заметить, что в условиях г. Омска, расположенного в климатической зоне неустойчивого увлажнения (см. рис. 70), с жарким и сухим летом, испаряемость достаточно высока (см. пример 7). Поэтому она влияет летом на постепенный спад УГВ от отметок весеннего максимума (см. рис. 6). Дифференцированный учет модуля питания грунтовых вод может быть осуществлен по приближенной методике § 2. В рассматриваемой модели (см. рис. 151) был изучен чисто барражный эффект подземных частей зданий корпусов СибАДИ.

На этом работа по схематизации области фильтрации площадки СибАДИ завершена. Продолжение моделирования данной задачи (прогнозное моделирование) см. в примере 64.

## § 25. Моделирование обратных фильтрационных задач

Моделирование обратных задач в гидрогеологии городов классифицируем по И.К. Гавич [49, с. 118]:

- граничные задачи;
- инверсные задачи;
- индуктивные задачи.

С помощью граничных задач определяют неизвестные граничные условия. Например, зная подъем УГВ за определенный промежуток времени, определяют интенсивность инфильтрации  $\omega$ , м/сут. Кроме того, должны быть известны коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$ , а также средняя мощность  $h_c$  грунтовых вод. Обратим внимание, что использование параметра средней мощности предполагает линеаризованную постановку исходных уравнений фильтрации. Следовательно, при образовании нового техногенного горизонта грунтовых вод на водоупоре возникает нелинейная постановка, и величина  $h_c$  становится неопределенной, вернее, непостоянной во времени.

Инверсные задачи предназначены для определения фильтрационных параметров: коэффициентов фильтрации  $k$  и водоотдачи (или недостатка насыщения)  $\mu$ . Известными величинами являются напоры, уровни, а иногда и расходы подземных вод, то есть то, что, напротив, подлежит определению в прямых задачах.

Целью индуктивных задач является уточнение или получение новых математических зависимостей, описывающих какой-либо процесс фильтрации.

При решении обратных задач мы так же, как А.Н. Тихонов и В.Я. Арсенин [285, с. 7], рекомендуем использовать детерминированный подход. Соображения по этому поводу уже высказаны во введении и § 18. Рекомендуется метод подбора [285, с. 38] с помощью МКР-Excel, который продемонстрирован в следующем примере.

### Пример 61. Моделирование обратной инверсной задачи

Рассмотрим, как по скорости подтопления заглубленного помещения можно определить коэффициент фильтрации  $k$  и недостаток насыщения грунта  $\mu$ . Данный пример основан на реальных фактах, произошедших при подтоплении коллективного овощехранилища на территории Омского государственного аграрного университета (ОмГАУ) в ноябре 2000 г. вследствие утечки горячей воды из теплотрассы.

План траншеи с теплотрассой и овощехранилища показан на рис. 152. Вертикальный разрез приведен на рис. 153. Теплотрасса была построена на несколько лет позднее, чем овощехранилище. Подающий и обратный трубопроводы теплосети обозначены соответственно как Т1 и Т2. Рассмотрена траншея шириной 2 м и длиной 20 м, так как именно в этом месте ее периодически раскапывают для ремонта труб, примерно один раз в пять

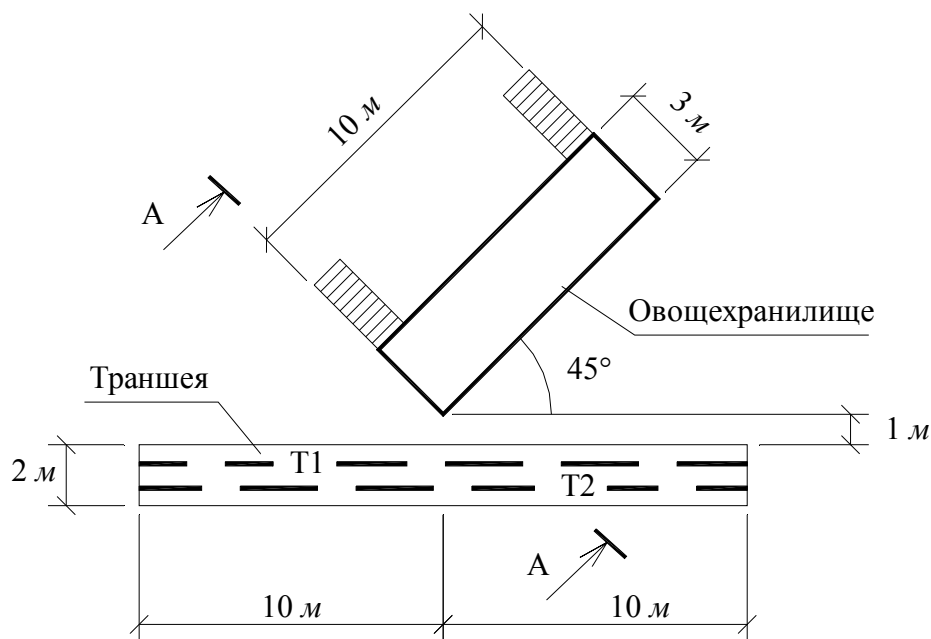


Рис. 152. План траншеи и овощехранилища

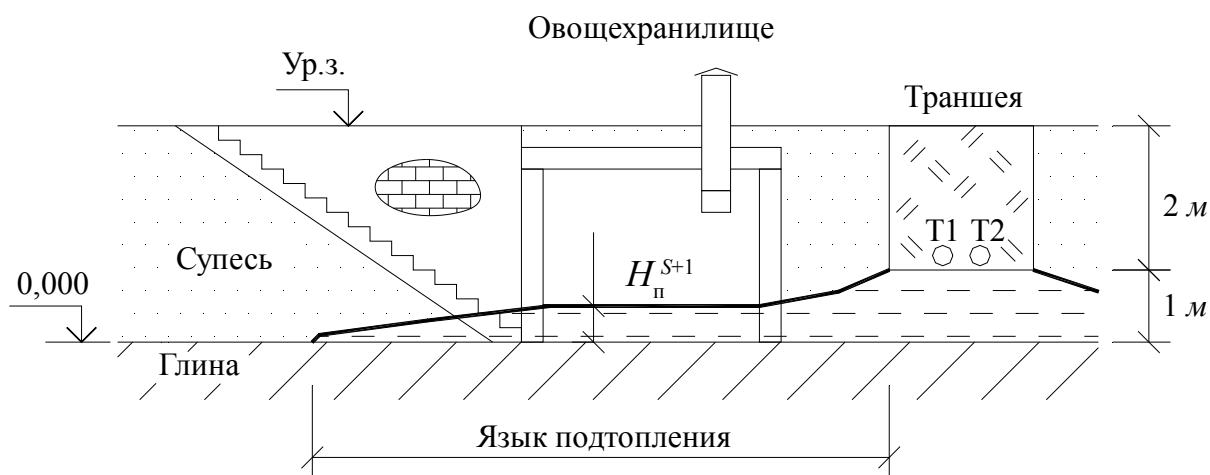


Рис. 153. Разрез А-А

лет. Грунт обратной засыпки траншеи не уплотняют, а просто сталкивают с бровки траншеи бульдозером. Поэтому при возникновении утечки воды из трубопровода данный участок траншеи заполняется водой на уровне труб. Отсюда вода в супесчаном грунте начинает просачиваться в стороны по почти горизонтальной поверхности водоупорной глины в виде языка подтопления (см. рис. 153). Контур траншеи служит гидродинамической границей 1-го рода с постоянным максимальным напором  $H_{\max} = 1 \text{ м}$ . Контур овощехранилища является гидродинамической границей 3-го рода с напором  $H_{\text{п}}^{S+1}$ , зависящим от времени и от водопритока в хранилище (см. рис. 153). Кирпичные стены хранилища никакой гидроизоляции не имеют и не создают дополнительного фильтрационного сопротивления для притока техногенных вод внутрь помещения.

Признаком подтопления овощехранилища явилось появление на земляном полу горячей воды с температурой около  $+40^\circ\text{C}$ . В первые сутки на полу накопился слой воды примерно 6 см, на вторые сутки — 12 см, на третьи сутки — 19 см и на четвертые сутки — 25 см. На рис. 153 этот слой воды обозначен как напор в подземном овощехранилище

$H_{\Pi}^{S+1}$ . Горизонтальная плоскость отсчета напоров 0-0 проведена по поверхности водоупорных глин.

В ходе вариантного моделирования подбором были определены коэффициент фильтрации супесей  $k = 0,8$  м/сут и недостаток их насыщения  $\mu = 0,02$ . Вообще, следует отметить, что с помощью метода подбора фактически решается прямая задача с перебором вариантов.

Время вертикального просачивания  $t_{\text{верт}}$  горячей воды от отметки трубы в траншее по супеси до поверхности водоупора невелико:

$$t_{\text{верт}} = z / k = 1 / 0,8 = 1,25 \text{ сут},$$

поэтому отсчет времени  $t$  на модели ведем с момента, когда фильтрационный поток техногенных вод достиг водоупора и началось растекание языка подтопления в стороны от траншеи.

Так как первоначально водоносный грунт (супесь) не был обводнен, то при решении данной задачи следует применить нелинейную гидравлическую теорию фильтрации (по Буссинеску). Отношение габаритов траншеи в плане

$$20 / 2 = 10 > 5,$$

тогда по критерию (107), казалось бы, следует решать одномерную плоскопараллельную задачу в плане. Однако расположенное с одной стороны траншеи подземное овощехранилище диктует рассмотреть более сложную двухмерную в плане задачу. Наличие расплазующегося в плане языка подтопления обязывает моделировать нестационарную фильтрацию.

Определим размеры моделируемой области фильтрации в плане с помощью известных точных решений для языков подтопления (растекания) при максимальном наблюдаемом времени подтопления  $t = 4$  сут.

Длина языка растекания в направлении, перпендикулярном длинной стороне траншеи в сторону, противоположную овощехранилищу, может быть найдена по формуле П.Я. Полу-бариновой-Кочиной (188):

$$L_{\text{яз}} = 1,616 (kH_{\text{max}} t / \mu)^{1/2} = 1,616 (0,8 \cdot 1 \cdot 4 / 0,02)^{1/2} = 20,4 \text{ м}.$$

Однако траншея имеет конечную длину, что на некотором удалении от нее вызовет плановую фильтрацию, близкую к радиальной [13, с. 93], поэтому найдем также радиус языка подтопления по нашей формуле (206). Вначале находим приведенный радиус траншеи  $r_{\text{тр}}$  через ее периметр  $\Pi_{\text{тр}}$  в плане так [13, с. 93]:

$$r_{\text{тр}} = \Pi_{\text{тр}} / (2 \pi) = (20+2+20+2) / (2 \pi) = 7 \text{ м}.$$

Безразмерный параметр времени

$$\tau = kH_{\text{max}} t / (\mu r_{\text{тр}}^2) = 0,8 \cdot 1 \cdot 4 / (0,02 \cdot 7^2) = 3,2653.$$

Радиус языка подтопления по (206):

$$R_{\text{яз}} = r_{\text{тр}} [1 + (1,5114 - 0,0461 \ln \tau) \sqrt{\tau}] =$$

$$= 7 [1 + (1,5114 - 0,0461 \ln 3,2653) \sqrt{3,2653}] = 25,4 \text{ м.}$$

С учетом найденных зон влияния (длин и радиусов языков подтопления) с небольшим запасом схематизируем область фильтрации как квадратный в плане массив проницаемого грунта (супеси) с размером стороны 54 м. Пространственный шаг конечно-разностной сетки по горизонтальным декартовым координатам принимаем равномерный (квадратная сетка):

$$Dx = Dy = DL = 1 \text{ м.}$$

Таким образом, сборке подлежит МКР-Excel модель плановой нестационарной нелинейной (по Буссинеску) фильтрации грунтовой воды. Число узлов МКР-сетки

$$55 \times 55 = 3025,$$

то есть это средняя по величине модель. Ее целесообразно собрать как динамическую модель (см. пример 58), но вначале надо вписать объекты моделирования (траншею и овощехранилище) в конечно-разностную сетку. Траншея вписывается точно, так как ее габариты в плане  $20 \times 2 \text{ м}^2$  соответствуют шагу  $DL = 1 \text{ м}$ . Контур овощехранилища вписывается с небольшой погрешностью (6-7 %), так как оно расположено под углом  $45^\circ$  к траншее (см. рис. 152). Такая погрешность не страшна, так как контур хранилища в натуре не идеально прямоугольный (неровности стеновой кладки и т.д.).

Формулу моделирования нестационарной нелинейной (по Буссинеску) плановой фильтрации техногенных вод теплотрассы по горизонтальному абсолютному водоупору можно записать на основе общего выражения (352) в виде

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{k Dt}{2\mu(DL)^2} \left[ (H_1^S)^2 + (H_2^S)^2 + (H_3^S)^2 + (H_4^S)^2 - 4(H_0^S)^2 \right], \quad (375)$$

где  $H$  с индексами — напор и одновременно мощность техногенных грунтовых вод в соответствующих узлах горизонтальной МКР сетки, отсчитываемые от плоскости 0-0 (см. рис. 153). Схема-шаблон модели показана на рис. 154.

Так как данная схема формулы моделирования относится к явной (см. § 21), то следует ограничить шаг времени с помощью критерия устойчивости для квадратной МКР-сетки (331):

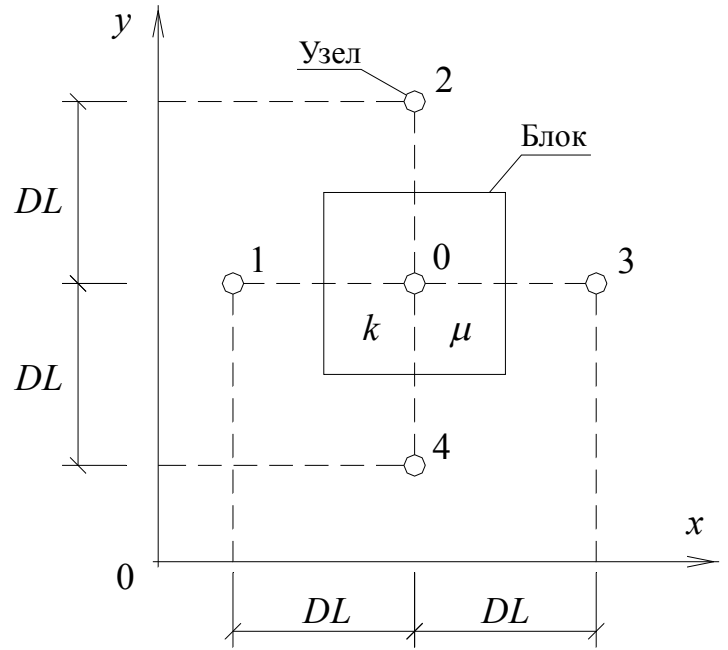
$$Dt_{\max} = \frac{\mu(DL)^2}{4kH_{\max}} = \frac{0,02 \cdot (1)^2}{4 \cdot 0,8 \cdot 1} = 0,00625 \text{ сут.}$$

Окончательно для модели принят несколько меньший шаг времени  $Dt = 0,005 \text{ сут}$ , который весьма удобен из-за его кратности. Например, 200 шагов  $Dt$  или 100 итераций на модели соответствуют 1 суткам реального времени.

Общая схема файла динамической модели, расположенной на одном листе-worksheet таблицы Excel показана на рис. 155. Общие приемы сборки изложены в предыдущих примерах. Отметим, что в матрице четных шагов времени (см. рис. 155) надо применить функцию Excel ЕСЛИ, о которой рассказано в пример 58. Там же имеется пояснение, как обнулять счетчик итераций.

Таблица исходных данных с именами (см. рис. 155) играет ключевую роль при моделировании обратных инверсных задач по подбору параметров. Изменяя исходные

Рис. 154. Схема-шаблон плановой безнапорной нестационарной нелинейной (по Буссинеску) фильтрации грунтовых вод в изотропном пласте



значения искомых параметров на собранной модели, можно быстро просчитывать варианты. Подробности применения имен ячеек Excel см. в примере 56.

Особо следует остановиться на задании в динамической модели увеличивающегося во времени напора воды на полу овощехранилища  $H_{\pi}^{S+1}$  (см. рис. 153). Как уже было замечено — это граничное условие 3-го рода (сведения о ГУ см. в § 13).

Формула моделирования изменяющегося во времени напора (уровня) воды в помещении хранилища имеет вид

$$H_{\pi}^{S+1} = H_{\pi}^S + Q_{\pi}^S Dt / F_{\pi}, \quad (376)$$

где  $S+1$  и  $S$  — как обычно последующее и предыдущее состояния напора или расхода с интервалом через шаг времени  $Dt$ ;  $F_{\pi}$  — площадь подземного помещения (здесь овощехранилища),  $m^2$ ;  $Q_{\pi}^S$  — суммарный водоприток (расход) в помещение,  $m^3/сут$ , который в формуле (376) надо раскрыть по следующей зависимости:

$$Q_{\pi}^S = \frac{k N}{2} \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (H_i^S)^2}{N} - (H_{\pi}^S)^2 \right]. \quad (377)$$

Здесь  $N$  — число единичных водопритоков, поступающих в узел-ячейку на контуре овощехранилища из внешних узлов-ячеек. На рис. 156 показан фрагмент МКР-Excel модели с контуром хранилища в плане, где стрелками показаны единичные водопритоки.

Количество стрелок и есть  $N = 40$  (в данном случае).  $H_i^S$  — напор во внешней ячейке, примыкающий к контуру хранилища.

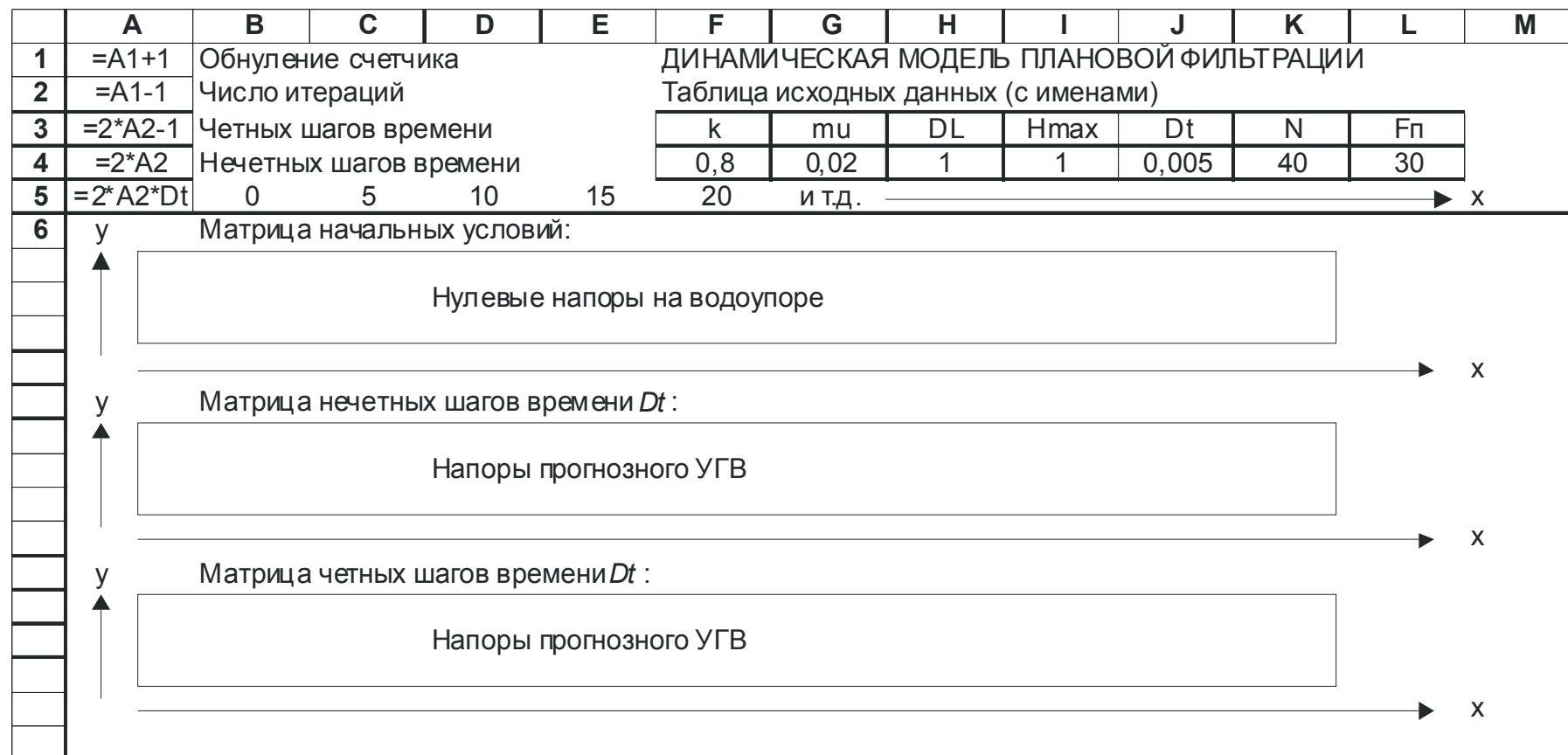


Рис. 155. Схема динамической модели подтопления овощехранилища



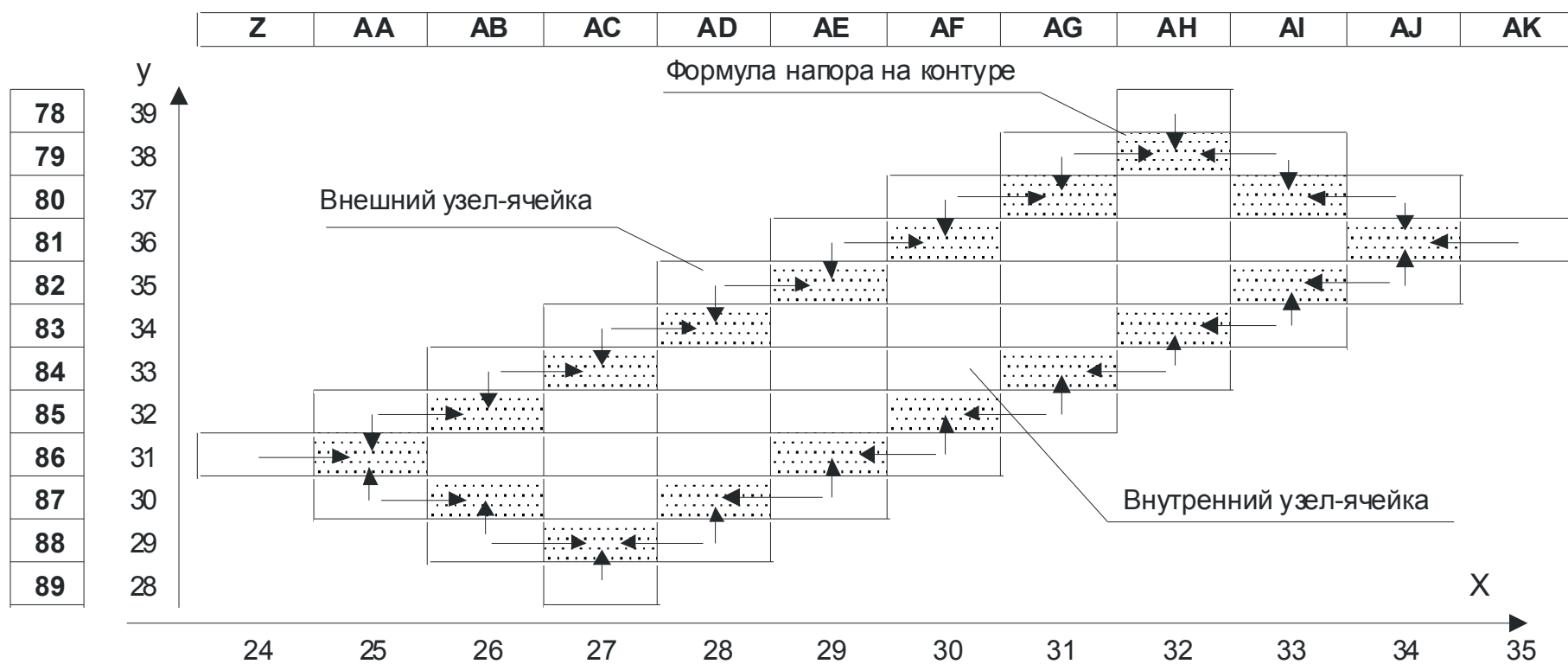


Рис. 156. Фрагмент МКР-Excel модели с контуром овощехранилища (заштрихованные ячейки)

Формула (377) получена так. Согласно закону Дарси (24) единичный водоприток  $Q_i^S$  по линии связи двух узлов-ячеек — внешней с напором  $H_i^S$  и на контуре подземного овощехранилища  $H_{\Pi}^S$  (см. рис. 156) — выражается при безнапорной фильтрации в виде

$$Q_i^S = k \frac{H_i^S + H_{\Pi}^S}{2} DL \frac{H_i^S - H_{\Pi}^S}{DL} = \frac{k}{2} \left[ (H_i^S)^2 - (H_{\Pi}^S)^2 \right].$$

Суммируя единичные водопритоки  $Q_i^S$ , получаем формулу (377).

Формулу моделирования (376) для напора  $H_{\Pi}^{S+1}$  на контуре хранилища надо набирать лишь в самой верхней и левой ячейке, что связано с недокументированными особенностями счета таблицы Excel: слева направо и сверху вниз (см. § 19).

В матрице нечетного временного шага  $Dt$  (см. рис. 155) формулу (376) надо ввести в ячейку с адресом АН79 (см. рис. 156) как аргумент функции Excel ЕСЛИ со ссылками на верхнюю матрицу начальных условий при первой итерации и на нижнюю матрицу четного шага времени  $Dt$  при последующих итерациях. Подробности о применении логической функции ЕСЛИ см. в примере 58. В остальных узлах-ячейках контура хранилища и внутренних (см. рис. 156) надо ввести абсолютную фиксированную ссылку на ячейку АН79 с формулой (376) так:

$$= \$AH\$79$$

В матрице четного временного шага  $Dt$  (см. рис. 155), которая содержит результирующие значения прогнозных напоров в водоносном грунте, функция ЕСЛИ не нужна, а просто набирается формула (376) со ссылками на соответствующие ячейки вышележащей матрицы нечетного  $Dt$ .

Ввод формул моделирования в первый раз следует производить внимательно и не торопясь, чтобы не наделать ошибок. После нажатия клавиши ENTER лучше проверить правильность введения формулы через меню Excel:

СЕРВИС / ЗАВИСИМОСТИ / ВЛИЯЮЩИЕ ЯЧЕЙКИ

и на экране будут показаны синие стрелки связи, которые можно убрать командой меню:

СЕРВИС / ЗАВИСИМОСТИ / УБРАТЬ ВСЕ СТРЕЛКИ.

Собрав модель, запускаем ее нажатием клавиши F9. Изменяя величины  $k$  и  $\mu$  в таблице исходных данных (см. рис. 155), находим такие их значения, при которых слой накопившейся воды на полу овощехранилища  $H_{\Pi}^{S+1}$  (см. рис. 153) близок к реальным замерам. В результате на модели МКР-Excel при коэффициенте фильтрации  $k = 0,8 \text{ м/сут}$  и недостатке насыщения супеси  $\mu = 0,02$  были получены следующие значения  $H_{\Pi}^{S+1}$ :

1 сутки	2 сутки	3 сутки	4 сутки
0,056 м	0,122 м	0,189 м	0,254 м,

что практически совпало с реально наблюдаемыми величинами уровней воды. Коэффициент фильтрации приведен к температуре +10 °C по формуле Хазена (26)

$$k_{10} = k / (0,7 + 0,03T) = 0,8 / (0,7 + 0,03 \cdot 40) = 0,42 \text{ м/сут}.$$

Поля прогнозных напоров, получившихся на модели МКР-Excel, обработаны с помощью VBA-макропрограммы ForSuffer (см. прил. 2) и картографического компьютерного

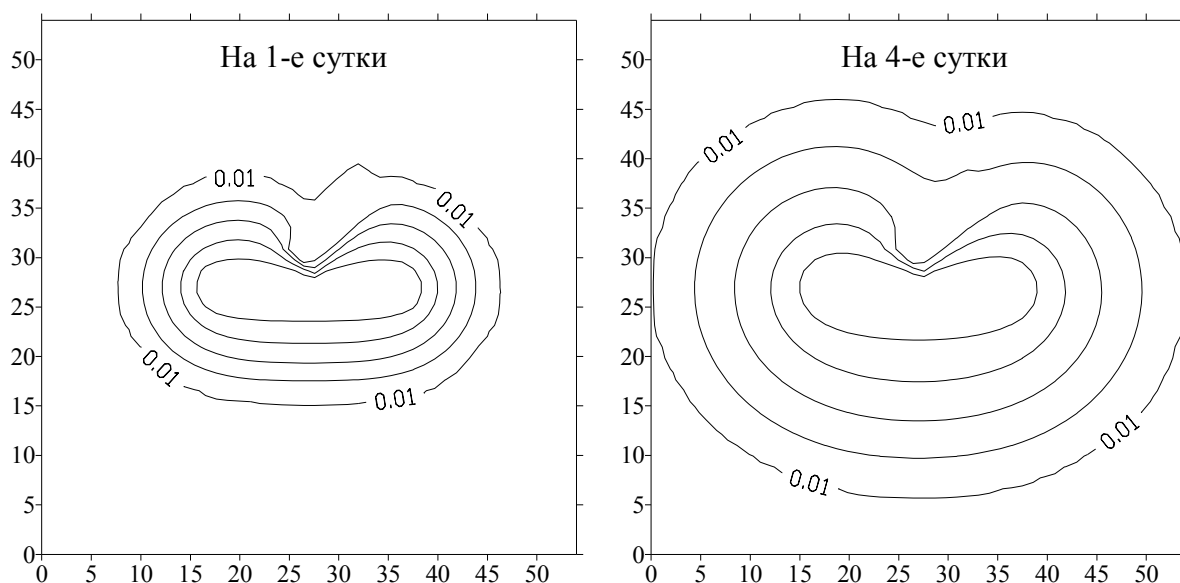


Рис. 157. Карты языков подтопления (гидроизогипсы) при утечке из теплотрассы

пакета Surfer 6.04. Сравнительные результаты в виде карт гидроизогипс по растеканию языка подтопления вследствие утечки из теплотрассы на 1-е и 4-е сутки показаны на рис. 157. В качестве ползущей кромки языка подтопления принят слой воды на водоупоре толщиной 1 см.

Проанализировав результаты моделирования подтопления вследствие утечки воды из теплотрассы, выявлены интересные дополнительные детали:

- 1) при конечной длине вытянутого очага подтопления на некотором расстоянии от него язык подтопления приобретает почти круглую в плане форму;
- 2) в направлении, перпендикулярном оси X, на стороне траншеи без овощехранилища через 4 суток после утечки из теплотрассы язык подтопления продвинулся на длину 20,3 м, что почти совпало с вычисленной длиной языка 20,4 м по формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной (188);
- 3) в другом направлении, перпендикулярном оси Y, через 4 суток язык подтопления радиусом 27 м удовлетворительно описывается нашей формулой (206), по которой он получился радиусом 25,4 м;
- 4) овощехранилище несколько уменьшило распространение языка подтопления (18 м против 20,3 м), что можно объяснить его аккумуляющей способностью.

В целом же можно отметить, что с помощью МКР-Excel можно весьма эффективно и точно решать подбором обратные задачи в нелинейных постановках. В справочном пособии к СНиП [208, с. 65-70] рассмотрен аналитический метод определения величин дополнительной инфильтрации влаги  $\omega$  (м/сут) и интенсивности утечек воды  $q$  (м<sup>2</sup>/сут) из инженерных коммуникаций. Основой этих расчетов является линеаризованная гидравлическая теория фильтрации. В грунтовых водах малой мощности, при близком водоупоре и в первоначально необводненных грунтах необходимо применять нелинейную гидравлическую теорию фильтрации. Аналитические решения с величинами  $\omega$  и  $q$  в нелинейной постановке крайне редки [39, с. 208]. Кроме того, в городе происходят техногенные изменения гидрогеологии и климата. Поэтому находить  $\omega$  и  $q$  следует моделированием. Мы рекомендуем использовать МКР-Excel. Общая методика подбора  $\omega$  и  $q$  аналогична показанной в данном примере.

## § 26. Моделирование изменения проницаемости грунтов оснований

Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований аналитическим методом рассмотрены в § 15. Там были использованы некоторые упрощения с целью схематизации расчетов. Моделирование изменения проницаемости грунтов оснований может быть выполнено с помощью МКР-Excel и гораздо точнее. Оно является разновидностью обратных инверсных задач.

В сложных случаях неоднородных грунтовых оснований и разнообразных конфигураций фундаментов обычно прибегали к определению начального распределения поровых давлений  $p_0$  с помощью метода ЭГДА [295; 296; 297]. Однако в настоящее время начальное распределение  $p_0$  в грунтовой воде под фундаментами гораздо проще и точнее можно найти с помощью МКР-Excel. Для этого нужно промоделировать стационарную задачу фильтрации под фундаментом (рис. 158), ибо поровое давление связано с фильтрационным напором так:

$$H = p_0 / \gamma, \quad (378)$$

где  $\gamma$  — удельный вес воды. Поровое давление — это избыточное давление над гидростатическим давлением в грунтовой воде, согласно теории фильтрационной консолидации К. Терцаги [280].

Проведя горизонтальную плоскость отсчета напоров 0-0 по подошве фундамента (см. рис. 158), принимают в этом месте граничное условие I рода (ГУ1), то есть задают напор от нагрузки

$$H_{\text{нагр}} = p_{\text{нагр}} / \gamma. \quad (379)$$

По прилегающим границам, соответствующим положению УГВ, принимают граничное условие тоже I рода, то есть задают естественный напор грунтовых вод  $H_e$ . На удалении от фундамента, где поровое давление затухает, по рекомендации В.А. Флорина [295; 296; 297] моделируют границу II рода (ГУ2), как водоупор (см. рис. 158). Можно также сразу моделировать поровое давление  $p_0$ , подставляя его значения на границы модели по формулам (378) — (379). В пределах области фильтрации, показанной на рис. 158, располагают МКР-сетку, состоящую из узлов — ячеек Excel, связанных между собой формулами моделирования. Так как в теории фильтрационной консолидации часто принимают схему мгновенного нагружения фундамента нагрузкой [88; 296], то УГВ по данной гипотезе не может быстро подняться в ответ на приложенную внешнюю нагрузку. Поэтому моделировать можно напорную фильтрацию, что значительно упрощает задачу.

Полученные по результатам моделирования поровые давления нужно использовать в формуле (127), принимая в ней вместо  $p_\phi$  величины  $p_0$ . Таким

образом, будут найдены коэффициенты пористости массива уплотненного грунта под фундаментом. Конечные значения коэффициента фильтрации  $k_*$  уплотненного грунта под фундаментом можно найти по формулам В.Н. Жиленкова (121) или Г.И. Черного (123).

Более сложный случай фильтрационной консолидации возникает, когда здание или сооружение возводят постепенно. Эта методика подробно рассмотрена В.А. Флориным [296] и повторена П.Л. Ивановым [88]. Она легко реализуется в МКР-Excel. Предлагается освоить ее самостоятельно, пользуясь [88; 296] и данной книгой.

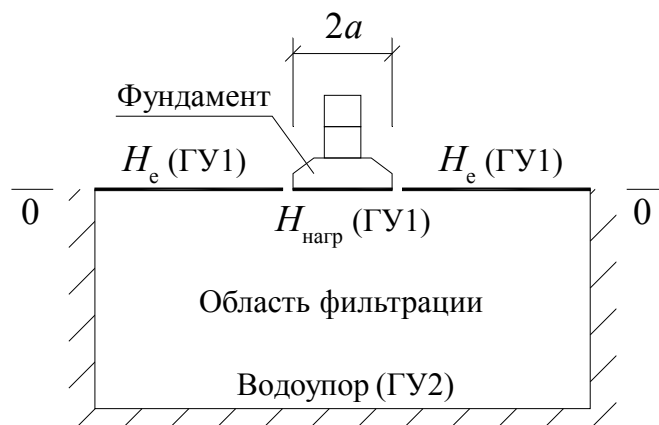


Рис. 158. Определение начальных поровых давлений на МКР-Excel-модели

#### Пример 62. Моделирование фильтрационной консолидации грунта

Рассмотрим максимально возможное уплотнение грунта под ленточным фундаментом на водонасыщенном суглинке вследствие фильтрационной консолидации. Данный предельный случай относится к так называемой схеме «мгновенно» загруженного фундамента [88; 296]. Это невыгодно с точки зрения механики грунтов (увеличиваются осадки фундаментов), а также с точки зрения уменьшения коэффициента фильтрации грунта под фундаментом (увеличивается барражный эффект).

По материалам инженерных изысканий известно, что грунт основания суглинок в естественном залегании имеет коэффициенты фильтрации  $k_0 = 0,02 \text{ м/сут}$ , пористости  $e_0 = 0,85$  и сжимаемости  $a_c = 0,1 \text{ МПа}^{-1}$  — это грунт средней сжимаемости [141]. Суглинок водонасыщен, уровень грунтовых вод (УГВ) расположен на отметке низа фундамента. Фундаментные плиты шириной  $2a = 1,6 \text{ м}$  (см. рис. 158) передают давление на грунт  $p_\phi = 0,15 \text{ МПа}$ . Водоупорные глины залегают на глубине 4 м. Поверхность водоупора горизонтальная. Требуется найти коэффициенты фильтрации суглинка под фундаментом после полного завершения процесса фильтрационной консолидации грунта основания.

С помощью МКР-Excel собираем стационарную профильную модель напорной фильтрации. Область фильтрации показана на рис. 158. По горизонтали размер области фильтрации с учетом возможного влияния уплотнения (с запасом) принят 16 м. По вертикали размер соответствует мощности водонасыщенного суглинка 4 м. Шаг квадратной конечно-разностной сетки принят  $DL = 0,4 \text{ м}$ , кратный размерам области фильтрации. Таким образом, модель в виде прямоугольной матрицы имеет  $16 / 0,4 = 40$  шагов по горизонтали и  $4 / 0,4 = 10$  шагов по вертикали. Количество узлов-ячеек МКР-Excel модели  $41 \times 11 = 451$  — это малая модель.

Схема-шаблон модели аналогична показанной на рис. 125 в примере 56, формула моделирования — (322). Под фундаментом задаем ГУ 1-го рода по формуле (379)

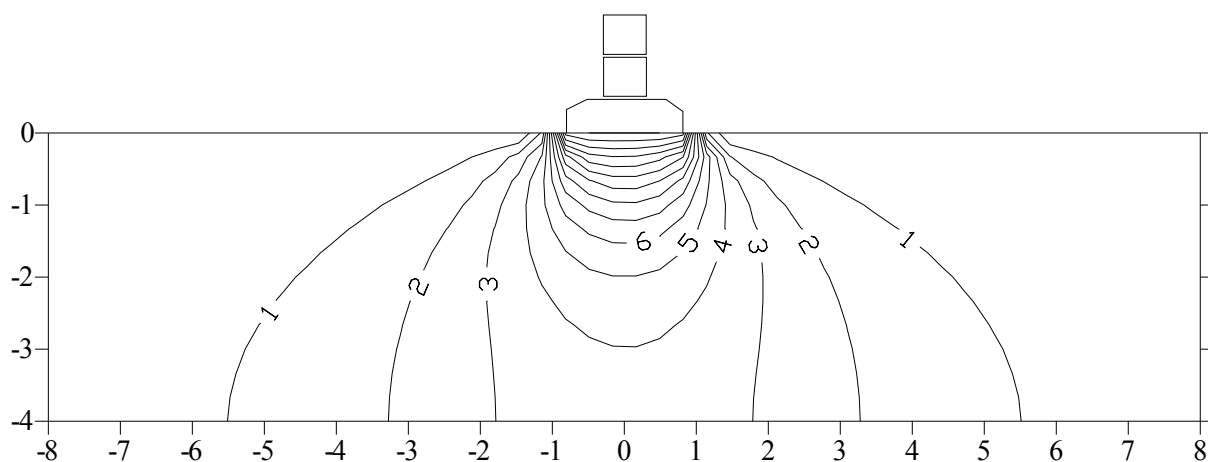


Рис. 159. Распределение начальных напоров под ленточным фундаментом при схеме «мгновенного» нагружения, полученное с помощью МКР-Excel (м вод. ст.)

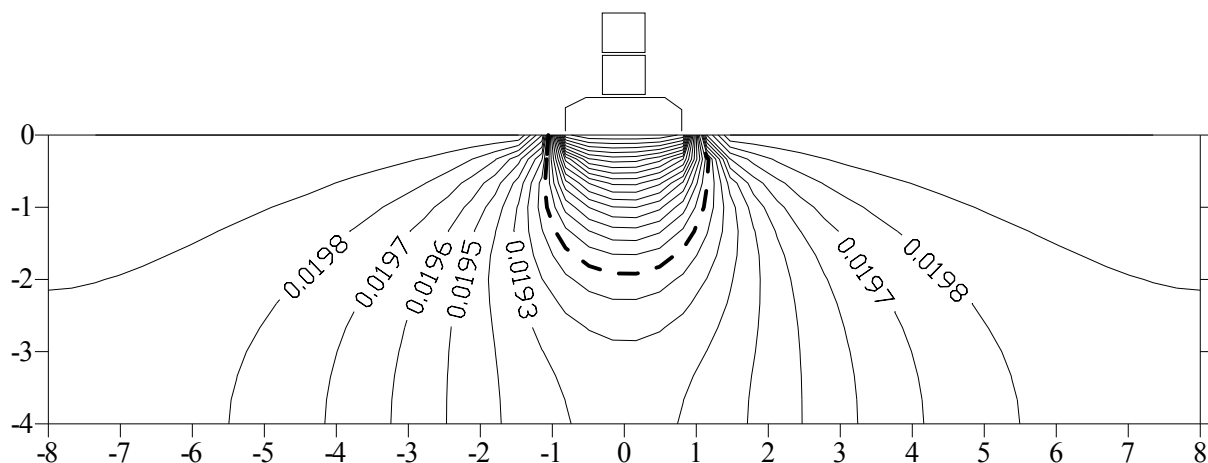


Рис. 160. Поле коэффициентов фильтрации грунта, уплотненного фундаментом (получено моделированием с помощью МКР-Excel)

$$H_{\text{нагр}} = p_{\text{нагр}} / \gamma = 150000 / 10000 = 15 \text{ м.}$$

По прилегающим границам, соответствующим положению УГВ, принимаем ГУ 1 рода  $H_e = 0$ , так как плоскость отсчета напоров 0-0 проведена по низу фундамента (см. рис. 158). Остальные гидродинамические границы задаем как абсолютный водоупор — ГУ2. Таким образом, после сборки модели, задания максимального количества итераций 32767 и относительной погрешности 0,0000000001 (см. пример 56) уведем модель с экрана клавишей PageDown и нажмем клавишу счета модели F9. На компьютере Pentium MMX 200MHz 96 MB RAM модель рассчитывается за 3 секунды при 1500 итерациях. Полученную матрицу напоров обрабатываем VBA-макропрограммой ForSurfer (см. прил. 2) с картографическим компьютерным пакетом Surfer 6.04. Промежуточный результат в виде карты начальных напоров  $H_p$  под фундаментом показан на рис. 159.

Но нам нужна другая матрица, которая дает распределение коэффициентов фильтрации  $k$  под фундаментом. Нас интересует конечное состояние уплотненного грунта, не зависящее от времени, поэтому величину коэффициента пористости можно из процесса

моделирования исключить следующим образом. Подставим формулу (127) в (121) и с учетом (379) получим зависимость для коэффициента фильтрации уплотненного грунта

$$k = k_0 \exp[-\beta_s a_c \gamma H_p], \quad (380)$$

с помощью которой соберем в Excel матрицу коэффициентов фильтрации со ссылками на первую матрицу  $H_p$ . Здесь для суглинка принят коэффициент  $\beta_s = 10$  в соответствии с примечанием к формуле (121). Результат в графическом виде получен с помощью тех же программных средств, как и для первой матрицы. Он представлен на рис. 160.

Анализируя полученное поле распределения коэффициентов фильтрации уплотненного грунта под фундаментом, можно заметить следующее. Штриховой линией под фундаментом на рис. 160 показана граница, где коэффициент фильтрации грунта изменился до  $k = 0,019 \text{ м/сут}$ , то есть уменьшился на 5 % по отношению к коэффициенту фильтрации грунта в естественном залегании. Эта граница показывает зону уплотнения грунта под ленточным фундаментом с точки зрения изменения его проницаемости. Заметим, что мы рассмотрели среднесжимаемый суглинок, у которого коэффициент фильтрации уменьшается не так интенсивно, как у супесей. В случае сильносжимаемых грунтов под сплошными фундаментами, дорогами с динамическими нагрузками, в более экстремальных ситуациях уменьшение  $k$  может резко усилиться. Все это, а также случаи слоистых, анизотропных грунтов при их уплотнении можно промоделировать с помощью МКР-Excel.

Определение изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства с помощью аналитических методов рассмотрено в § 15. Моделирование изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства может быть произведено с помощью МКР-Excel. При этом чаще всего возможны два типа задач:

- 1) плановая задача фильтрационной консолидации грунта около нерегулярно расположенных свай;
- 2) объемная задача фильтрационной консолидации грунта около нерегулярно расположенных свай.

Эти задачи, с учетом положений [296], можно решать при гипотезе напорной фильтрации воды.

Определение изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий с помощью аналитических методов также рассмотрено в § 15. Моделирование изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий может быть произведено с помощью МКР-Excel. При этом решаются более сложные задачи:

- 3) плановая задача фильтрационной консолидации грунта для нерегулярно расположенных зданий и сооружений;
- 4) объемная задача фильтрационной консолидации грунта под нерегулярно расположенными зданиями и сооружениями, при неоднородных грунтовых условиях.

Все упомянутые задачи можно промоделировать с помощью МКР-Excel также просто, как было показано в примере 62.

## § 27. Прогнозное моделирование подтопления

Материал данного параграфа иллюстрирует частные случаи применения МКР-Excel для моделирования подтопления в городском строительстве. Тем не менее он дает достаточное представление для освоения методики моделирования подтопления.

Основные разновидности прогнозов подтопления перечислены в § 12. В начале моделирования подтопления нужно проделать схематизацию изучаемой области фильтрации, которой подвергаются природные и техногенные условия объекта защиты от подтопления. Подробности схематизации см. в § 13.

Прогнозы верховодки аналитическим методом рассмотрены в § 16. Исследован случай образования верховодки на слабопроницаемых линзах при стационарной (установившейся) фильтрации воды. Линзы, природные и техногенные, рассмотрены в плане вытянутые и круглые.

Нестационарную фильтрацию верховодки на слабопроницаемых линзах лучше моделировать в нелинейной постановке, так как аналитические решения в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации получаются не точные (см. § 16).

Верховодки можно подразделить на вытянутые и круглые в плане. Причиной их образования принято считать поступление дополнительной инфильтрации влаги интенсивностью  $\omega$ , м/сут [119]. В плане очаг инфильтрации может быть вытянутый или круглый.

Если конфигурации в плане очага инфильтрации и линзы одновременно вытянутые или круглые, тогда можно ограничиться одномерной задачей фильтрации грунтовой воды в нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску. Соответственно для вытянутой или круглой конфигурации надо решать плоскопараллельную или радиальную задачу.

Когда конфигурации в плане очага инфильтрации и слабопроницаемой линзы не совпадают, следует перейти на двухмерную в плане нелинейную гидравлическую постановку задачи.

В условиях городского строительства верховодка на линзах может образовываться при наличии существенных плановых неоднородностей: фундаментов зданий и сооружений, уплотненных грунтов и т.д. Тогда моделирование следует производить не менее чем на двухмерных плановых моделях, отражающих зоны неоднородной проницаемости.

В первую очередь, принципиальный интерес представляет моделирование верховодок в одномерной нелинейной гидравлической постановке при плоскопараллельной и радиальной в плане фильтрации, ибо таким путем можно исследовать множество практических задач и хорошо освоить МКР-Excel.



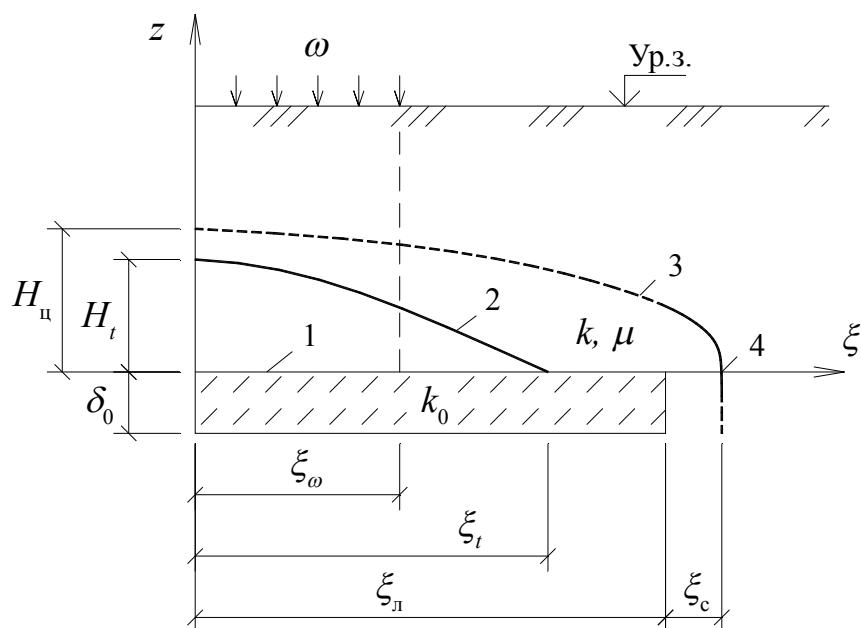


Рис. 161. Динамика верховодки на слабопроницаемой линзе:

1 — линза; 2 — нестационарный уровень верховодки;

3 — стационарный; 4 — крайняя точка стока

Динамику образования верховодок на слабопроницаемых линзах рассмотрим так же, как у А.Ж. Муфтахова и Н.П. Куранова [119], то есть для плоскопараллельной и радиальной задач. При поступлении инфильтрации  $\omega$  на поверхности слабопроницаемой линзы вначале образуется купол верховодки с ползущей границей обводнения при растекании (рис. 161).

При плоскопараллельной фильтрации на вытянутой в плане линзе:  $\xi_\omega = L_\omega$  — полуширина полосы инфильтрации;  $\xi_t = L_t$  — переменная длина языка подтопления на линзе;  $\xi_\text{л} = L_\text{л}$  — полуширина линзы;  $\xi_\text{с} = L_\text{с}$  — ширина зоны стока с края линзы;  $\xi = x$  — горизонтальная ось. Ось  $z$  совмещена с вертикальной осью симметрии. Здесь  $\xi$  — обобщенная координата.

При радиальной фильтрации на круглой в плане линзе:  $\xi_\omega = R_\omega$  — радиус очага инфильтрации;  $\xi_t = R_t$  — переменный радиус языка подтопления на линзе;  $\xi_\text{л} = R_\text{л}$  — радиус линзы;  $\xi_\text{с} = R_\text{с}$  — ширина кольцевой зоны стока с края линзы;  $\xi = r$  — горизонтальная ось.

Максимальный напор (подъем уровня верховодки) наблюдается в центре линзы. Вначале он  $H_p$ , в пределе достигает наибольшего стационарного значения  $H_\text{ц}$ . Напоры отсчитываются от верха линзы (ось  $r$ ). Грунт линзы считается водонасыщенным полностью. Так же, как Н.П. Куранов [119] и С.А. Пильдыш [193], считаем, что грунт линзы водонасыщен в любом случае, даже если сверху нет питания и нет слоя верховодки (см. § 16).

Лежащий на линзе грунт имеет коэффициенты фильтрации  $k$  и водоотдачи  $\mu$ . При растекании купола вода движется не только к краям линзы, но и просачивается вниз через слабопроницаемый прослой толщиной  $m_0$  с коэффициентом фильтрации  $k_0$ . Через какое-то время граница растекания достигает края линзы и начинается сток с ее края. Если линза достаточно проницаемая, то граница растекания купола может не достигнуть края линзы, а занять некоторое промежуточное положение, когда фильтрация стабилизируется, и вся инфильтрационная влага будет перетекать вниз через линзу.

Такие случаи динамики верховодки наиболее корректно можно исследовать с помощью моделирования.

При плоскопараллельной нестационарной безнапорной фильтрации верховодки со свободной поверхностью формулу моделирования МКР-Excel можно записать как частный случай (346) в виде

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{kDt}{\mu(Dx)^2} \left[ \frac{(H_{i-1}^S)^2 + (H_{i+1}^S)^2}{2} - (H_i^S)^2 \right] + \frac{\omega Dt}{\mu} - \frac{k_0 Dt H_i^S}{\mu m_0}, \quad (381)$$

где  $Dt$  — шаг времени;  $Dx$  — равномерный горизонтальный шаг узлов МКР-сетки по оси  $x$ ; остальные обозначения оговорены выше.

При радиальной нестационарной фильтрации верховодки формула моделирования получается из (349) как

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi k Dt}{\mu F_k} \left[ \frac{(H_{i-1}^S)^2 - (H_i^S)^2}{\ln(r_i/r_{i-1})} + \frac{(H_{i+1}^S)^2 - (H_i^S)^2}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \frac{\omega Dt}{\mu} - \frac{k_0 Dt H_i^S}{\mu m_0}, \quad (382)$$

где  $F_k$  — площадь кольца по формуле (347);  $r_{i-1}$ ,  $r_i$ ,  $r_{i+1}$  — радиальные координаты узлов МКР-сетки, шаг которых рекомендуется выбирать по формуле (328), подробнее см. в примере 57; остальные обозначения уже оговорены.

Одномерное моделирование нестационарных верховодок по формулам (381) и (382) не представляет каких-либо сложностей. Конкретные модели верховодок можно собрать с учетом вышеизложенных технологических приемов и примеров.

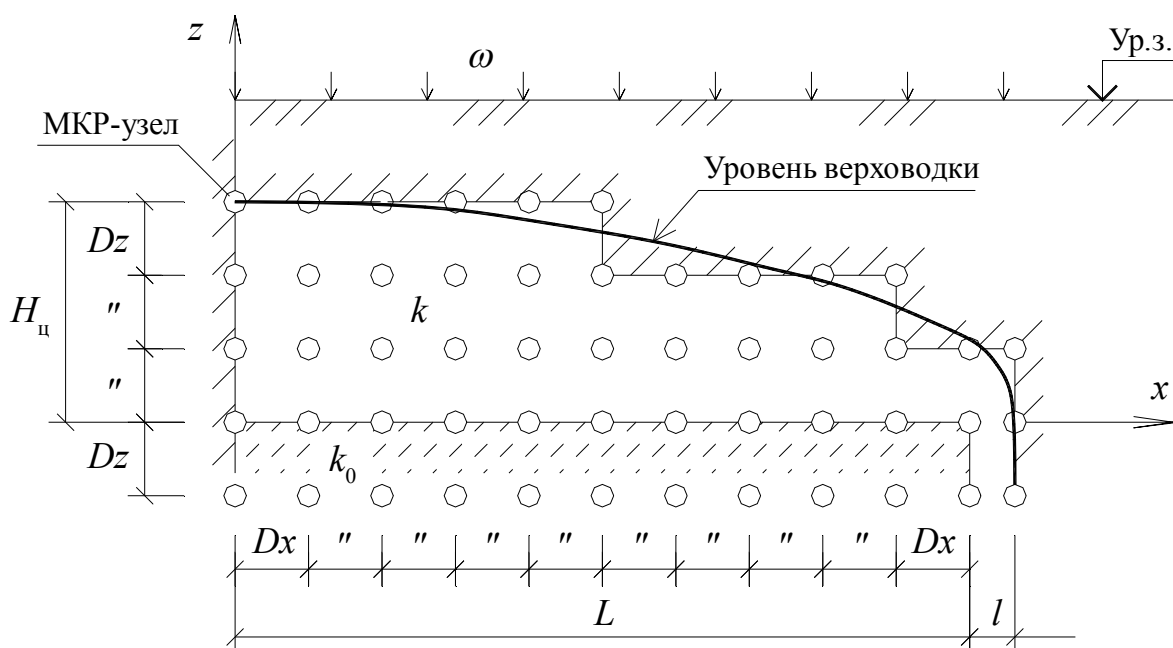


Рис. 162. Схема двумерной профильной модели верховодки на вытянутой линзе

Покажем более сложный случай двумерного профильного стационарного моделирования верховодки на слабопроницаемой линзе при инфильтрационном питании.

#### Пример 63. Моделирование стационарной верховодки на вытянутой линзе

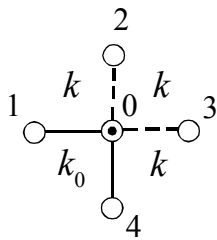
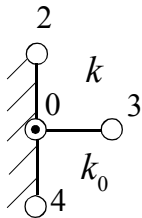
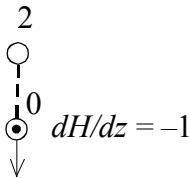
В § 16 приведена табл. 9, в которой дано сравнение результатов фильтрационных расчетов стационарной верховодки на вытянутой линзе по аналитическим зависимостям и с помощью моделирования МКР-Excel. Модель была собрана для одномерной стационарной плоскопараллельной в плане фильтрации при нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску. Однако перед этим было сделано обоснование названной постановки путем предварительного моделирования профильно-плоской двумерной задачи о верховодке со свободной поверхностью на слабопроницаемой линзе. Рассмотрим вначале двумерное моделирование.

Исходные данные такие:  $\omega = 0,01$  м/сут;  $k = 0,1$  м/сут;  $k_0$  — переменный;  $m_0 = 0,5$  м;  $L = 10$  м. Расчетную схему верховодки см. на рис. 71, откуда видно, что инфильтрация интенсивностью  $\omega$  рассмотрена равномерно распределенная по площади.

Формулы стационарного двумерного моделирования были получены с помощью балансового принципа А.А. Самарского [226; 227; 286], который у нас неоднократно продемонстрирован при выводе формул. Для их общего осмысления приводим рис. 162, где схематично показана разбивка двумерной сетки профильной модели. Кружками показаны узлы — центры прямоугольных блоков конечно-разностной сетки в декартовой системе координат. Узлы на границе II рода находятся в подрезанных блоках: на оси симметрии  $z$  и на свободной поверхности верховодки. Эта подрезка учтена при выводе формул моделирования на контакте с данными границами. Обратим внимание, что уровень верховодки на модели представляется как водоупорная кровля, положение которой надо определить подбором при моделировании. Отыскивая подбором это положение, надо

**Формулы моделирования стационарной двухмерной плоской фильтрации  
для квадратной МКР-сетки при  $Dx=Dz=DL$  (см. рис. 162)**

Схема	Формула	№
	<p>Внутренний узел [189, с. 46]:</p> $H_0 = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}$	(383)
	<p>Узел на плоском водоупоре (ГУ 2) [106, с. 714]:</p> $H_0 = \frac{H_2 + 2H_3 + H_4}{4}$	(384)
	<p>Узел плоского УГВ с инфильтрацией:</p> $H_0 = \frac{H_1 + H_3 + 2H_4}{4} + \frac{\omega DL}{2k}$	(385)
	<p>Угловой внешний узел УГВ с инфильтрацией:</p> $H_0 = \frac{H_1 + H_4}{2} + \frac{\omega DL}{2k}$	(386)
	<p>Угловой внутренний узел УГВ с инфильтрацией:</p> $H_0 = \frac{2H_1 + H_2 + H_3 + 2H_4}{6} + \frac{\omega DL}{6k}$	(387)
	<p>Узел на плоском контакте двух грунтов (ГУ 4) [188]</p> $H_0 = \frac{H_1 + 2H_2 + H_3 + (H_1 + H_3 + 2H_4)(k_0/k)}{4 + 4(k_0/k)}$	(388)

Схема	Формула	№
	<p>Узел углового контакта двух грунтов (ГУ 4) [188]</p> $H_0 = \frac{H_1 + 2H_2 + 2H_3 + H_4 + (H_1 + H_4)(k_0/k)}{6 + 2(k_0/k)}$	(389)
	<p>Узел контакта двух грунтов (ГУ 4) и водоупора (ГУ 2)</p> $H_0 = \frac{H_2 + H_3 + H_4 + (H_3 + H_4)(k_0/k)}{2 + 2(k_0/k)}$	(390)
	<p>Узел свободного стока [185]</p> $H_0 = H_2 - DL$	(391)

сверять его высотную отметку с величиной напора. При их близком совпадении моделирование прекращается и его цель — определение стационарного положения уровня верховодки — достигнута. Другой особенностью данной модели является использование принципа зеркального отображения от оси симметрии — оси  $z$ . На линии этой оси проведен условный водоупор. Тем самым нет необходимости собирать левую часть модели, а уменьшение узлов МКР-сетки приводит к ускорению расчета модели на компьютере. Количество узлов сетки на рис. 162 показано условно меньше, чем на собранной модели.

Формулы двухмерного моделирования даны в табл. 19. Шаг сетки принят равный по всем направлениям (квадратный) при  $Dx = Dz = DL$ .

Свободная поверхность верховодки найдена подбором по условию (368). Обратим внимание на формулы табл. 19. В них не использована упрощающая гипотеза А.Н. Мятиева — Н.К. Гириного (см. § 22) о том, что в хорошо проницаемых пластах вода фильтруется горизонтально, а в слабопроницаемых прослоях — вертикально. Это позволило наблюдать на модели в центре верховодки вертикальное движение воды в грунте линзы. Ближе к краю линзы линии тока в слабопроницаемом прослое отклоняются от вертикали в направлении стока. Этот эффект зависит от соотношения  $k/k_0$ .

Формула (391) для узла свободного стока записывается в ячейке Excel, имитирующей граничный узел МКР-сетки, где фильтрационный поток, сойдя с линзы, свободно фильтруется вниз. Применительно к рассматриваемой задаче, например, это точка В на

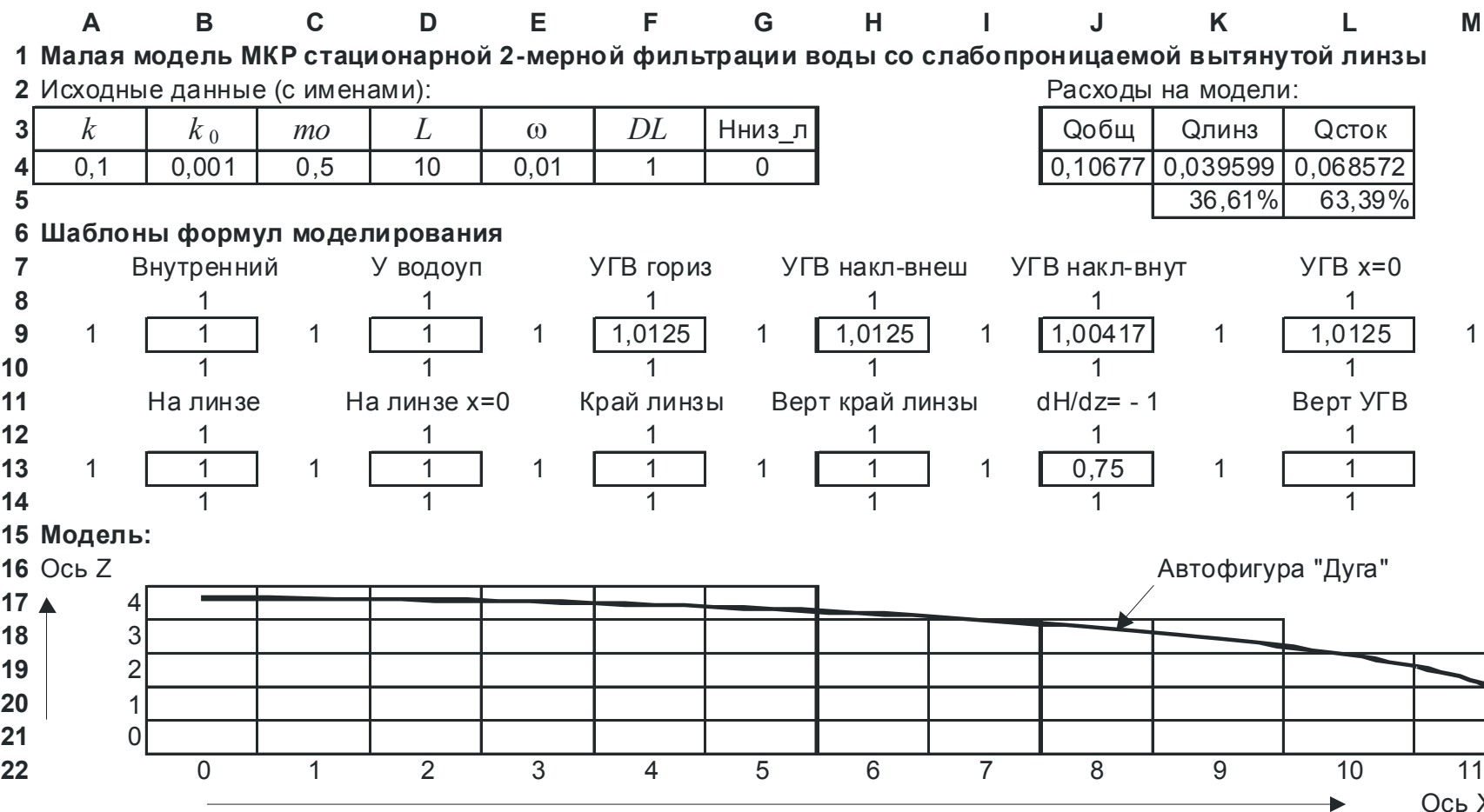


Рис. 163. Заготовка двумерной плоской стационарной модели в Excel

рис. 71 и 162. Толщина линзы  $m_0$  совпала с шагом  $Dz$ , но лишь в данном примере. Условие свободного стока впервые обстоятельно исследовано Н.Н. Павловским в работе [185]. Оно имеет вид

$$dH/dz = -1. \quad (392)$$

В конечных разностях (392) записывается как (391).

Под линзой в граничных точках типа С (см. рис. 71 и 162) напор  $H = 0$  по соображениям, изложенным в § 16, о сопротивлении грунтового воздуха движению инфильтрующейся влаги. В зоне стока в районе точек А и В имеет смысл сгустить МКР-сетку. В этом случае формулы моделирования выводятся элементарно с помощью балансового принципа, так же как формулы табл. 19.

Были разработаны малая модель ( $23 \times 12 = 276$  узлов) и средние модели ( $45 \times 23 = 1035$  и  $106 \times 41 = 4346$  узлов). Первая цифра в произведении показывает число узлов по горизонтали.

Сборку модели при разнообразных формулах моделирования, как в рассматриваемом примере, удобно производить в Excel с размещением над телом модели ячеек-шаблонов с формулами. Это лучше сделать так, как показано на рис. 163.

Вообще на рис. 163 показан хороший стиль начала моделирования. В первой ячейке А1 пишем заголовок «Малая модель МКР стационарной 2-мерной фильтрации воды со слабопроницаемой вытянутой линзы». Ниже подготавливаем таблицу исходных данных с именами. Об именах подробно рассказано в примере 56.

Шаблоны формул лучше сделать так (см. рис. 163). Допустим, нужно набрать шаблон формулы (383) для внутреннего узла в ячейке В9. Вначале лучше окружить эту ячейку единицами, так как легко проверять правильность введения формулы. Кроме того, важно, чтобы при первом введении формулы моделирования не возникло деления на нуль. После этого можно ввести формулу в ячейку В9. Также подготавливаются другие шаблоны формул. Над каждым шаблоном надо написать краткий заголовок формулы. Настоятельно рекомендуется раскрасить в разные экранные цвета ячейки-шаблоны с разными формулами с помощью инструмента Excel «Цвет заливки» или через меню:

ФОРМАТ / ЯЧЕЙКИ... / ВИД.

Формулы из шаблонов легко копируются с помощью правой кнопки мыши и вставляются в нужный узел-ячейку модели МКР-Excel. Цвет ячейки помогает контролировать правильность сборки модели. Для проверки правильности ссылок в формулах можно использовать меню Excel:

СЕРВИС / ЗАВИСИМОСТИ / ВЛИЯЮЩИЕ ЯЧЕЙКИ.

Ниже шаблонов формул нужно собрать модель (см. рис. 163). Вначале размечают координатные оси ( $x$  и  $z$ ). Начать лучше с вертикальной оси  $z$  сверху вниз по убыванию высотных отметок, подробности см. в примере 56. Первоначальное максимальное значение  $z$  придется принять с запасом интуитивно, но лучше его найти ориентировочным расчетом по известным аналитическим зависимостям. Горизонтальная длина модели принимается из расчета полуширины линзы  $L$  с зоной стока  $l$ . Первоначальное значение  $l$  можно найти по формулам (167) и (168).

Так как заранее уровень верховодки неизвестен, то его ожидаемое очертание можно прорисовать прямо на модели автофигурой «Дуга» Excel (см. рис. 163). После этого собрать модель, пользуясь шаблонами формул и аппроксимируя кривую депрессии верховодки узлами МКР-сетки, как показано на рис. 162 и 163. Когда модель будет собрана, то нужно

окончательно ее проверить, после чего подготовить к первому запуску-счету. Счет будет происходить итерациями — повторяющимися вычислениями.

Обычно стационарные модели основаны на эллиптических уравнениях [228], поэтому их расчет происходит итерационно, пока не будет достигнута наперед заданная точность. О назначении итераций в Excel см. пример 56.

Запуск счета модели производят клавишей F9. Для быстрого счета можно предварительно убрать с экрана модель клавишей PageDown, оставив лишь пустые ячейки таблицы (см. недокументированные возможности Excel в § 19). После первого расчета модели верховодки надо внимательно просмотреть узлы-ячейки, моделирующие свободную поверхность верховодки. Если напор в них  $H$  совпал с высотной отметкой узла  $z$ , то моделирование верховодки закончено. Однако после первого расчета модели обычно этого достичь не удастся. Тогда нужно или добавить выше узлов модели или, наоборот, убавить (имеются в виду узлы уровня верховодки). Например, при шаге 1 метр напор получился  $H=3,2$  метра, а отметка узла  $z = 2$  метра. Тогда узел уровня верховодки надо добавить вверх на один шаг. После такой корректировки узлов уровня верховодки счет модели повторяют вновь. Такими последовательными приближениями находят искомое положение стационарного уровня верховодки. Более точные результаты можно получить при уменьшении шага МКР-сетки. Сетку можно измельчить по всей модели, но лучше уменьшить ее шаг лишь в местах резкой деформации потока, как в зоне стока с линзы в районе точек А и В (см. рис. 71 и 162).

В результате расчета двумерной гидромеханической модели верховодки получен напор в центре вытянутой линзы

$$H_{\text{ц}} = 2,6241 \text{ м.}$$

Для сравнения: на нелинеаризованной гидравлической модели

$$H_{\text{ц}} = 2,4915 \text{ м}$$

(см. табл. 9), то есть ниже на 5 %, что допустимо по соображениям инженерной точности. То, что гидравлическая постановка приводит к занижению уровней в сравнении с гидромеханическими (гидродинамическими) решениями при прогнозах подтопления, известно из исследований А.Ж. Муфтахова [156]. Для наших исследований приведенный результат показателен, так как он позволяет использовать для моделирования фильтрации воды со свободной поверхностью нелинейные гидравлические постановки по Буссинеску.

Простой случай моделирования подпора рекой уровня грунтовых вод поймы рассмотрен в примере 58. Кроме того, в ходе проведения аналитических исследований был разработан комбинированный метод автомодельных движений в сочетании с МКР-Excel. Там был рассмотрен подпор от источника подтопления с постоянным напором (см. § 16), выведены формулы автомодельного безразмерного моделирования (197) и (201). Все остальные случаи можно моделировать по одномерным и двумерным формулам § 22 и 23.

Моделирование куполов грунтовых вод при малой мощности водоносного горизонта или в первоначально необводненных грунтах надо проводить в нелинейной гидравлической постановке по Буссинеску. То же относится к моделированию подпора подземных вод зданиями и сооружениями.



При моделировании стационарных задач плановой фильтрации в нелинейной постановке в рамках гидравлической теории фильтрации (по Буссинеску) возникает дополнительная сложность, связанная с выводом стационарных формул моделирования. Формулы моделирования становятся чрезвычайно громоздкими, так как требуют выражения в форме радикалов, выводимых из весьма сложных многочленов.

Выходом из тупикового положения является применение эволюционного метода моделирования стационарных задач или, по-другому, счета на установление [20; 24; 90; 228]. Моделируют нестационарный процесс, который с течением времени становится стационарным (установившимся). Главным требованием является задание такого оптимального шага времени  $Dt_{\text{опт}}$ , при котором стационарный процесс будет достигнут на модели за наименьшее количество шагов времени  $N_t$ . При этом некоторые параметры, связанные лишь с нестационарностью (например, коэффициент водоотдачи или недостаток насыщения  $\mu$ ), могут принимать физически нереальные значения. Однако на это не обращают внимания, так как при переходе к стационарному режиму такие параметры автоматически выпадают.

Наиболее конкретно эволюционный метод моделирования стационарных процессов (счет на установление) описал Н.Н. Калиткин [90]. С учетом его работы изложим суть эволюционного метода моделирования применительно к плановой фильтрации грунтовых вод малой мощности.

Моделирование эволюционным методом стационарной плановой фильтрации грунтовых вод или верховодки можно проделать с помощью нестационарной формулы моделирования (352) из § 22. Рассмотрим случай равномерных пространственных шагов  $Dx$  и  $Dy$  соответственно по горизонтальным декартовым координатам  $x$  и  $y$  (рис. 164). Формулу (352) можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{2\mu_0} & \left[ \frac{k_{0-1}(H_1^S - z_1 + H_0^S - z_0)(H_1^S - H_0^S)}{(Dx)^2} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2}(H_2^S - z_2 + H_0^S - z_0)(H_2^S - H_0^S)}{(Dy)^2} - \frac{k_{0-3}(H_0^S - z_0 + H_3^S - z_3)(H_0^S - H_3^S)}{(Dx)^2} - \\
 & \left. - \frac{k_{0-4}(H_0^S - z_0 + H_4^S - z_4)(H_0^S - H_4^S)}{(Dy)^2} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*},
 \end{aligned}
 \tag{393}$$

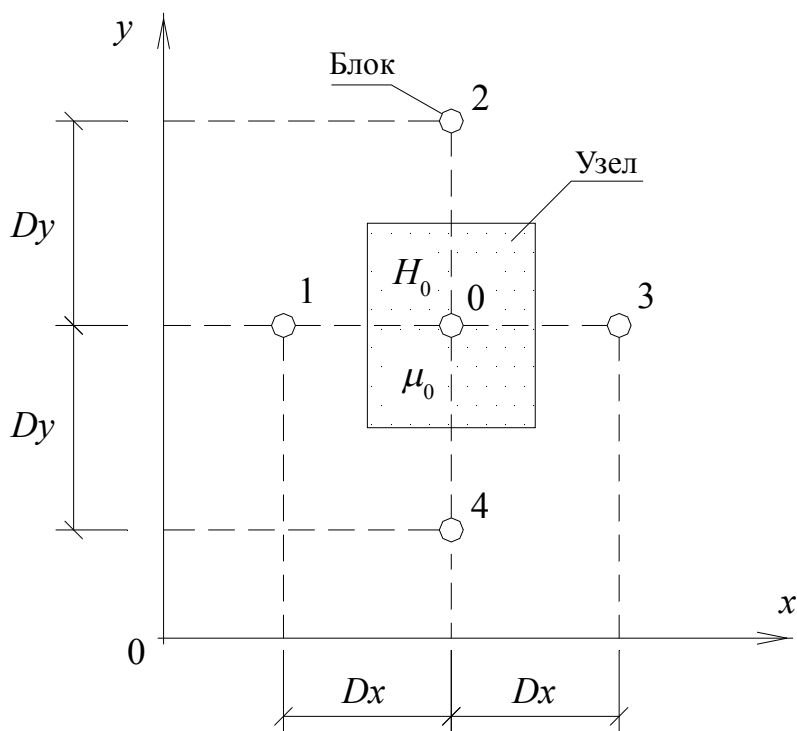


Рис. 164. Схема-шаблон двухмерной модели плановой фильтрации грунтовых вод

где обозначения см. на рис. 164; остальные пояснения см. в § 22 к двумерным формулам плановой фильтрации.

Заметим, что формула (393) относится к явной схеме, при которой надо соблюдать условие устойчивости разностных схем (330) из § 21.

Оптимальный шаг времени  $Dt_{\text{опт}}$  на эволюционной модели можно найти по формуле Н.Н. Калиткина [90, с. 406], записанной в виде

$$Dt_{\text{опт}} = \frac{\mu_{\min} \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2}}{\pi k_{\max} h_{\max} \sqrt{1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2}}, \quad (394)$$

где  $X_{\max}$  и  $Y_{\max}$  — наибольшие характерные размеры по горизонтали моделируемой области фильтрации по направлениям декартовых осей координат соответственно  $x$  и  $y$ . Остальные обозначения см. рис. 164 и пояснение к формуле (329) из § 21.

При моделировании нестационарного процесса фильтрации по явной схеме оптимальный шаг времени  $Dt_{\text{опт}}$  не должен быть больше некоторого максимально возможного шага  $Dt_{\max}$  по условию устойчивости разностной схемы. В рассматриваемом случае двухмерной плановой фильтрации грунтовых вод надо соблюдать условие устойчивости разностной схемы по фор-

муле (330) из § 21. Поэтому вначале моделирования удобнее находить не оптимальный шаг времени  $Dt_{\text{опт}}$ , а оптимальное значение коэффициента водоотдачи (или недостатка насыщения)  $\mu_{\text{опт}}$ , которое с соблюдением условия устойчивости обеспечит оптимальный временной шаг. Сравнивая выражения (330) и (394), найдем формулу для определения оптимального коэффициента водоотдачи (недостатка насыщения) при эволюционном методе моделирования двухмерной плановой фильтрации грунтовых вод в виде

$$\mu_{\text{опт}} = \frac{2\mu_{\min} \left[ 1/(Dx)^2 + 1/(Dy)^2 \right] \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2}}{\pi \sqrt{1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2}}, \quad (395)$$

где  $\mu_{\min}$  — реальный минимальный коэффициент водоотдачи (или недостаток насыщения) в моделируемой области фильтрации. Величина  $\mu_{\text{опт}}$  может принимать физически нереальные значения, например, может получиться больше единицы. Это не должно смущать исследователя, так как  $\mu_{\text{опт}}$  — условная величина, необходимая лишь для быстрого счета на установление.

Наименьшее количество шагов времени  $N_t$ , необходимое для достижения стационарного состояния на эволюционной модели, зависит от величины наперед заданной относительной ошибки или погрешности  $\delta$  расхождения значений напоров на последующем и предыдущем временных шагах. Величину  $N_t$  можно найти по формуле Н.Н. Калиткина [90, с. 406], записанной в виде

$$N_t = \frac{1}{\pi} \left[ (Dx)^2 + (Dy)^2 \right]^{-1/2} \left( 1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2 \right)^{-1/2} \ln \frac{1}{\delta}. \quad (396)$$

Эволюционный метод моделирования продемонстрирован в следующем примере.

#### Пример 64. Прогнозное моделирование подтопления

Продолжим пример 60, то есть прогнозное моделирование влияния зданий комплекса СибАДИ на поток грунтовых вод малой мощности. При схематизации области фильтрации в разрезе было выяснено, что для решения задачи следует использовать нелинейную гидравлическую теорию фильтрации (см. пример 60). Напомним, что решаем стационарную задачу плановой фильтрации при наличии зон неоднородности — пониженной проницаемости — уплотненного супесчаного грунта под зданиями.

Применим эволюционный метод для решения данной стационарной задачи (счет на установление). Пространственные шаги МКР-сетки (см. рис. 151) равны между собой:

$$Dx = Dy = DL = 5 \text{ м.}$$

Поэтому, обозначив эти шаги как  $DL$ , запишем формулу моделирования плановой фильтрации грунтовых вод (393) в виде

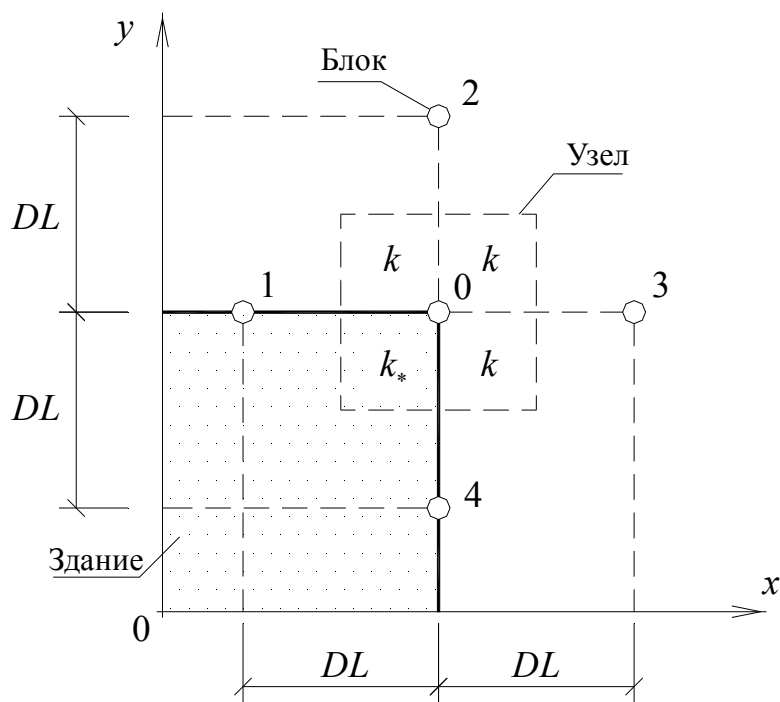


Рис. 165. Схема-шаблон для угла здания в плане

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{2\mu_0(DL)^2} & \left[ k_{0-1} (H_1^S - z_1 + H_0^S - z_0) (H_1^S - H_0^S) + \right. \\
 & + k_{0-2} (H_2^S - z_2 + H_0^S - z_0) (H_2^S - H_0^S) - k_{0-3} (H_0^S - z_0 + H_3^S - z_3) (H_0^S - H_3^S) - \\
 & \left. - k_{0-4} (H_0^S - z_0 + H_4^S - z_4) (H_0^S - H_4^S) \right]. \quad (397)
 \end{aligned}$$

Формула (397) не содержит величин инфильтрации влаги и перетекания в нижележащие пласты. Так принято, чтобы избежать усложнения примера. В реальных ситуациях эти величины должны быть учтены, если они действительно оказывают влияние на уровни подземных вод.

Водоносный пласт имеет коэффициент фильтрации  $k = 1 \text{ м/сут}$ , а под зданиями коэффициент фильтрации уплотненного грунта  $k_* = 0,5 \text{ м/сут}$  (см. пример 60). Центры МКР-блоков совмещаем с контурами зданий в плане. Покажем, как применить формулу моделирования (397) в этом случае. Например, центр МКР-блока совместим на генплане с правым верхним углом здания учебного корпуса № 3 (см. рис. 150). Схема-шаблон для данного случая показана на рис. 165.

Коэффициенты фильтрации в (397) для случая МКР-блока, показанного на рис. 165, осредняются с учетом формулы Г.Н. Каменского (114) из § 13 и записываются в виде

$$k_{0-1} = (k + k_*)/2; \quad k_{0-2} = k; \quad k_{0-3} = k; \quad k_{0-4} = (k + k_*)/2.$$

С такими соотношениями коэффициенты фильтрации надо набирать в формуле моделирования в ячейке Excel, моделирующей узел МКР-блока на рис. 165.

Общая методика подготовки МКР-модели в таблице Excel дана в примере 56. Напомним, что однотипные формулы моделирования (как для схемы-шаблона на рис. 165) надо вводить один лишь раз. Затем формулы копируются в соответствующие ячейки таблицы манипулятором «мышь». При этом однотипные ячейки лучше раскрашивать в определенный цвет. Контуры зданий надо заранее раскрасить в какой-нибудь яркий цвет. Проставить декартовы координаты  $x$  и  $y$  внизу и слева от матрицы модели.

Подготовка рассматриваемой модели занимает около 6 часов неторопливой работы. Особенно тщательно следует вводить формулы моделирования в 1-й раз, чтобы затем размножить копированием их правильные значения по всей матрице модели.

Оптимальный недостаток насыщения для эволюционной модели по формуле (395) в соответствии с исходными данными (см. пример 60):

$$\mu_{\text{опт}} = \frac{2 \cdot 0,05 (1/5^2 + 1/5^2) \sqrt{5^2 + 5^2}}{\pi \sqrt{1/260^2 + 1/240^2}} = 3,175.$$

Несомненно, что такое значение недостатка насыщения физически нереально: один объем грунта не может впитать три объема воды (см. табл. 5 в § 7). Но вспомним, что  $\mu_{\text{опт}}$  — это фиктивная условная величина, необходимая лишь для быстрого счета на установление нестационарной модели.

При наперед заданной погрешности счета напоров  $\delta = 0,0001$  минимально необходимое число шагов времени на эволюционной модели найдем по формуле (396)

$$N_t = \frac{1}{\pi} (5^2 + 5^2)^{-1/2} (1/260^2 + 1/240^2)^{-1/2} \ln \frac{1}{0,0001} = 73,12.$$

Таким образом, если на модели в таблице исходных данных с именами (см. пример 56) задать вместо реальной величины недостатка насыщения  $\mu_{\text{min}} = 0,05$  фиктивную оптимальную величину  $\mu_{\text{опт}} = 3,175$ , то за 70-80 временных шагов можно получить стационарное распределение напоров в грунтовых водах с погрешностью около 0,01 %.

Критерий устойчивости для эволюционной модели по явной схеме при равных пространственных шагах  $Dx = Dy = DL$  можно рассчитать по формуле (331), согласно которой шаг времени на модели не должен превышать

$$Dt_{\text{max}} = \frac{\mu_{\text{онм}} (DL)^2}{4k_{\text{max}} h_{\text{max}}} = \frac{3,175 \cdot (5)^2}{4 \cdot 1 \cdot 4} = 4,96 \text{ сут.}$$

Собираем динамическую МКР-Excel модель (см. пример 58 и рис. 137). Общая схема файла динамической модели, расположенной на одном листе-worksheet таблицы Excel, показана на рис. 166. Подробности сборки пропущены, так как они изложены в предыдущих примерах. Отметим лишь, что в матрице четных шагов времени (см. рис. 166) надо применить функцию Excel ЕСЛИ, о которой рассказано в примере 58. Там же имеется пояснение, как обнулять счетчик итераций.

На компьютере Pentium MMX 200MHz 96 MB RAM меньше чем за 10 секунд с погрешностью около 0,01 % мы получили с помощью МКР-Excel результат в виде поля прогнозных напоров, соответствующее абсолютным отметкам прогнозных УГВ.

Полученное поле абсолютных отметок прогнозных уровней грунтовых вод не очень удобно применять для оценок по защите от подтопления, так как надо скрупулезно

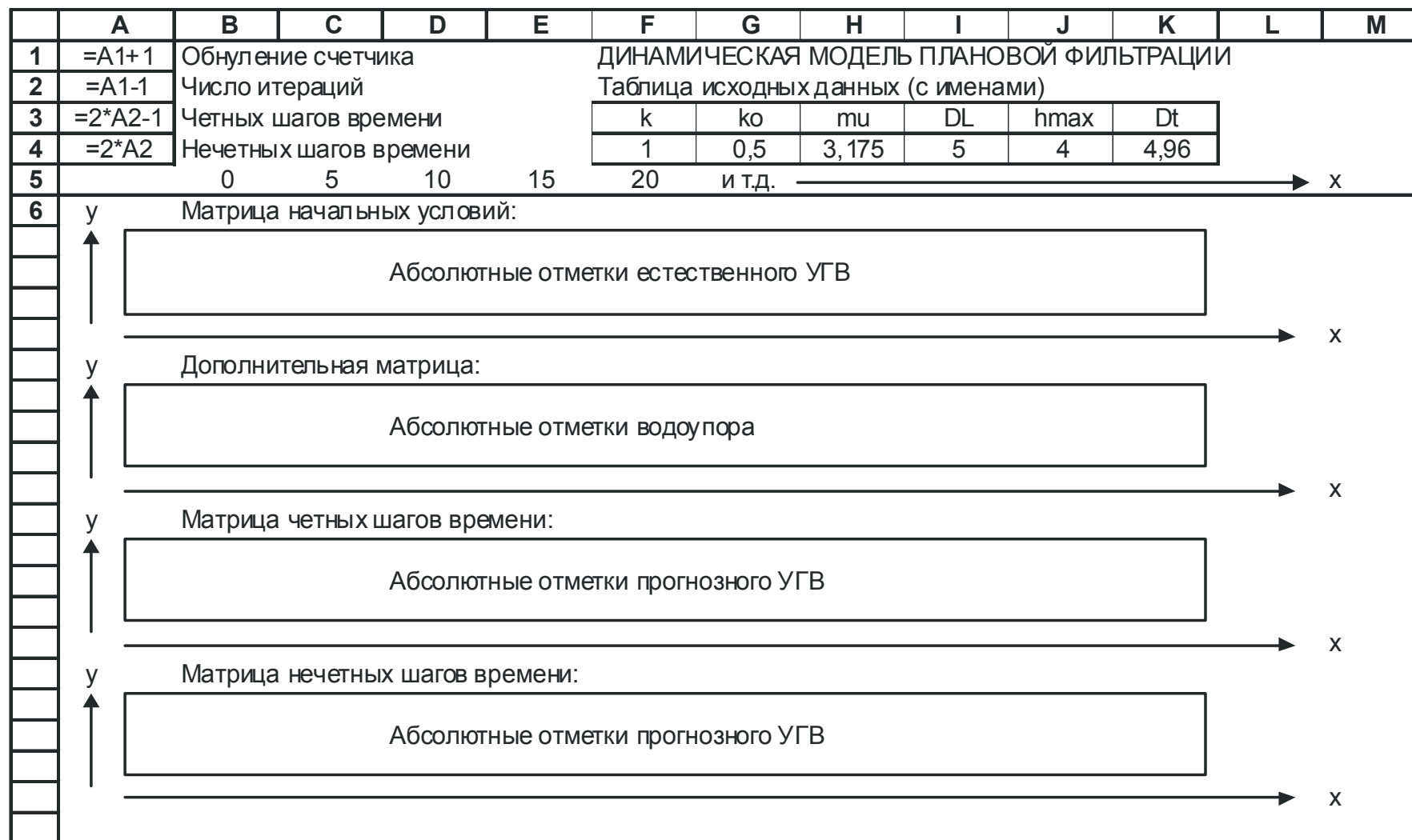


Рис. 166. Схема динамической эволюционной модели плановой фильтрации

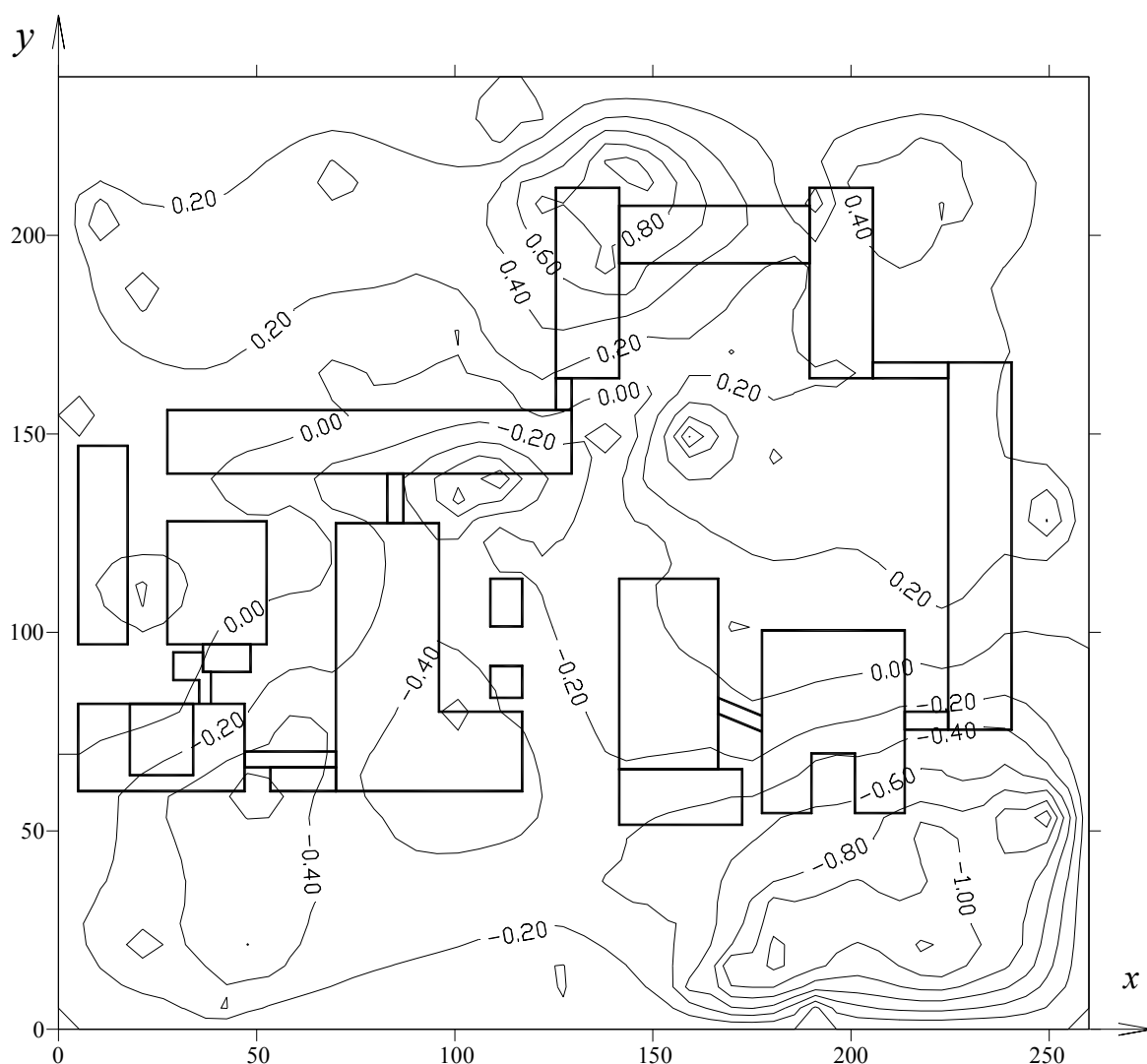


Рис. 167. Прогнозное повышение УГВ на территории СибАДИ

высчитывать разницу его значений  $H_{\text{прог}}$  и значений отметок  $H_{\text{ест}}$  естественного УГВ. Поэтому в Excel была создана дополнительная матрица «Повышение УГВ» как разница прогнозного и естественного УГВ:

$$\Delta h = H_{\text{прог}} - H_{\text{ест}}$$

На основе матрицы «Повышение УГВ» с помощью VBA-макропрограммы ForSurfer (см. прил. 2) и картографической программы Surfer построено поле значений  $\Delta h$ , которое экспортировано в формате файла dxf для AutoCAD. Далее карта повышений вставлена в файл пакета AutoCAD 14 в виде отдельного слоя и совмещена с генпланом СибАДИ. Результат моделирования показан на рис. 167.

Анализируя модельный прогноз подтопления на территории СибАДИ, следует отметить, что максимальное дополнительное повышение УГВ может достигать 1 метра. Так как для данной территории норма осушения равна 2 метра (см. табл. 1), то даже от барражного эффекта зданий возникает подтопление при минимальной глубине залегания УГВ около 1,5 м. Заметим, что в данном примере мы не учитывали дополнительную инфильтрацию влаги и утечки из водонесущих коммуникаций. А они дополнительно повышают УГВ, что увеличивает подтопление территории. Ситуацию по защите от подтопления СибАДИ можно поправить устройством защитного дренажа.

## § 28. *Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа*

Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа имеет сходную методику, как и аналитические методы расчета, рассмотренные в § 17. Моделирование целесообразно применять, когда аналитические методы дают заведомо неточные результаты, крайне усложняются или вообще неприменимы. Вот примеры таких случаев:

- 1) при переменных во времени режимах работ по водоотливу, водопонижению, с возможными остановами технологического оборудования, при временном затоплении строительных выемок и выработок, при изменении их размеров (разработка, засыпка или устройство гидроизоляционной обделки);
- 2) в стесненных условиях городской застройки при существенной природной и техногенной неоднородности области фильтрации в плане, разрезе и анизотропии;
- 3) при грунтовых водах малой мощности, когда понижения УГВ почти равны толщине водоносного слоя в сочетании со сложной плановой конфигурацией строительных выемок и выработок;
- 4) при применении комбинированных способов водопонижения, например электроосмотического с вакуумным водопонижением, требующих совместного учета закономерностей электроосмоса, фильтрации воды, воздуха и т.д.;
- 5) когда фильтрационные потоки имеют существенно двухмерный и даже трехмерный характер движения, например в лучевой дренаж.

*Моделирование строительного водоотлива.* Общая методика моделирования водоотлива с помощью МКР-Excel вбирает в себя все полезные приемы моделирования, рассмотренные в предыдущих параграфах и примерах.

Как уже было сказано в § 17, при проектировании водоотлива необходимо составить прогноз водопритоков, понижений УПВ и оценить возможные последствия применения водоотлива на разрабатываемые грунты и окружающую территорию застройки. Так как водоотлив предназначен в основном для стадии строительства, то его нужно рассчитывать при нестационарном режиме фильтрации. Существующие методики фильтрационного расчета водоотлива используют приближенную линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации [198; 199]. Покажем примером моделирования с помощью МКР-Excel, какая может быть ошибка при этом и как можно точно моделировать положение свободной поверхности УГВ и водопритоки при водоотливе.



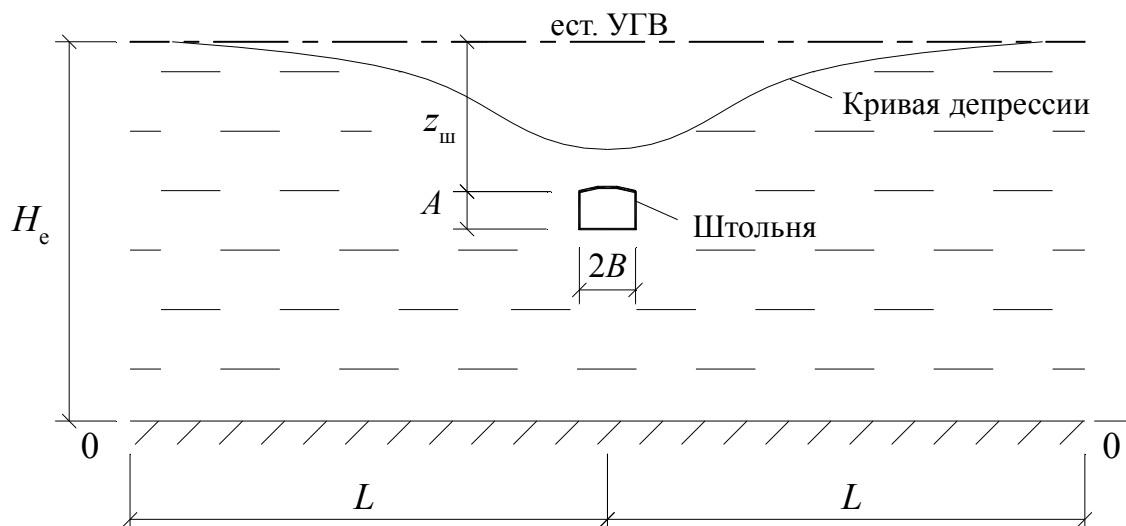


Рис. 168. Схематический разрез с дренажной штольной

### Пример 65. Моделирование водоотлива из дренажной штольни

Строительство глубоких транспортных тоннелей является весьма сложным делом в условиях обводненных трещиноватых участков зон выветривания и тектонического дробления, когда возможны неожиданные прорывы подземных вод в тоннели. Это было отмечено в конце XIX века профессором И.В. Мушкетовым при геологических изысканиях для строительства Кругобайкальской железной дороги [266]. Такие же условия были встречены на трассе Байкало-Амурской магистрали (БАМа). Данный пример актуален для подземного строительства в городах, расположенных в пределах горных стран с тектоническими разломами. Кроме того, здесь показан точный метод гидродинамического моделирования нестационарной изменяющейся свободной поверхности УГВ с помощью динамической МКР-Excel модели. Метод прост и эффективен.

А.Б. Сотников [267] произвел аналитическим методом гидрогеологические прогнозы водопритоков и понижения УПВ для тоннелей БАМа, используя приближенную линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации. Про моделируем один из его примеров расчета для выяснения степени погрешности приближенной теории. Модель МКР-Excel построим как гидродинамическую для двухмерной профильной нестационарной безнапорной фильтрации подземных вод, то есть в довольно точной постановке.

Пионерным технологическим тоннелем, опережающим строительство основного тоннеля, является дренажная штольня. Она должна принять на себя основной водоприток и понизить УПВ. Поперечное, почти прямоугольное сечение штольни имеет высоту  $A = 5$  м и ширину  $2B = 7,5$  м с периметром  $P = 25$  м (рис. 168). Горизонтальная выработка пересекает перпендикулярно обводненную тектоническую зону гранитоидов (пласт-полосу в плане) на всю ширину полосы  $L_3 = 20$  м, к которой приурочен безнапорный водоносный горизонт первоначальной мощностью  $H_e = 300$  м с коэффициентами фильтрации  $k = 5$  м/сут и уровнепроводности  $a = 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. По обе стороны от штольни пласт-полоса простирается на расчетное расстояние [267] зон влияния  $L = 8000$  м. Верх штольни заглублен под естественный уровень грунтовых вод (УГВ) на величину  $z_{ш} = 100$  м. Такова исходная техническая и гидрогеологическая информация [267, с. 24]. Требуется найти водопритоки в штольню и время снижения УГВ до верха штольни.

Модель МКР-Excel построим с учетом имеющихся в наличии исходных данных. Так как фильтрационный поток в штольню симметричен, то за длину области фильтрации принимаем правое  $L$ . По вертикальной оси симметрии, проходящей через центр штольни, проводим границу 2-го рода как водоупор (ГУ2). Отсчет фильтрационных напоров производим от горизонтальной плоскости 0-0, совмещенной с водоупорной подошвой (см. рис. 168). Исходное распределение напоров в пласте всюду равно  $H_e$ , за исключением контура штольни. УГВ является ГУ 2 с дополнительным условием (106). Правее области фильтрации находится контур питания с постоянным напором  $H_e$  — это ГУ1.

Таким образом, первоначальные размеры области фильтрации: по длине  $L = 8000$  м, по высоте  $H_e = 400$  м. Соотношение  $H_e / L = 400 / 8000 = 0,05$ . По критерию (104) можно использовать гидравлическую теорию фильтрации с пренебрежением вертикальных составляющих скорости фильтрации. Однако в данной задаче как раз и надо найти время снижения УГВ до верха штольни, существенно зависящее от вертикальной скорости фильтрации. Кроме того, штольня обладает большой степенью гидродинамического несовершенства, так как расположена высоко над водоупором (см. рис. 168). Поэтому для моделирования принимаем гидродинамическую постановку. Необходимо собрать модель МКР-Excel для профильной (плоской) нестационарной двухмерной фильтрации в однородном изотропном пласте.

Основная формула моделирования может быть записана на основе общей формулы (353) в декартовой системе координат  $x$  и  $z$ , со схемой-шаблоном, показанным на рис. 143. Формула имеет вид

$$H_0^{S+1} = H_0^S + 2aDt \left[ \frac{H_1^S - H_0^S}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{H_2^S - H_0^S}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_4)} - \frac{H_0^S - H_3^S}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{H_0^S - H_4^S}{(z_0 - z_4)(z_2 - z_4)} \right]. \quad (398)$$

Другие частные формулы моделирования при расположении узлов сетки на контакте с водоупором могут быть легко получены из (398). Покажем, как это делать.

Для узла сетки на контакте с горизонтальным водоупором (рис. 169, а) формула моделирования выводится с помощью балансового принципа А.А. Самарского, как в § 22, и имеет вид

$$H_0^{S+1} = H_0^S + 2aDt \left[ \frac{H_1^S - H_0^S}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{H_2^S - H_0^S}{(z_2 - z_0)2(z_2 - z_0)} - \frac{H_0^S - H_3^S}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} \right].$$

Для горизонтальной поверхности УГВ (или почти горизонтальной) эту формулу надо «перевернуть». Кроме центрального узла 0 формула для УГВ содержит лишь три узла: 1, 3 и 4. Замечаем, что в формуле надо просто исключать соответствующие отсутствующие узлы, а некоторые расстояния удваивать (см. рис. 169).

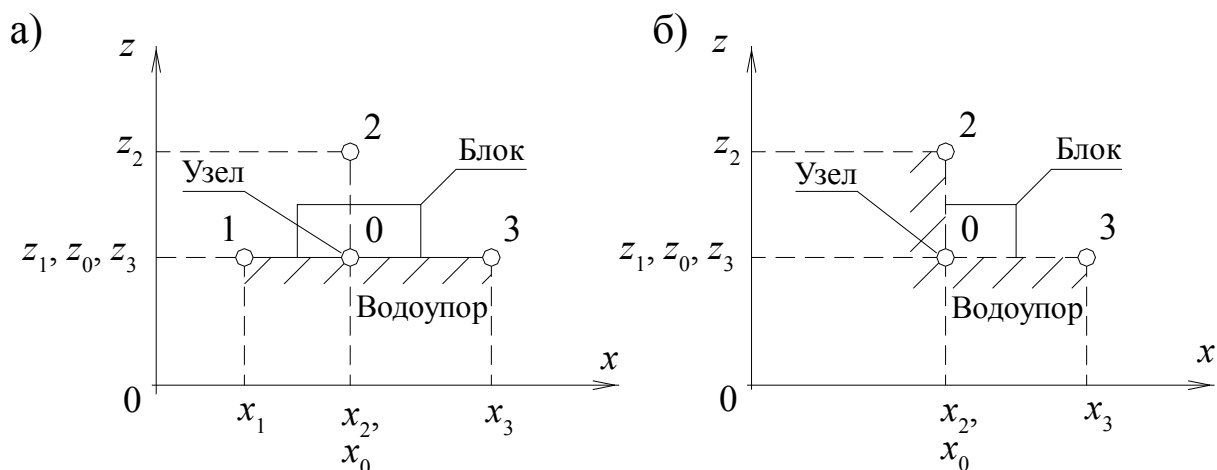


Рис. 169. Схемы-шаблоны: а — на горизонтальном водоупоре; б — в углу водоупора

Также по аналогии запишем для узла в угловом контакте водоупора (см. рис. 169, б) формулу моделирования в виде

$$H_0^{S+1} = H_0^S + 2aDt \left[ -\frac{H_0^S - H_3^S}{(x_3 - x_0)2(x_3 - x_0)} - \frac{H_0^S - H_4^S}{(z_0 - z_4)2(z_0 - z_4)} \right].$$

Этот узел находится на водоупоре точно под центром штольни (см. рис. 168). Формулы для других узлов получаются также просто.

Как видно по выписанным формулам, пространственные шаги приняты неравномерные. Это обусловлено тем, что основное возмущение фильтрационного потока происходит около штольни. Поэтому рядом с ней надо шаг сетки измельчить, а на удалении шаг можно назначить крупный.

По вертикали основным диктующим размером является высота штольни. Поэтому минимальный вертикальный шаг МКР-сетки принят  $DZ_{\min} = 5 \text{ м}$ . Другие шаги показаны на рис. 170. По горизонтали шаг сетки принят по формуле В.С. Усенко (328), так как влияние дренажной штольни ослабляется на удалении от нее. В данном случае формула (328) имеет вид

$$x_{i+1} = x_i \exp \left[ \frac{\ln(L/DX_{\min})}{N_{\text{ш}}} \right],$$

где обозначения см. по аналогии к формуле (328). Обратим внимание, что минимальный шаг  $DX_{\min}$  — это не всегда ближайший к началу координат шаг. Правда, в данном случае он как раз такой:  $DX_{\min} = 3,75 \text{ м}$  (половина ширины штольни). Подробности по введению формулы В.С. Усенко в ячейки Excel, имитирующие ось  $x$ , даны в примере 57.

Все применяемые формулы моделирования имеют явный вид. Поэтому для них надо проверить критерий устойчивости (330), по которому максимально возможный на модели шаг времени

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a} \left[ \frac{1}{DX_{\min}^2} + \frac{1}{DZ_{\min}^2} \right]^{-1} = \frac{1}{2 \cdot 10^5} \left[ \frac{1}{3,75^2} + \frac{1}{5^2} \right]^{-1} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ сут.}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	525001	Обнуление счетчика												
2	525000	Прошло итераций												
3	1049999	Нечетных шагов Dt												
4	1050000	Четных шагов Dt												
5	42	Время, сут												
		Матрица начальных условий:												
														X
6	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
7	250	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
8	205	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
9	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
10	195	195	195	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
11	190	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
12	150	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
13	100	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
14	0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
15	Нечет Dt	0	3.75	7.5279	15.112	30.336	60.897	122.25	245.4	492.633	988.93	1985.2	3985	8000
16	300	205.324	205.33	205.34	205.39	205.56	206.15	207.92	211.81	219.044	232.65	256.94	288.3	300
17	250	204.155	204.17	204.2	204.3	204.64	205.64	207.84	211.84	219.05	232.65	256.94	288.3	300
18	205	200.89	200.949	201.08	201.58	202.87	205.03	207.84	211.9	219.06	232.65	256.94	288.3	300
19	200	200	200	200.01	201.08	202.75	205.03	207.86	211.91	219.061	232.65	256.94	288.3	300
20	195	195	195	198.32	200.64	202.67	205.04	207.88	211.92	219.063	232.65	256.94	288.3	300
21	190	198.186	198.494	199.16	200.58	202.65	205.07	207.9	211.93	219.064	232.65	256.94	288.3	300
22	150	203.943	203.972	204.03	204.21	204.74	205.98	208.23	212.03	219.077	232.65	256.94	288.3	300
23	100	206.536	206.542	206.55	206.6	206.75	207.28	208.79	212.17	219.094	232.65	256.94	288.3	300
24	0	208.377	208.379	208.38	208.4	208.47	208.73	209.64	212.43	219.124	232.65	256.94	288.3	300
25	Чет Dt	0	3.75	7.5279	15.112	30.336	60.897	122.25	245.4	492.633	988.93	1985.2	3985	8000
26	300	205.324	205.33	205.34	205.39	205.56	206.15	207.92	211.81	219.044	232.65	256.94	288.3	300
27	250	204.155	204.17	204.2	204.3	204.64	205.64	207.84	211.84	219.05	232.65	256.94	288.3	300
28	205	200.89	200.949	201.08	201.58	202.87	205.03	207.84	211.9	219.06	232.65	256.94	288.3	300
29	200	200	200	200.01	201.08	202.75	205.03	207.86	211.91	219.061	232.65	256.94	288.3	300
30	195	195	195	198.32	200.64	202.67	205.04	207.88	211.92	219.063	232.65	256.94	288.3	300
31	190	198.186	198.494	199.16	200.58	202.65	205.07	207.9	211.93	219.064	232.65	256.94	288.3	300
32	150	203.943	203.972	204.03	204.21	204.74	205.98	208.23	212.03	219.077	232.65	256.94	288.3	300
33	100	206.536	206.542	206.55	206.6	206.75	207.28	208.79	212.17	219.094	232.65	256.94	288.3	300
34	0	208.376	208.379	208.38	208.4	208.47	208.73	209.64	212.43	219.124	232.65	256.94	288.3	300
35		0	3.75	7.5279	15.112	30.336	60.897	122.25	245.4	492.633	988.93	1985.2	3985	8000

Рис. 170. Линеаризованная динамическая модель дренажной штольни

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	212501	Обнуление счетчика				Таблица исходных данных (с именами)								
2	212500	Прошло итераций				He	a	DXmin	DZmin	Dtmax	Dt	k		
3	424999	Нечетных шагов Dt				300	100000	3.75	5	0.000045	4E-05	5		
4	425000	Четных шагов Dt												
5	17	Время, сут				Матрица начальных условий:								X
6	Z ↑	300	300	300	300	217.999	219.5	224.43619	235.00751	252.9	279.4	297.53	299.9	300
7		250	212.137	212.2	212.31	212.697	213.981	217.7	224.23848	235.10688	253	279.4	297.53	299.9
8		205	203.82	204.15	204.84	206.776	210.689	216.7	224.44016	235.31262	253	279.4	297.53	299.9
9		200	200	200	202.47	206.092	210.651	216.8	224.51091	235.34275	253	279.4	297.53	299.9
10		195	195	195	200.88	205.798	210.72	216.9	224.59137	235.3743	253	279.4	297.53	299.9
11		190	201.425	202.02	203.29	206.215	210.922	217.1	224.68146	235.40724	253	279.4	297.53	299.9
12		150	214.946	215.01	215.13	215.542	216.778	219.8	225.74231	235.7188	253	279.4	297.53	299.9
13	Чет Dt ↑	100	221.617	221.63	221.66	221.771	222.161	223.5	227.37947	236.16715	253.1	279.4	297.53	299.9
14		0	226.554	226.56	226.57	226.62	226.794	227.4	229.79621	236.93051	253.2	279.4	297.53	299.9
15		300	0	3.75	7.5279	15.1117	30.3359	60.9	122.24744	245.40391	492.6	988.9	1985.2	3985
16		250	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	274.73	296.5
17		205	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	247.5	274.73
18		200	200.149	200.23	200.45	201.625	204.431	208.7	214.06919	220.05429	230.5	247.5	274.73	296.5
19		195	200	200	200.02	201.561	204.481	208.7	214.04285	220.05691	230.5	247.5	274.73	296.5
20	Чет Dt ↑	190	195	195	198.71	201.523	204.589	208.8	214.02678	220.0603	230.5	247.5	274.73	296.5
21		150	198.953	199.32	200.1	201.856	204.767	208.8	214.02061	220.06449	230.5	247.5	274.73	296.5
22		100	207.318	207.36	207.44	207.691	208.473	210.5	214.31277	220.1273	230.4	247.5	274.73	296.5
23		0	211.4	211.41	211.43	211.498	211.746	212.6	215.04918	220.26349	230.3	247.5	274.73	296.5
24		300	214.316	214.32	214.33	214.357	214.464	214.9	216.30201	220.56433	230.3	247.5	274.73	296.5
25		250	0	3.75	7.5279	15.1117	30.3359	60.9	122.24744	245.40391	492.6	988.9	1985.2	3985
26		205	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	274.73	296.5
27	Чет Dt ↑	200	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	247.5	274.73
28		195	200.149	200.23	200.45	201.625	204.431	208.7	214.06917	220.05427	230.5	247.5	274.73	296.5
29		190	200	200	200.02	201.561	204.481	208.7	214.04284	220.05689	230.5	247.5	274.73	296.5
30		150	195	195	198.71	201.523	204.589	208.8	214.02676	220.06028	230.5	247.5	274.73	296.5
31		100	198.953	199.32	200.1	201.856	204.767	208.8	214.02059	220.06447	230.5	247.5	274.73	296.5
32		0	207.318	207.36	207.44	207.691	208.473	210.5	214.31276	220.12728	230.4	247.5	274.73	296.5
33		300	211.4	211.41	211.43	211.498	211.746	212.6	215.04917	220.26347	230.3	247.5	274.73	296.5
34	Чет Dt ↑	250	214.316	214.32	214.33	214.357	214.464	214.9	216.30199	220.56431	230.3	247.5	274.73	296.5
35		0	0	3.75	7.5279	15.1117	30.3359	60.9	122.24744	245.40391	492.6	988.9	1985.2	3985

Рис. 172. Точная динамическая модель дренажной штольни

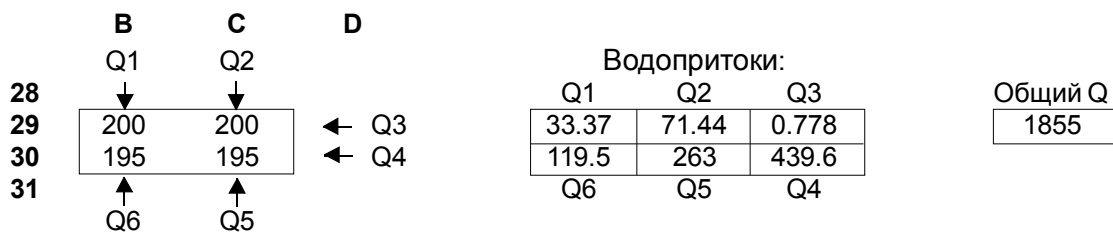


Рис. 171. К расчету водопритоков в дренажную штольню на линеаризованной гидродинамической модели ( $t = 42 \text{ сут}$ )

Для удобства моделирования принимаем шаг времени  $Dt = 4 \cdot 10^{-5} \text{ сут}$ . Например, число итераций 12500 соответствует  $25000 Dt$  или 1 суткам реального времени.

Заготовка динамической МКР-Excel модели имеет  $13 \times 9 = 117$  узлов-ячеек в матрице (см. рис. 170). Всего в модели три матрицы (сверху вниз): начальных условий, нечетного шага времени и четного шага времени  $Dt$ . Последняя матрица дает результирующее распределение напоров в водоносном пласте.

Расходы подземной воды, притекающих в штольню, определяем почти так же, как в примере 61. Водоприток в штольню происходит при постоянном напоре, так как из штольни производят водоотлив. Поэтому расходы в штольню подсчитываются по напорам матрицы четного шага времени. Их расчет целесообразно организовать в Excel в виде таблицы единичных расходов (по закону Дарси), которую надо поместить под матрицей четного  $Dt$  — это связано с направлением итерационного счета в Excel. В качестве контрольного примера приводим расчет водопритоков на момент времени  $t = 42 \text{ сут}$ , показанный на рис. 171, который надо сопоставить с рис. 170.

Покажем достаточно точную методику моделирования двухмерного в разрезе нестационарного потока грунтовых вод со свободной поверхностью. План дальнейшего моделирования такой:

- 1) вначале поработать с линеаризованной гидродинамической моделью (см. рис. 170), на которой определить необходимые интервалы времени, на которых кривую депрессии УГВ можно считать почти неподвижной;
- 2) затем на точной гидродинамической модели определить водопритоки и истинное положение кривой депрессии УГВ.

Таким образом, вначале работаем с динамической МКР-Excel моделью, изображенной на рис. 170. Ее особенностью является то, что условие на свободной поверхности (106) мы снесли на неподвижную горизонтальную водоупорную линию с отметкой напора  $H_e = 300 \text{ м}$ . Это несколько напоминает прием, введенный профессором А.Ж. Муфтаховым в аналитические методы расчета фильтрации со свободной поверхностью в двухмерной гидродинамической постановке [156, с. 13], однако он применял снос условия (106) на отметку средней мощности водоносного пласта. Линеаризованная гидродинамическая модель работает по схеме напорной фильтрации в пласте с постоянной мощностью  $H_e$ .

Прodelана имитация дренирования пласта штольней на линеаризованной модели до момента  $42 \text{ сут}$  (см. рис. 170). По снижению напора над штольней намечены три интервала времени:

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 0,2 \text{ сут}; \\ 0,2 \text{ сут} &\leq t \leq 5 \text{ сут}; \\ 5 \text{ сут} &\leq t. \end{aligned}$$

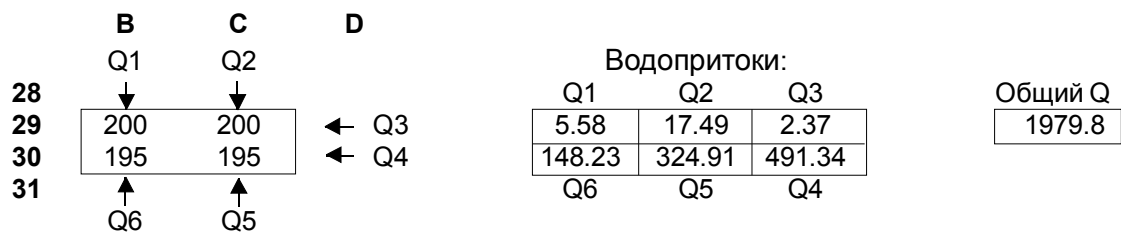


Рис. 173. Водопритоки в штольню на точной гидродинамической модели ( $t = 22,2 \text{ сут}$ )

В течение первого интервала  $0 \leq t \leq 0,2 \text{ сут}$  мощность пласта можно брать равной  $H_c$ . На втором интервале  $0,2 \text{ сут} \leq t \leq 5 \text{ сут}$  отметку кривой депрессии над штольной можно принять равной 250 м, а остальную ее часть корректировать по условию (106). На третьем интервале  $t \geq 5 \text{ сут}$  мощность УГВ над штольной можно зафиксировать на отметке 205 м, а в других точках — откорректировать по (106). Фиксацию мощности не надо понимать как фиксацию напора, так как напор все равно будет меняться нестационарно.

При достижении границы каждого намеченного временного интервала надо совершить следующие действия:

- 1) скопировать числовые значения из матрицы четного шага  $Dt$  на место матрицы начальных условий;
- 2) откорректировать на матрицах нечетного и четного шага кривую депрессии по условию (106);
- 3) обнулить счетчик итераций, тогда счет времени начнется с нового отсчета, который надо прибавлять к предыдущему отсчету, чтобы отсчет времени был единый;
- 4) запустить модель на счет клавишей F9.

Моделирование завершится, когда УГВ достигнет верха штольни, а единичные расходы в кровле штольни (с погрешностью менее 5 %) уменьшатся почти до нуля. На рис. 172 показано такое состояние модели, а на рис. 173 дана таблица водопритоков в штольню по истечении времени  $t = 22,2 \text{ сут}$ . В ячейке A5 видно значение времени 17 сут. Так как это последний интервал счета модели, то в сумме с предыдущими интервалами получается  $0,2 + 5 + 17 = 22,2 \text{ сут}$ .

Проанализируем полученные результаты. Время опускания УГВ до отметки верха штольни по данным точного гидродинамического моделирования составило 22,2 сут. По аналитическим расчетам А.Б. Сотникова [267], оно равно 160 сут. Отличие значений в  $160 / 22,2 = 7,2$  раза — довольно существенное. Сильную погрешность аналитического расчета можно объяснить тем, что гидравлическая теория фильтрации пренебрегает вертикальными компонентами скоростей. Впрочем, А.Б. Сотников и сам оговорил в [267], что его расчеты носят скорее качественный, чем количественный характер.

По анализу водопритоков выводы такие же. Например, А.Б. Сотников пишет [267, с. 24], что «... водоприток в горизонтальную дрена, заглубленную под уровень грунтовых вод, определяется в основном вертикальным потоком, входящим через ее верхнюю границу при гидравлическом градиенте, практически равном единице...». По данным нашего гидродинамического моделирования получается наоборот, даже в начальный период водоприток со дна штольни больше, чем с ее кровли. С течением времени эта разница все более увеличивается (см. рис. 173). Вообще следует отметить, что несовершенные дрена, то есть находящиеся значительно выше водоупора, интенсивно работают дном. Такую же закономерность отмечал и Д. Киркхем (D. Kirkham) [75].

*Моделирование строительного водопонижения.* Методику моделирования строительного водопонижения целесообразно рассмотреть для электроосмотического водопонижения, совмещенного с эжекторным вакуумным водопонижением. При этом одновременно, для широты изложения, затронем следующие разновидности методики моделирования:

- 1) для электроосмотической фильтрации;
- 2) нелинейной (по Буссинеску) безнапорной фильтрации воды;
- 3) фильтрации воздуха;
- 4) гидравлики трубопроводов.

Основным конструктивным и гидравлическим элементом при строительном водопонижении являются скважины, которые чаще всего изготавливаются из стальных труб. При подсоединении к скважине отрицательного полюса источника постоянного тока с общим напряжением в пределах 36-60 В [223] ее превращают в катод, куда по закону электроосмоса притекает вода из грунта (см. § 11).

Наиболее актуальным в условиях городского строительства является моделирование строительного водопонижения при фильтрации в плане. При этом в первую очередь надо схематизировать область фильтрации. Общие принципы схематизации изложены в § 13 и 24.

Так как строительное водопонижение по требованиям технологии [241; 281; 282] стремятся провести по возможности в сжатые сроки, то процессы фильтрации и сопутствующие им явления обычно происходят в нестационарном режиме.

Выяснив в первую очередь, какие подземные воды залегают на площадке строительства, определяют в случае грунтовых безнапорных вод, можно ли применить для моделирования гидравлическую теорию фильтрации в соответствии с критериями (102) – (104) из § 13.

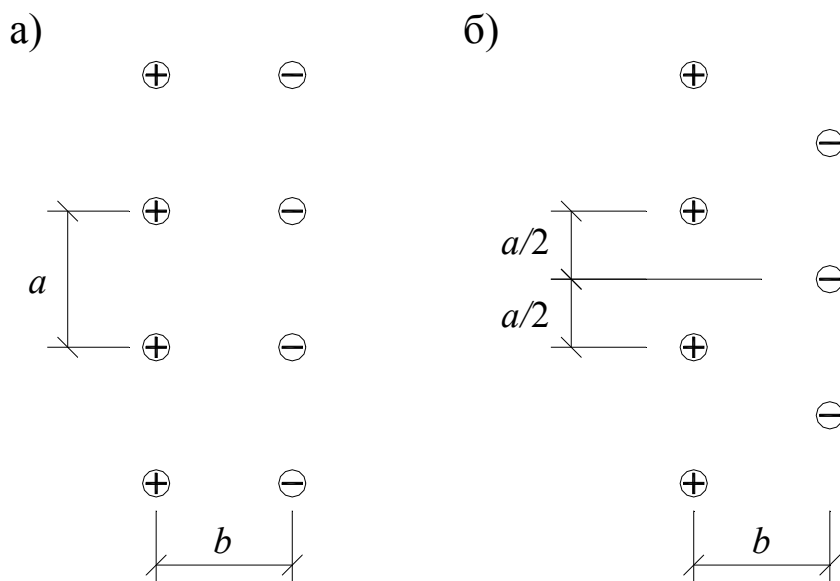
Если гидрогеологические условия позволяют применить линеаризованную гидравлическую теорию, то следующим шагом находят зоны влияния водопонижения по формуле (109). Нелинеаризованные (по Буссинеску) гидравлические постановки задач могут возникнуть в случае грунтовых вод малой мощности. Тогда зоны влияния строительного водопонижения можно найти по нашим формулам (267) и (278) (см. § 17).

Определив размеры области фильтрации при водопонижении, нужно покрыть ее конечно-разностной сеткой. Так как основным элементом систем водопонижения являются скважины, то пространственный шаг сетки целесообразно связывать с радиусами скважин. Каждую скважину-электрод с известным радиусом  $r_s$  (см. рис. 145) в плане целесообразно окружить квадратной сеткой с шагом  $DL$  по формуле (357), записанной в виде

$$DL = r_s \exp(\pi/2). \quad (399)$$



Рис. 174. Схемы  
расположения  
электродов в плане:  
а — ортогональная;  
б — шахматная



При таком задании квадратного шага сетки  $DL$  скважина-электрод радиусом  $r_*$  моделируется лишь одним точечным узлом-ячейкой МКР-сетки. Это чрезвычайно удобно при работе с моделями, описывающими плановые процессы фильтрации в горизонтальной плоскости. Этот же прием рекомендуется использовать для горизонтальных дрен радиусом  $r_d = r_c$  в формуле (357) при моделировании профильных задач в вертикальной плоскости.

Другие объекты — контуры зданий, фундаментов, участков уплотненных грунтов и т.д. — можно вписывать в сетку модели с неравномерным шагом.

Формулы моделирования фильтрации воды можно выбрать из § 22 и упростить по мере надобности, как это было показано в предыдущих примерах. В большинстве случаев можно обойтись нестационарными формулами моделирования по явным схемам. При этом надо соблюдать критерии устойчивости по формулам (330) – (331) при назначении шага времени  $Dt$ .

Формулы моделирования для фильтрации воздуха и электроосмотической фильтрации легко выводятся с помощью балансового принципа А.А. Самарского, неоднократно продемонстрированного на примерах в нашей работе. При этом можно использовать общие закономерности этих процессов, изложенные в § 8 и 11. Эти процессы во многом аналогичны фильтрации воды, поэтому вывод формул моделирования не представляет трудностей.

В ходе проектирования систем электроосмотического водопонижения возникает специфическая задача определения затрат электроэнергии. Аналитический метод расчета электроэнергии изложен в [223, с. 39-40 и с. 79]. Упомянутая методика была разработана для расположения разнополюсных электродов в виде двойных рядов: в ортогональном и шахматном порядке (рис. 174).

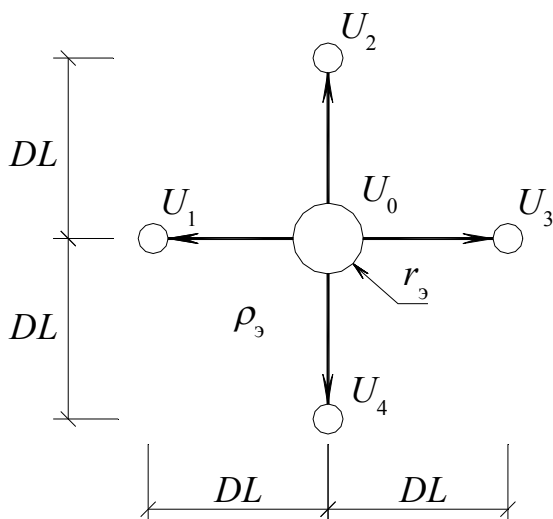


Рис. 175. Схема-шаблон электрода

С помощью МКР-Excel моделированием можно достаточно точно определить затраты электроэнергии при любом произвольном расположении электродов установки электроосмотического водопонижения.

Ток в отдельный однополюсный электрод с учетом закона Ома и правила Кирхгофа [123] можно определить по формуле

$$I_j = \frac{L_3}{\rho_3} \left( 4U_0 - \sum_{i=1}^4 U_i \right), \quad (400)$$

где  $L_3$  — длина электрода на контакте с токопроводящим грунтом, м;  $\rho_3$  — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;  $U_0$  — потенциал электрода (рис. 175), В;  $U_i$  — потенциалы на ближайших узлах МКР-Excel-модели при квадратной сетке около электрода с шагом  $DL$  по (399). В данной формуле использовано допущение, как и в [223], что электрический ток поступает в вертикальные электроды в виде планового потока в пределах мощности грунта  $L_3$ .

Возможен случай, когда разнополюсные электроды имеют разные радиусы, один из радиусов  $r_3$  соответствует, а другой не соответствует условию (399). Тогда в ячейке Excel, имитирующей электрод с потенциалом  $U_3$  и радиусом  $r_3$ , не соответствующим условию (399), надо задать потенциал так:

$$U_0 = \left( U_3 + \alpha \sum_{i=1}^4 U_i / 4 \right) / (1 + \alpha); \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_3} - 1. \quad (401)$$

Данная формула аналогична формуле (359) для напорной скважины.

Формула моделирования электрических потенциалов в грунте при неравномерном пространственном шаге конечно-разностной сетки для стационарной плановой модели имеет вид

$$U_0 = \left[ \frac{U_1}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{U_2}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} + \frac{U_3}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} + \right.$$

$$+\frac{U_4}{(y_0-y_4)(y_2-y_4)}\bigg]\bigg/\bigg[\frac{1}{(x_0-x_1)(x_3-x_1)}+\frac{1}{(y_2-y_0)(y_2-y_4)}+\frac{1}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)}+\frac{1}{(y_0-y_4)(y_2-y_4)}\bigg], \quad (402)$$

где пространственные координаты надо задавать так же, как на рис. 142.

Общий ток в системе электроосмотического водопонижения определяется как сумма токов отдельных однополюсных электродов,  $A$ :

$$I = \sum_{j=1}^{N_3} I_j, \quad (403)$$

где  $N_3$  — число однополюсных электродов.

Затраты электроэнергии при работе установки электроосмотического водопонижения можно найти по известной формуле [123], Дж:

$$W = IUt. \quad (404)$$

Здесь  $U$  — общее электрическое напряжение в системе (разность потенциалов), В;  $t$  — время работы установки под напряжением, с. Полученное значение расхода электроэнергии  $W$  можно перевести из джоулей в киловатт-часы по формуле:  $3600000 \text{ Дж} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ .

Электрическое сопротивление отдельного электрода можно найти из (400) по закону Ома так:

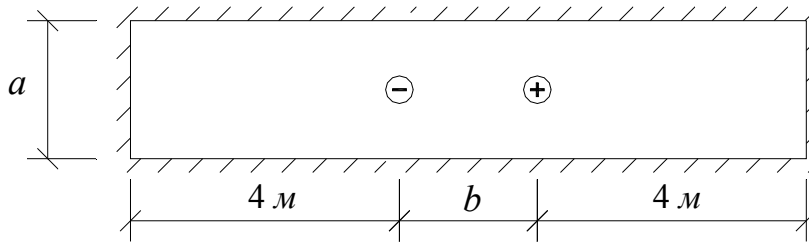
$$R_{3j} = \frac{\rho_3 U}{L_3 \left( 4U_0 - \sum_{i=1}^4 U_i \right)}. \quad (405)$$

Используем полученные формулы для сопоставления электрических сопротивлений электрода, полученных моделированием, с сопротивлениями, вычисленными аналитическим путем по методике [223].

#### Пример 66. Моделирование сопротивления электрода в грунте

Определим с помощью МКР-Excel сопротивление одного электрода в рядах по ортогональной и шахматной схеме (см. рис. 174) системы электроосмотического водопонижения. Длина электродов  $L_3 = 6 \text{ м}$ , габариты размещения электродов в ряду  $a = 1,2 \text{ м}$  и  $b = 0,8 \text{ м}$ . Удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho_3 = 12 \text{ ом} \cdot \text{м}$ . Радиус электрода  $r_3 = 0,02079 \text{ м}$  — принят по формуле (399) для шага квадратной сетки  $DL = 0,1 \text{ м}$ .

а)



б)

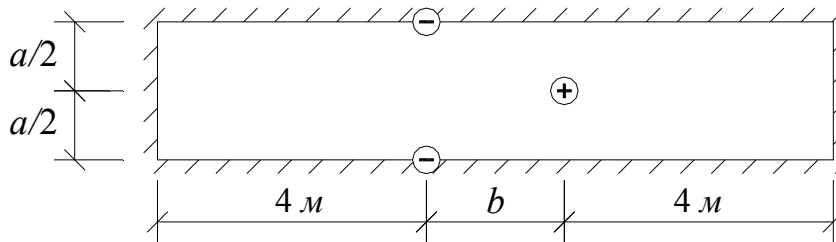


Рис. 176. Схема моделей электродов:  
а — ортогональная; б — шахматная

Моделируем электроды в ряду как в пласте-полосе с ГУ2 — электроизоляцией по контуру (рис. 176). Такой прием вытекает из принципа зеркального отображения [12]. Пласт-полосу можно было бы взять еще уже — шириной  $a/2$ . Однако тогда нужно было бы вносить корректировку в формулу (405), что не желательно. Эта формула полезна при моделировании больших плановых моделей с электроосмосом, поэтому данный пример содержит не только проверку аналитической методики [223], но и апробацию формулы (400), на основе которой получена (405).

Собираем стационарную модель МКР-Excel с квадратной сеткой с шагом  $DL = 0,1$  м. Теоретически пласт-полоса должен быть бесконечным в направлении, перпендикулярном оси ряда. Практически на расстоянии около  $5b = 4$  м можно задать границу 2-го рода с электроизоляцией. Электроды задаем отдельными ячейками Excel, так как шаг  $DL$  соответствует радиусу  $r_s$  по формуле (399). Разность потенциалов можно задать любую, например, на анод единицу, а на катод ноль. В данном случае для нахождения электрического сопротивления это не имеет значения, однако при моделировании с нахождением силы тока — имеет. Формулы моделирования аналогичны (383) и (384), приведенным в табл. 19. Над моделью, как обычно, надо поместить таблицу исходных данных с именами.

Собрав модель, нажимаем F9. При относительной погрешности расчета 0,0000000001 счет модели на компьютере Pentium MMX 200MHz 96 Mb RAM занимает около 2 минут при 20000 итерациях. В результате на модели получено:

а) при ортогональной схеме сопротивление электрода  $R_{эj} = 2,765$  Ом;

б) при шахматной схеме —  $R_{эj} = 2,786$  Ом.

По аналитической методике [223] соответственно получено:

а) при ортогональной схеме

$$R_{эj} = \frac{\rho_3}{L_3} \left( \frac{b}{a} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{a}{2\pi r_s} \right) = \frac{12}{6} \left( \frac{0,8}{1,2} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{1,2}{2\pi \cdot 0,02079} \right) = 2,745 \text{ Ом};$$

б) при шахматной схеме

$$c = 1 + \left( \frac{a}{2b} \right) = 1 + \left( \frac{1,2}{2 \cdot 0,8} \right) = 1,5625,$$

$$R_{\Sigma j} = \frac{\rho_3}{L_3} \left( \frac{b}{a} c + \frac{2}{\pi} \ln \frac{a}{2\pi r_3 \sqrt{c}} \right) =$$

$$= \frac{12}{6} \left( \frac{0,8}{1,2} \cdot 1,5625 + \frac{2}{\pi} \ln \frac{1,2}{2\pi \cdot 0,02079 \sqrt{1,5625}} \right) = 4,623 \text{ Ом}.$$

Формула для ортогональной схемы хорошо совпала с данными моделирования, расхождение значений весьма малое: 0,72 %. Дело в том, что эта формула аналогична хорошо известной формуле Ф. Форхгеймера [299; 334], полученной для ряда скважин у реки. Она приведена в справочном пособии к СНиП [208, с. 198], хорошо проверена на практике.

А вот вторая формула, для шахматного расположения электродов, дает значения электрического сопротивления электродов завышенные на 66 %. Это уже значительная погрешность, приводящая к неоправданному преувеличению расхода электроэнергии при проектировании установок электроосмотического водопонижения.

Самым важным результатом данного примера является иллюстрация эффективности моделирования с помощью МКР-Excel электрических показателей установок электроосмотического водопонижения.

От нормально работающей системы водопонижения требуется, чтобы она осушала область грунта в зоне строительной открытой выемки (траншеи или котлована) или подземной выработки (щитовой проходки). Согласно нормативным документам по защите горных выработок от подземных вод [238], расчет систем водопонижения необходимо производить при неустановившейся фильтрации воды с постоянным напором в скважинах.

Таким образом, на первом этапе моделирование строительного водопонижения следует выполнять чисто по фильтрации воды. При этом надо определить положения кривых депрессий УПВ, время осушения водонасыщенных грунтов, водопитоки к системам водопонижения, выбрать рациональные схемы размещения элементов систем (в основном скважин) на строительной площадке. Все перечисленные характеристики являются наиболее важными для технологии строительного водопонижения, но на этом этапе они определяются весьма приближенно.

На втором этапе — следуя термину В.М. Григорьева [62] «комплексный расчет» — нужно произвести комплексное моделирование, в ходе которого кроме фильтрации воды рассматриваются фильтрация воздуха, а также процессы циркуляции водовоздушной смеси по трубам. Дополнительно подбирают насосное оборудование [26].

Рассматривая методику моделирования вакуумного водопонижения, совмещенного с электроосмотическим, вначале определим план работ с учетом особенностей физических процессов фильтрации воды, воздуха и электроосмоса, затронутых в гл. 2.

Осмысление физических и технологических особенностей данной разновидности строительного водопонижения для слабопроницаемых грунтов (см. § 6) позволяет наметить следующие пункты динамического нестационарного моделирования с помощью МКР-Excel:

1. Вначале надо решить стационарную плановую задачу по нахождению поля  $U_i(B)$  в грунте строительной площадки за счет работы источника напряжения постоянного тока, подсоединенного отрицательным полюсом к скважинам-катодам, а положительным — в электродам-анодам. Здесь же определяются сила тока через каждый электрод, суммарная сила тока и затраты электроэнергии (время работы установки определится в конце общего моделирования).
2. Найденное на первой модели поле потенциалов  $U_i$  надо использовать на другой модели с совместным процессом нестационарной плановой фильтрации воды при электроосмосе и вакуумировании. В результате будут найдены время осушения грунта, положение сниженного УПВ от действия комбинированной установки водопонижения, отдельные водопритоки в скважины за счет электроосмоса и вакуумирования, а также суммарные водопритоки.
3. С учетом полученных значений сниженного УПВ и остаточной влажности грунта проверить возможность воздухопритока в вакуумные скважины. При необходимости промоделировать воздухоприток в скважины и получить значения расходов воздуха, фильтрующегося в скважины через слой осушенного грунта.
4. Рассчитать циркуляцию воды и (возможно) воздуха в гидравлической трубопроводной системе водопонижения. Найти параметры для подбора насосного оборудования.

Последний пункт не обязательно моделировать, так как гидравлика трубопроводов водопонижительных систем достаточно надежно проработана аналитически в ряде изданий: [26; 27; 62; 109; 223].

Приведем формулы моделирования для наиболее распространенного случая плановой нестационарной двумерной (в горизонтальной декартовой системе координат) электроосмотической и нелинейной (по Буссинеску) фильтрации грунтовых вод с вакуумированием на горизонтальном водоупоре. Они могут быть получены на основе балансового принципа А.А. Самарского или прямым путем из системы (99). Они могут быть также записаны на основе общей формулы (352) по аналогии так (см. рис. 142):

а) формула моделирования напора при электроосмотической фильтрации с коэффициентами  $k_3$  и  $\mu_3$  (см. § 11) при мощности грунта  $M$  (см. рис. 48)

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{k_3 M D t}{\mu_3} \left[ \frac{U_1 - U_0}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{U_2 - U_0}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{U_0 - U_3}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{U_0 - U_4}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right]; \quad (406)$$

б) при вакуумировании грунтовых вод

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{k D t}{\mu} \left[ \frac{(\bar{h}_1^S + \bar{h}_0^S)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{(\bar{h}_2^S + \bar{h}_0^S)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{(\bar{h}_0^S + \bar{h}_3^S)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{(\bar{h}_0^S + \bar{h}_4^S)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right]. \quad (407)$$

В формуле (407) величину  $\bar{h}$  назовем, вслед за В.М. Григорьевым [62, с. 71; 64, с. 58], полной глубиной потока грунтовых вод:

$$\bar{h} = h + \alpha h_\kappa, \quad (408)$$

где  $h$  — мощность грунтовых вод;  $h_\kappa$  — высота капиллярной зоны над УГВ;  $\alpha$  — коэффициент приведения капиллярной зоны к полностью водонасыщенной зоне (см. рис. 31). Вблизи вакуумной скважины  $h$  может полностью сработаться под влиянием вакуума. Тогда вода в скважину поступает через приведенную капиллярную зону высотой  $\alpha h_\kappa$  [62]. В.М. Григорьев на основе опытных данных [62, с. 208; 64, с. 58] рекомендовал принимать для условий водопонижения при нестационарной фильтрации в слабопроницаемых грунтах коэффициент  $\alpha = 0,7$ . С.Ф. Аверьянов [6, с. 96] для длительно протекающих процессов стационарной фильтрации нашел, что  $\alpha = 0,3$ . Коллектив авторов справочного пособия к СНиП [208, с. 187] рекомендует принимать для вакуумных дренажей  $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ . Все предложения проверены практикой при защите от подтопления.

Скважины систем вакуумного водопонижения надлежит рассчитывать с учетом неустановившейся фильтрации воды при постоянном напоре по требованиям строительных норм [238, с. 7].

Приток грунтовых вод за счет электроосмотической фильтрации в скважину-катод с потенциалом  $U_0$  можно найти на модели с квадратной сеткой так:

$$Q_c^{\text{эо}} = k_{\text{э}} M \left[ \left( \sum_{i=1}^4 U_i / 4 \right) - 4U_0 \right]. \quad (409)$$

Рассмотрим скважину с напором  $H_0$ , на стенке которой полная глубина грунтовых вод  $\bar{h}_0$  соответствует выражению (408). Тогда водоприток за счет вакуумирования водоносного пласта можно выразить при квадратной сетке на модели в виде

$$Q_c^{\text{в}} = \frac{k}{2} \left[ \sum_{i=1}^4 (\bar{h}_i + \bar{h}_0) (H_i - H_0) \right]. \quad (410)$$

Полный водоприток в скважину совместной системы электроосмотического и вакуумного водопонижения

$$Q_c = Q_c^{\text{эо}} + Q_c^{\text{в}}. \quad (411)$$

Полный водоприток всей системы водопонижения  $Q$  есть сумма водопритоков отдельных скважин  $Q_c$ . Модель позволяет найти часть  $Q$  за счет электроосмоса и часть — за счет вакуумирования, то есть отдельно.

Приведенные формулы позволяют моделировать системы водопонижения при условии их нормальной работы без перебоев. Однако такая технология строительного процесса является идеальной, так как останов системы водопонижения может произойти случайно в силу различных причин. Например, если неожиданно отключат электроэнергию на строительной площадке, то отключится и электроосмос, и вакуум в водоносном пласте. Приведем зависимости, позволяющие моделировать аварийные сбои в работе системы водопонижения.

Рассмотрим аварийный останов системы в момент времени  $t_a$  от начала ее работы вследствие отключения электроэнергии. При обесточивании исчезнет электрическое поле постоянного тока в грунте строительной площадки. Этот факт реализуется на модели присвоением с момента времени  $t_a$  значения коэффициенту электроосмотической фильтрации  $k_{\text{э}} = 0$  в таблице исходных данных с именами. Тогда, согласно формуле (406), процесс электроосмоса на модели будет отключен.

При отключении электроэнергии насосы тоже отключатся. Тут же перестанут работать эжекторы (см. рис. 31 и 32) и исчезнет вакуум в скважинах. Тогда в скважине образуется начальный напор, соответствующий



уровню воды на отметке эжектора по верху отстойника скважины (см. рис. 31). Начнется обратный процесс восстановления УГВ с его повышением.

Грунтовая вода из периферийных зон области фильтрации на границе зоны влияния откачки начнет поступать в осушенную зону. При этом вода будет поступать и в скважины, что вызовет ее накопление в стволах скважин и повышение напора самих скважин. Таким образом, скважины после аварийного останова системы будут иметь переменный напор.

Время, с момента которого с погрешностью около 5 % не обязательно учитывать емкость скважин, можно найти по известной зависимости [54, с. 63; 314, с. 283]:

$$t_v = 20 F_c S_c / Q_c, \quad (412)$$

где  $F_c$  — площадь поперечного сечения ствола скважины;  $S_c$  — понижение уровня воды в скважине относительно естественного УГВ;  $Q_c$  — водоприток в скважину на момент останова (без учета электроосмотической части).

Время  $t_v$  надо отсчитывать от момента аварийного останова  $t_a$ . Так как на модели время  $t$  отсчитывается с момента начала работы системы, поэтому

$$t_v = t - t_a. \quad (413)$$

Формула моделирования изменяющегося напора в стволе скважины имеет вид

$$H_0^{S+1} = H_0^S + Q_c^S Dt / F_c, \quad (414)$$

где  $H_0^{S+1}$  и  $H_0^S$  — напоры в скважине на последующий и предыдущий моменты времени с шагом  $Dt$ . Эти напоры надо назначать на модели с учетом шага пространственной квадратной сетки  $DL$  и радиуса скважины по формуле (359).

#### Пример 67. Моделирование строительного водопонижения

Промоделируем установку вакуумного эжекторного водопонижения, усиленную электроосмосом. На участке строительства расположена пусковая камера. Она имеет прямоугольную конфигурацию в плане с размерами  $18 \times 12 \text{ м}^2$ . Глубина заложения камеры  $M = 16 \text{ м}$  от поверхности земли. Из пусковой камеры намечено запустить щитовую проходку с диаметром щита  $6,3 \text{ м}$ , с глубиной лотка тоннеля  $13 \text{ м}$  от поверхности земли. План строительного участка показан на рис. 177. Схематизированный гидрогеологический разрез с установкой водопонижения и щитом — на рис. 178.

Суглинистый грунт имеет следующие характеристики: коэффициент фильтрации  $k = 0,01 \text{ м/сут}$ , коэффициент водоотдачи  $\mu = 0,01$ , коэффициент электроосмотической фильтрации  $k_j = 0,000432 \text{ м}^2/(B \cdot \text{сут})$ , коэффициент электроосмотической водоотдачи  $\mu_j = 0,047$  (см. пример 32), высота капиллярной зоны  $h_k = 3 \text{ м}$ . Суглинок водонасыщен со степенью влажности  $G = 0,98 \dots 1$ , с природной (естественной) влажностью  $W_e = 0,26 \text{ кг/кг}$ ,

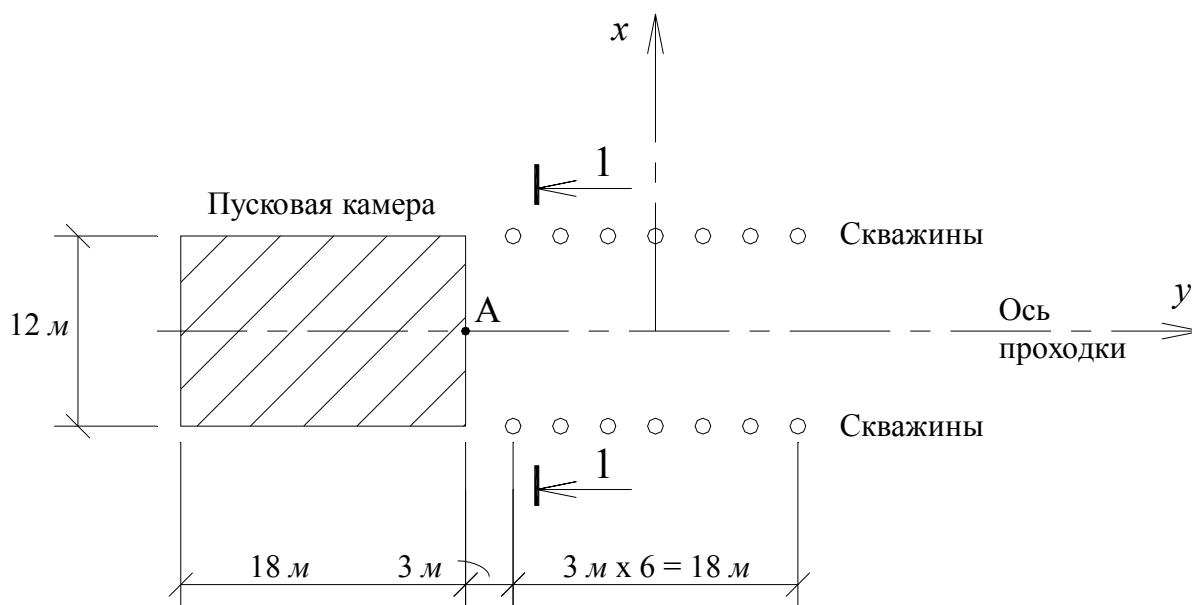


Рис. 177. План строительного участка с водопонижительной системой

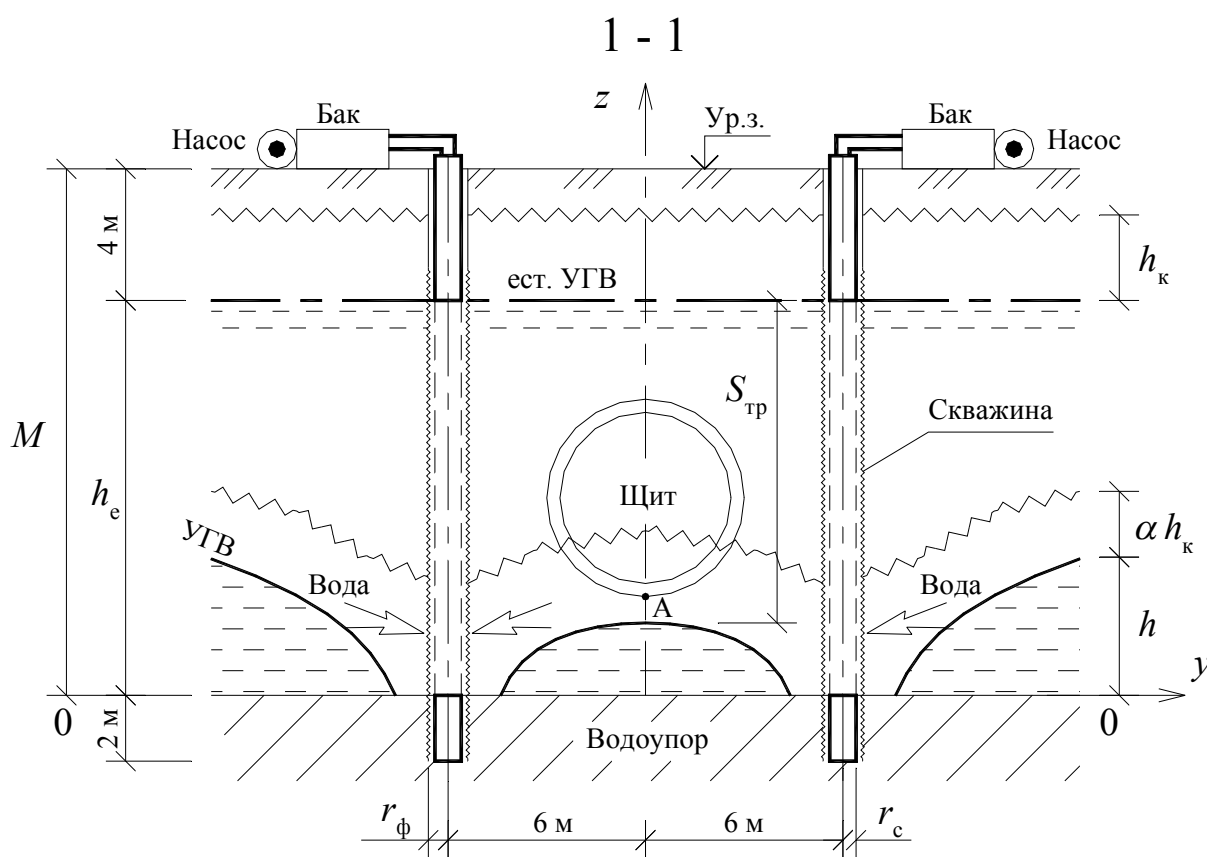


Рис. 178. Поперечный разрез щитовой проходки с водопонижением

влажностью на границе текучести  $W_T = 0,32 \text{ кг/кг}$ , влажностью на границе раскатывания  $W_p = 0,20 \text{ кг/кг}$ . Грунтовые воды залегают на водоупоре, приурочены к суглинку, имеют естественную мощность  $h_e = 12 \text{ м}$ . Водонасыщенный суглинок склонен проявлять плавунные свойства в забоях строительных выработок, особенно при вибрационных воздействиях. Коэффициент приведения высоты капиллярной зоны к водонасыщенной зоне принят по В.М. Григорьеву [62]  $\alpha = 0,7$ , так как процесс водопонижения резко нестационарный. Все напоры в грунтовой воде отсчитываются от поверхности горизонтального водоупора, по линии которого проведена плоскость 0-0 (см. рис. 178) и горизонтальные оси  $x-y$ .

Щитовая проходка должна начать движение из пусковой камеры в точке А (см. рис. 177). К началу работы щита УГВ должен быть понижен на величину  $S_{тр} = 9,5 \text{ м}$ , то есть на  $0,5 \text{ м}$  ниже лотка тоннеля в диктующей точке А (см. рис. 178). Так как коэффициент фильтрации суглинка имеет предельное значение для применения вакуумного водопонижения  $k = 0,01 \text{ м/сут}$  (см. § 4), то решено усилить осушительные работы по вакуумированию с помощью электроосмотического водопонижения, которое дополнительно закрепляет грунт [103].

План размещения вакуумных скважин показан на рис. 177. В одном ряду 7 скважин. Шаг скважин 3 м, общая длина ряда скважин 18 м. Конструкция скважины показана на рис. 31. Вакуум в каждой скважине создает эжектор (см. рис. 32). Принципиальная схема установки вакуумного водопонижения показана на рис. 30. Расстояние между двумя параллельными рядами скважин 12 м. К каждой скважине подсоединяют отрицательный полюс источника постоянного электрического тока напряжением  $U = 36 \text{ В}$ , и скважина становится катодом, куда под влиянием электроосмоса притекает вода из грунта. Радиус катода совпадает с радиусом металлической сетки скважины  $r_c = 0,0635 \text{ м}$  (см. рис. 31). Посередине между скважинами в каждом ряду в грунт погружается металлическая труба диаметром 40 мм — анод — с длиной электрода  $L_a = 16 \text{ м}$  и радиусом  $r_a = 0,02 \text{ м}$ . Таким образом, в каждом ряду из 7 вакуумных скважин имеется 6 труб-анодов, к которым подсоединяют положительный полюс источника постоянного электрического тока. Мощность токопроводящего грунта от поверхности земли до водоупора  $M = 16 \text{ м}$ . Удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho_g = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Первоначально выдвинуто предположение, что требуемое понижение УГВ  $S_{тр} = 9,5 \text{ м}$  в точке А (см. рис. 178) может быть достигнуто за полмесяца работы совмещенной вакуумной и электроосмотической водопонижительной системы (ВиЭВС), то есть за время  $t = 15 \text{ сут}$ . Отталкиваясь от данного срока осушения, построим модель с помощью МКР-Excel, которую потом можно при необходимости уточнить.

Так как отношение  $S_c / h_e = 12 / 12 = 1 > 0,1 \dots 0,25$ , то согласно критериям (102)-(103) для описания движения грунтовых вод можно применить лишь нелинеаризованную гидравлическую теорию фильтрации. Здесь  $S_c$  — понижение УГВ в ряду вакуумных скважин. Соотношение сторон ВиЭВС в плане  $18/12 = 1,5$ , и по критерию (107) фильтрация грунтовых вод будет иметь радиальный характер движения в плане. Поэтому размеры модели определим с помощью радиуса влияния ВиЭВС на УГВ по формуле (278).

Вначале находим приведенный радиус установки ВиЭВС по формуле В.И. Аравина — Н.К. Гириного (108)

$$r_0 = 1,18 (18 + 12)/4 = 8,85 \text{ м}.$$

Расчетная увнепроводность

$$a = k h_e / \mu = 0,01 \cdot 12 / 0,01 = 12 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Безразмерный параметр времени (число Фурье)

$$\tau = at / r_0^2 = 12 \cdot 15 / 8,85^2 = 2,298.$$

Радиус влияния по (278):

$$R_{\text{вл}} = 8,85 + (1 - 0,157 \cdot 0/12)(4,12 - 0,1 \ln 2,298) \sqrt{12 \cdot 15} = 63,0 \text{ м.}$$

Замечаем, что по оси проходки щита в плане можно провести ось симметрии для области фильтрации (см. рис. 177), с которой совместим горизонтальную координатную ось  $x$ . Поэтому для моделирования принимаем половину прямоугольной области фильтрации при  $y \geq 0$ . По оси  $x$  размер области 126 м, по оси  $y$  — 63 м.

В процессе моделирования придется создать три файла Excel: ЭлПоле.xls, ВиЭВС.xls и Авария.xls. В файле ЭлПоле.xls расположена модель стационарного электрического поля постоянного тока в грунте стройплощадки при работе электроосмотической установки. В файле ВиЭВС.xls — модель совместной нестационарной вакуумной и электроосмотической фильтрации для определения времени осушения грунтовых вод до требуемого понижения УГВ  $S_{\text{тр}} = 9,5 \text{ м}$  в точке А. В файле Авария.xls — моделирование подтопления забоя проходки в случае аварийного останова ВиЭВС.

Схема модели для файла ЭлПоле.xls показана на рис. 179, где геометрические пропорции области электрического поля при электроосмосе немного искажены для удобства обозначений катодов и анодов. Как обычно, над матрицей модели МКР-Excel помещаем таблицу исходных данных с именами. Минимальный шаг квадратной МКР-сетки выбираем с привязкой к размещению скважин и электродов. Принят  $DL = 0,75 \text{ м}$ . Сетка для всех упомянутых трех файлов должна быть единая. При таком шаге сетки и радиусах катода  $r_c = 0,0635 \text{ м}$  и анода  $r_a = 0,02 \text{ м}$  условие (399) не соблюдается. Поэтому потенциалы катодов и анодов задаем по формуле (401). Шаг сетки за пределами ВиЭВС принимаем неравномерный с увеличением шага при удалении от центра системы по зависимости (402). Получившиеся значения шагов округляем до целых ближайших значений. Таким образом, получаем следующую разбивку шагов по обеим координатным осям за пределами контура ВиЭВС:

$$9; 9.75; 12; 14; 17; 20; 25; 30; 35; 43; 52; 63 \text{ м.}$$

Формулу моделирования электрических потенциалов в грунте набираем в ячейках Excel по (402). На границах моделируемой области ставим условие 2-го рода (ГУ2), как на изоляторах. То же условие ставим на контуре пусковой камеры.

Результаты моделирования в виде матрицы обработаны VBA-макропрограммой ForSurfer и картированы в Surfer (рис. 180). Заметно, что подземная часть камеры вносит некоторое искажение в поле электроосмоса.

Силу тока в амперах ( $A$ ) в скважинах-катодах и электродах-анодах и общую для одного ряда скважин системы ВиЭВС получаем на модели с помощью формулы (400). Результаты выносим соответственно в табл. 20 и 21, где обозначения электродов см. на рис. 179.

Небольшая невязка общей силы тока  $I$  в пределах 0,05 % объяснима слабой погрешностью МКР-модели, которой можно пренебречь. Таким образом, моделированием определено, что для обслуживания каждого ряда скважин-электродов достаточно иметь сварочный аппарат постоянного тока с силой тока 170-180 А. Заметим, что число катодов

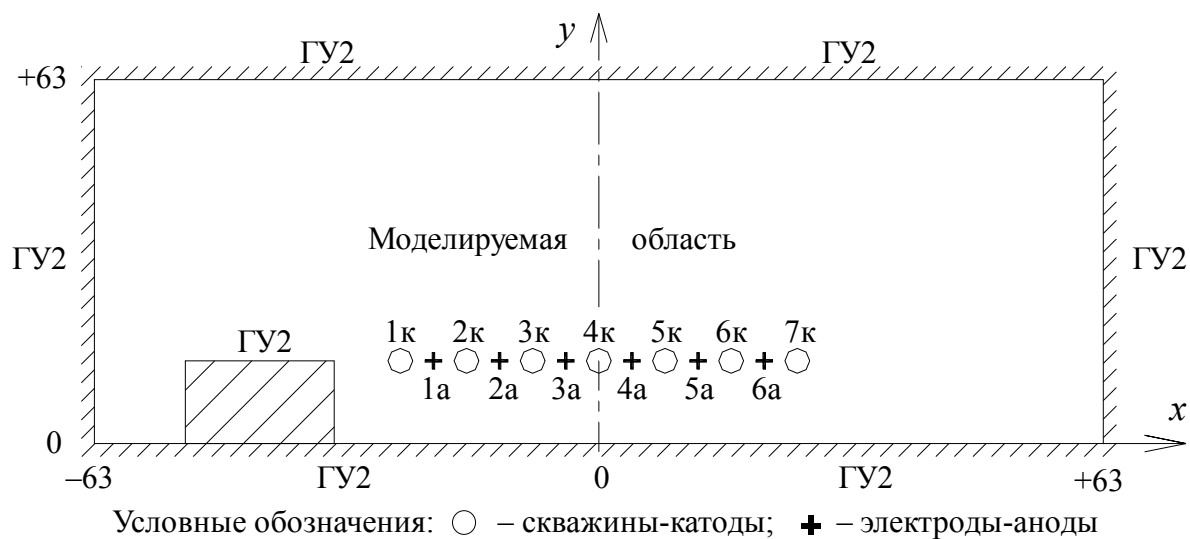


Рис. 179. Схема стационарной модели поля электроосмоса

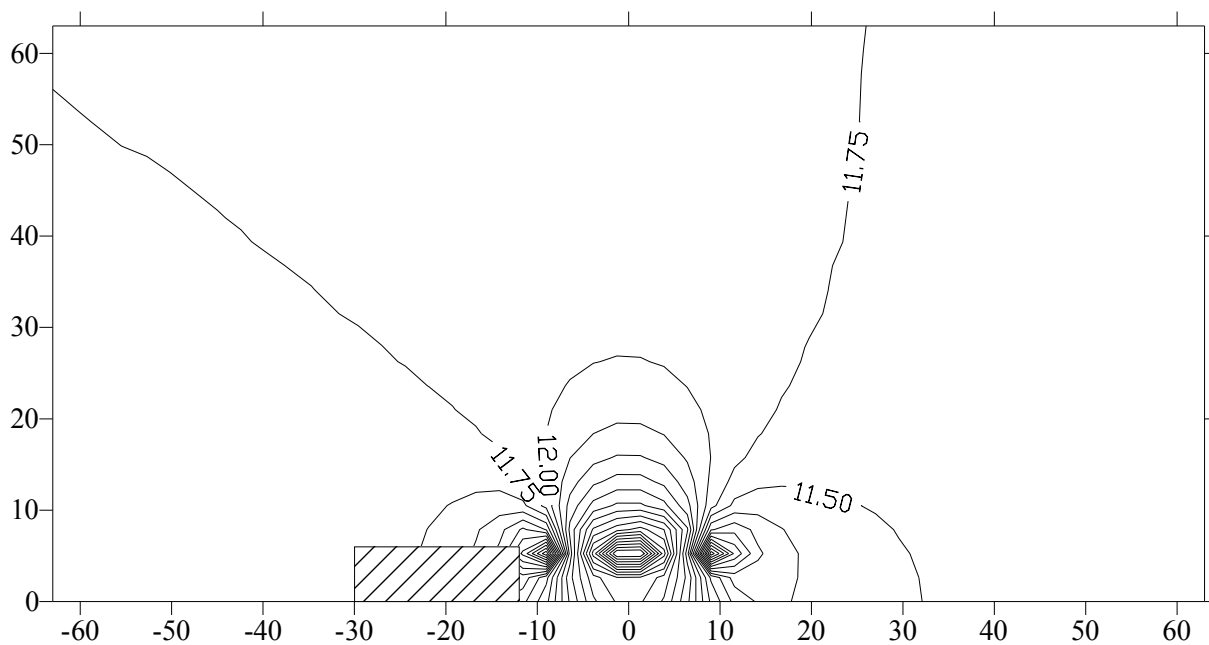


Рис. 180. Электрическое поле в грунте строительной площадки при работе установки электроосмотического водопонижения

Таблица 20

1к	2к	3к	4к	5к	6к	7к	$I, A$
-20,26	-25,94	-26,7	-26,86	-26,7	-25,95	-20,31	-172,7

Таблица 21

1а	2а	3а	4а	5а	6а	$I, A$
29,63	28,46	28,20	28,20	28,46	29,61	172,6

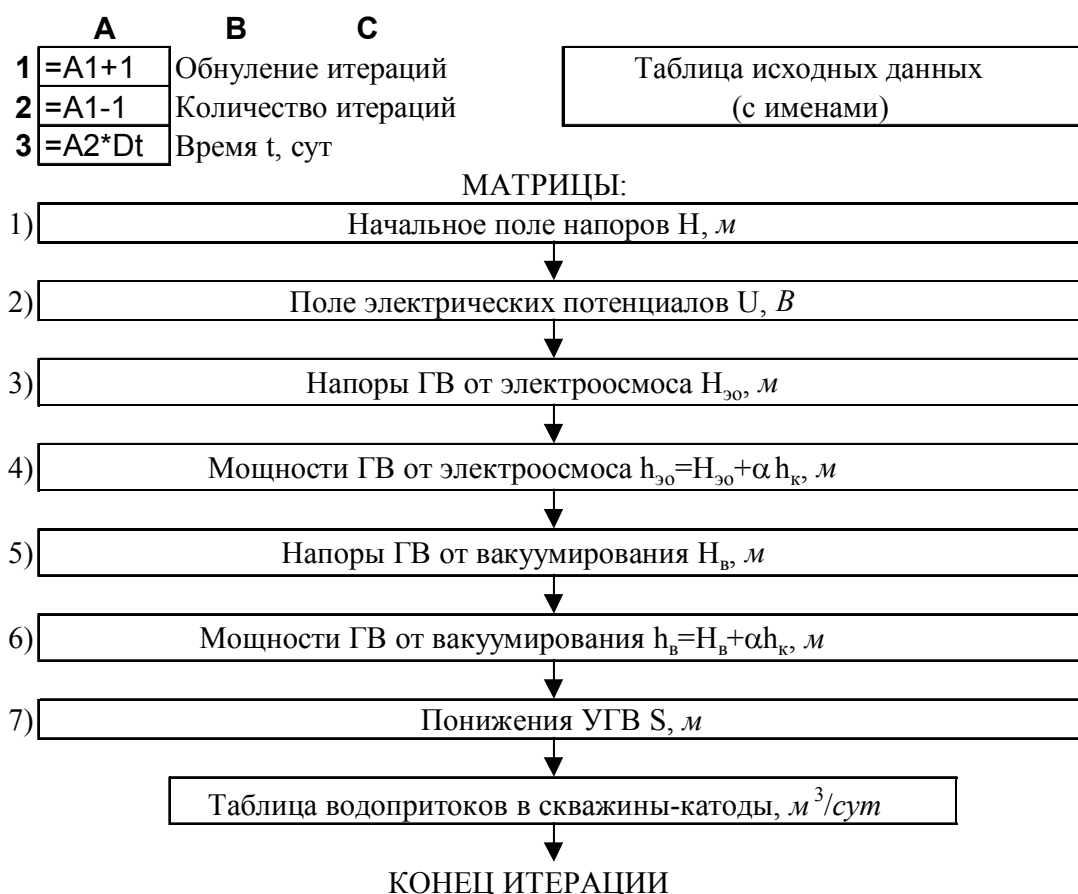


Рис. 181. Схема модели ВиЭВС

(7 шт.) и анодов (6 шт.) не совпадает. В [223] нет аналитических формул для расчета такого случая чередования катодов и анодов, хотя он встречается на практике [103, с. 326]. В то же время МКР-Excel позволил легко промоделировать этот случай.

Переходим к моделированию совместного вакуумного и электроосмотического водопонижения в файле ВиЭВС.xls. Схема области фильтрации грунтовых вод совершенно аналогична показанной на рис. 180, лишь электроды-аноды уже не нужны, так как они учтены в матрице электрического поля стройплощадки. На границе области фильтрации также ставим ГУ2. По рекомендации В.А. Флорина [295, с. 134], так лучше обеспечивается моделирование граничного условия при распространении влияния возмущения.

Данная модель нестационарная и динамическая МКР-Excel. Счетчик итераций можно применить проще, чем в предыдущих динамических моделях. Он реализуется так:

<b>A</b>		
<b>1</b>	<b>=A1+1</b>	Обнуление итераций
<b>2</b>	<b>=A1-1</b>	Количество итераций
<b>3</b>	<b>=A2*Dt</b>	Время t, сут

В данном случае нет деления на нечетный и четный шаги времени  $Dt$ , так как за одну итерацию сверху вниз счет модели проходит имитацию одновременного процесса электроосмоса и вакуумирования водоносного пласта.

Принципиальная схема модели показана на рис. 181. Модель имеет 7 матриц и таблицу водопритоков. Функция Excel ЕСЛИ(;;) применена в матрицах № 3, 4 и 6. После нажатия клавиши F9, при пробегании в Excel счета сверху вниз, начальное поле напоров грунтовых вод (ГВ) в 1-й матрице используется только один раз. А именно, оно используется во время 1-й итерации в 3-й матрице, для чего задействована функция ЕСЛИ (см. пример 58). Поле электрических потенциалов во 2-й матрице представлено статичными числовыми значениями, скопированными из предыдущего файла ЭлПоле.xls. Эта матрица постоянно используется при всех итерациях в 3-й матрице, где напоры ГВ от действия электроосмоса рассчитываются по формуле (406).

Мощности грунтовых вод в 4-й матрице вычисляются с использованием функции ЕСЛИ(;;). Если напор в грунтовых водах  $H_{\text{зо}}$  больше нуля, то к нему прибавляется приведенная высота капиллярной зоны

$$\alpha h_{\text{к}} = 3 \cdot 0,7 = 2,1 \text{ м},$$

то есть используется формула (408). Если напор  $H_{\text{зо}}$  меньше или равен нулю — это обычно происходит по истечении некоторого времени вблизи вакуумных скважин, — то мощность ГВ равна  $\alpha h_{\text{к}}$ . Этот факт замечен В.М. Григорьевым [62] и проиллюстрирован на рис. 178. Пример функции ЕСЛИ(;;) в одной из ячеек 4-й матрицы мощностей ГВ от электроосмоса:

$$=\text{ЕСЛИ}(\text{D59}>0;\text{D59}+\text{ahk};\text{ahk})$$

где D59 — ячейка 3-й матрицы с напором ГВ под действием электроосмоса; ahk — имя числового значения приведенной высоты капиллярной зоны ( $\text{ahk} = 2,1 \text{ м}$ ).

Напоры ГВ от вакуумирования в 5-й матрице рассчитываются по формуле (407), где исходные напоры  $H^S$  берутся из соответствующих ячеек 3-й матрицы, а мощности ГВ  $h^S$  — из 4-й матрицы. Мощности ГВ от вакуумирования в 6-й матрице считаются так же, как в 4-й, с функцией ЕСЛИ, но с проверкой напоров от вакуумирования из 5-й матрицы.

Понижения УГВ в 7-й матрице находятся простым вычитанием как  $S = h_{\text{е}} - H_{\text{в}}$ , например, при достижении напора в точке А (см. рис. 178) после вакуумирования с электроосмосом  $H_{\text{е}} = 2,5 \text{ м}$  получается требуемое понижение УГВ  $S_{\text{тр}} = 12 - 2,5 = 9,5 \text{ м}$ .

Водопритоки в таблице (см. рис. 181) находятся автоматически по формулам (409) – (411). Таким образом, получены две таблицы водопритоков в скважины системы водопонижения: в начале водопонижения (табл. 22) и на момент времени  $t = 12,02 \text{ сут}$  (табл. 23), когда достигнуто требуемое понижение УГВ в точке А  $S_{\text{тр}} = 9,5 \text{ м}$ . Номера скважин-катодов см. на рис. 179. Обратим внимание, что вместо ожидаемого времени 15 сут получилось время осушения 12 сут в диктующей точке А на оси проходки около пусковой камеры (см. рис. 177 и 178). В центре водопонижительной системы с координатами  $x = 0$  и  $y = 0$  (см. рис. 177) требуемое понижение УГВ  $S_{\text{тр}} = 9,5 \text{ м}$  достигается почти в два раза быстрее при  $t = 6,35 \text{ сут}$ .

Анализируя таблицы водопритоков, можно заметить следующее. В начале водопонижения доля водопритока в скважины за счет электроосмоса невелика и составляет около 5 %. Однако к началу работы щитовой проходки, когда достигнуто требуемое понижение УГВ, водоприток за счет вакуумирования водоносного пласта уменьшается в 10 раз и роль электроосмотической фильтрации повышается до 35 % от общего водопритока. Это происходит из-за того, что вакуумно-гравитационный водоприток уменьшается нестационарно во времени, а электроосмотическая фильтрация идет стационарно. По свидетельству В. Кнаупе [103, с. 323] значение силы тока весь период

Таблица 22

**Водопритоки в скважины в начале водопонижения,  $\text{м}^3/\text{сут}$** 

№ скв.	1	2	3	4	5	6	7	Сумма
$Q_c^{\text{зо}}$	0,1751	0,2241	0,2307	0,2321	0,2307	0,2242	0,1754	1,492
$Q_c^{\text{б}}$	0,5404	0,3282	0,2885	0,2819	0,3013	0,3618	0,6552	2,757
$Q_c$	0,7155	0,5523	0,5192	0,5140	0,5320	0,5860	0,5806	4,249

Таблица 23

**Водопритоки в скважины при  $t = 12, 02 \text{ сут}$  и  $S_{\text{тр}} = 9,5 \text{ м}$  в точке А,  $\text{м}^3/\text{сут}$** 

№ скв.	1	2	3	4	5	6	7	Сумма
$Q_c^{\text{зо}}$	0,1751	0,2241	0,2307	0,2321	0,2307	0,2242	0,1754	1,492
$Q_c^{\text{б}}$	0,5404	0,3282	0,2885	0,2819	0,3013	0,3618	0,6552	2,757
$Q_c$	0,7155	0,5523	0,5192	0,5140	0,5320	0,5860	0,5806	4,249

электроосмотического осушения в основном соответствует закону Ома, то есть является стационарным во времени.

Распределение понижений УГВ на строительной площадке, полученное моделированием с помощью МКР-Excel в файле ВиЭВС.xls, показано на рис. 182. Заметно, что подземная часть пусковой камеры оказывает положительное влияние на осушение грунта. В данном случае при водопонижении наблюдается положительный барражный эффект.

Проанализируем полученную моделированием карту понижений УГВ на рис. 182 применительно к зависимости (278). Максимальное влияние водопонижения на УГВ с предельным понижением  $S_{\text{min}} = 1 \text{ см}$  к моменту времени  $t = 12,02 \text{ сут}$  почти всюду достигло границ модели. Это свидетельствует об удовлетворительной точности нашей аналитической зависимости (278) для определения радиусов влияния водопонижения с использованием нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации по Буссинеску для грунтовых вод малой мощности, соизмеримой с понижениями УГВ при работе дренажных, водопонизительных и водоотливных систем.

Проверим возможность поступления атмосферного воздуха через суглинок с поверхности земли и из забоя щитовой проходки. Электроосмотическая водоотдача  $\mu_y = 0,047$  определена, как в примере 32. Остаточная влажность суглинка после электроосмотического и вакуумного водопонижения по формуле Г.Н. Жинкина (93)  $W_k = 0,23 \text{ кг/кг}$ . При естественной влажности полностью водонасыщенного грунта  $W_e = 0,26 \text{ кг/кг}$  получается степень влажности осушенного грунта  $G = 0,23 / 0,26 = 0,88$ . Но при такой степени влажности фазовая проницаемость суглинка по воздуху равна нулю (см. рис. 43). Даже если предположить, что суглинок будут осушать до границы раскатывания  $W_p = 0,20 \text{ кг/кг}$  — хотя это по затратам электроэнергии убыточно [80], — все равно остаточная степень влажности для глинистого грунта  $G = 0,20 / 0,26 = 0,77$  соответствует непроницаемости суглинка по воздуху (см. рис. 43). Таким образом, воздух в систему водопонижения через суглинок не будет поступать, то есть вакуум в ней будет достаточно стабильным.



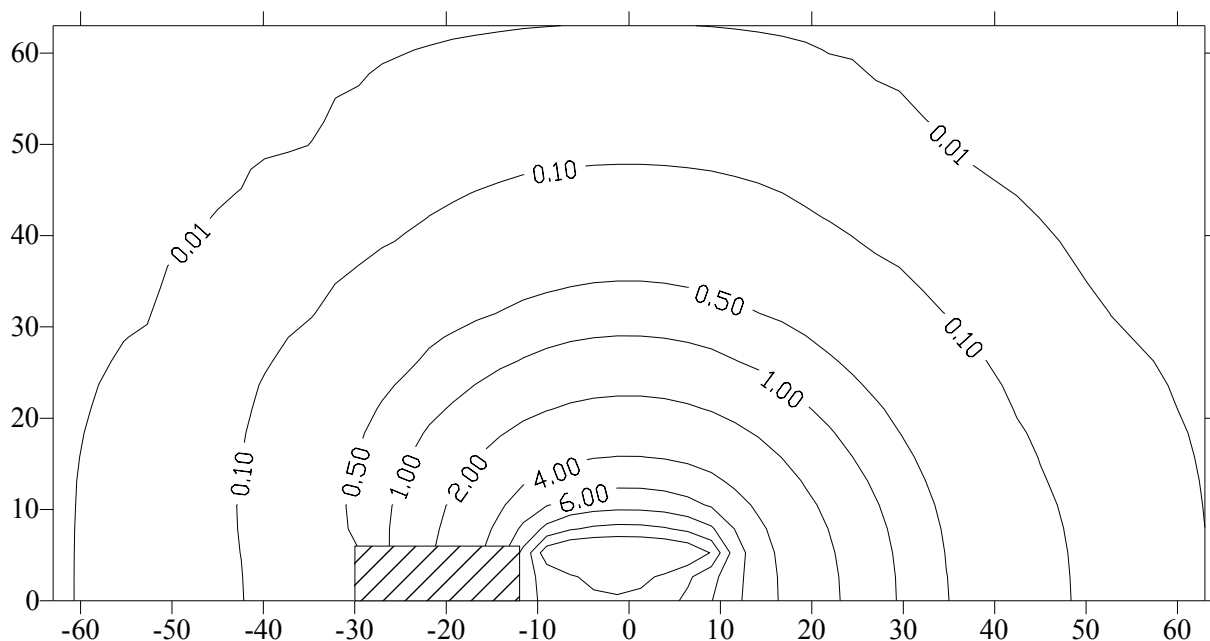


Рис. 182. Карта понижений УГВ через 12 суток работы совмещенной установки электроосмотического и вакуумного водопонижения

Третьим этапом моделирования является работа с файлом Авария.xls по моделированию аварийного останова системы водопонижения. Предположим, на момент времени  $t_a = 12,02$  сут произошло неожиданное отключение электроэнергии на стройплощадке. Определим, за какое время  $t_n$  по зависимости (413) произойдет подтопление низа проходческого щита, то есть найдем на модели, когда УГВ достигнет точки А (см. рис. 178). При этом УГВ должен подняться на 0,5 м.

Файл Авария.xls получается на основе файла ВиЭВС.xls при  $t = 12,02$  сут. Для этого надо лишь ввести несколько новых формул в ячейки Excel, моделирующие скважины в матрицах № 3, 4 и 5 (см. рис. 181), а в таблице исходных данных с именами присвоить коэффициенту электроосмотической фильтрации значение  $k_z = 0$ . В матрице № 3 в ячейках скважин надо сослаться на соответствующие ячейки скважин матрицы № 5, так как после отключения электроэнергии в грунте стройплощадки поле электрических потенциалов исчезнет и останется лишь поле гравитационных напоров в грунтовой воде. В матрице № 4 надо по той же причине поставить ссылки на матрицу № 6 с мощностями грунтовых вод.

В 5-й матрице напор в скважинах надо ставить без учета или с учетом емкости скважин радиусом  $r_c = 0,0635$  м. Без учета емкости в ячейке Excel на месте скважин надо ввести формулу моделирования (407), как для точки водонасыщенного грунта. Впрочем, емкость скважин при моделировании лучше всегда учитывать, особенно при восстановлении УГВ в слабопроницаемых грунтах. Это свойство скважин, когда уровни воды в них отстают от повышения УГВ, принято называть инерционностью [160, с. 27]. Но все же вначале проверим критерий (412), нужно ли учитывать в нашем случае емкость скважины?

Принимаем средний расход грунтовой воды в скважину  $Q_c^B = 2,757 / 7 = 0,394$  м³/сут (см. табл. 23). Понижение в скважине без вакуума  $S_c = 12$  м. Площадь поперечного сечения внутренней емкости скважины  $F_c = \pi \cdot 0,0635^2 = 0,0127$  м². По формуле (412) находим

$$t_v = 20 \cdot 0,0127 \cdot 12 / 0,394 = 7,74 \text{ сут.}$$

Следовательно, по крайней мере 7-8 сут после аварийного останова системы водопонижения, при моделировании восстановления УГВ нужно учитывать емкость скважин.

Таким образом, в ячейки 5-й матрицы модели (см. рис. 181) вводим формулу (414), запускаем итерации модели клавишей F9 и получаем время подтопления низа проходческого щита  $t = 19,03 \text{ сут}$ . Следовательно, щит будет подтоплен через

$$t_{\pi} = t - t_a = 19,03 - 12,02 = 7,01 \text{ сут}$$

после аварийного отключения электроэнергии. Такие перерывы в водопонижении недопустимы, так как могут привести к оплыванию грунта в забой проходки при вибрационных воздействиях в ходе работы щита.

**Моделирование дренажа.** Методика моделирования дренажа принципиально не отличается от моделирования строительного водоотлива и водопонижения. Все наработанные приемы — в том числе и при прогнозном моделировании подтопления — пригодны для применения здесь. Необходимо все же отметить, что дренажные системы работают чаще в стационарном (установившемся) режиме фильтрации, что следует учитывать при их моделировании.

Для полноты изложения методики МКР-Excel напоследок приведем пример моделирования трехмерной нестационарной фильтрации подземных вод в крестообразный лучевой дренаж.

#### Пример 68. Трехмерное моделирование лучевого дренажа

Приведем несложный пример трехмерного моделирования [252]. Пусть лучевой крестообразный дренаж расположен в однородном напорном водоносном пласте мощностью  $M = 5 \text{ м}$ , с естественным напором  $H_e = 10 \text{ м}$  (отсчитывается от подошвы пласта), с коэффициентом фильтрации грунта  $k = 0,5 \text{ м/сут}$  и коэффициентом водоотдачи  $\mu = 0,05$ . Водоупорные подошва и кровля пласта горизонтальны. Дальность действия дренажа составляет  $R = 50 \text{ м}$  (рис. 183). Длина лучей-дрен  $l$ , устраиваемых в уровне подошвы пласта, равна 28 м. Шахтный колодец устроен диаметром 4 м. Построить карту гидроизопьез (изолиний напоров) на уровне кровли водоносного пласта через сутки после ввода в эксплуатацию дренажа.

Область фильтрации в зоне действия дренажа имеет симметричный характер, поэтому для моделирования принимаем квадрант, ограниченный положительными направлениями осей X и Y. Вдоль дрен-лучей ставим граничное условие I рода с постоянным напором  $H = 0 \text{ м}$ , а по линиям осей X и Y за дренами — условие II рода — как будто бы здесь проходил водоупор. Вдоль дуги радиуса депрессии — постоянный напор  $H_e = 10 \text{ м}$ . Область фильтрации разбиваем квадратным шагом  $DL = 5 \text{ м}$ . Принимаем шаг времени  $Dt = 0,05 \text{ сут}$ , при котором критерий (335) соблюдается (он равен 0,0833 сут). Собираем модель в Excel примерно за 30 мин. При выбранных шагах  $DL$  и  $Dt$  сеточная модель имеет в таблицах worksheet общее количество узлов  $11 \times 11 \times 2 \times 21 = 5082$ .

В данном случае применена VBA-макропрограмма ДопЛистСсыл(), опубликованная в [261] и приведенная в прил. 3. Собственно расчёт модели производится на компьютере примерно за одну минуту. Ещё минута уходит на графопостроение карт изолиний.

Поясним, как работает и как лучше использовать макропрограмму ДопЛистСсыл(), несмотря на то, что в листинге данной программы, приведенном в прил. 3, есть краткие указания по ее применению.

VBA-макропрограмма ДопЛистСсыл() удобна для трехмерного нестационарного моделирования фильтрации и аналогичных процессов. Данный макрос лучше всего поместить в глобальный шаблон Excel, чтобы он всегда подгружался при запуске данного пакета. Первый лист в файле Excel надо назвать «Время 0.0» без кавычек, а второй — «Время 0.1» тоже без кавычек. Далее, набрав на листе Excel «Время 0.0» начальные значения поля напоров, надо перейти на следующий лист-worksheet «Время 0.1», моделирующий поле напоров после первого шага времени  $Dt$ .

Здесь всего в одной ячейке-узле надо набрать сборочную формулу трехмерного нестационарного моделирования (356), которая в нашем примере упрощается до вида

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{kM Dt}{\mu(DL)^2} \left[ \left( \sum_{i=1}^6 H_i^S \right) - 6H_0^S \right],$$

и скопировать её значения во все остальные ячейки модели, используя для удобства манипулятор-мышь и в необходимых случаях немного видоизменяя формулу в зависимости от граничных условий. Эта работа на довольно больших моделях (в плане 100x100 узлов) занимает времени обычно не более получаса. Как только набор на листе «Время 0.1» закончен, надо запустить макрос ДопЛистСсыл() для автоматической генерации всех последующих шагов времени  $Dt$ .

Макропрограмма ДопЛистСсыл() в данной редакции способна добавить автоматически до 99 шагов времени, что в большинстве практических задач моделирования, как правило, достаточно. При необходимости код можно модифицировать для генерирования и большего числа временных шагов  $Dt$ .

В ходе самогенерации модели вначале макрос ДопЛистСсыл() добавит необходимое количество листов — временных шагов  $Dt$ . Затем он сделает возврат на стартовый лист «Время 0.1» и начнет цикл корректировки ссылок в направлении естественного хода времени моделируемого процесса нестационарной фильтрации. При этом на дисплее компьютера будет появляться последовательно каждый временной шаг-лист и будет заметно, как сразу же пересчитываются численные значения напоров в ячейках. И вот

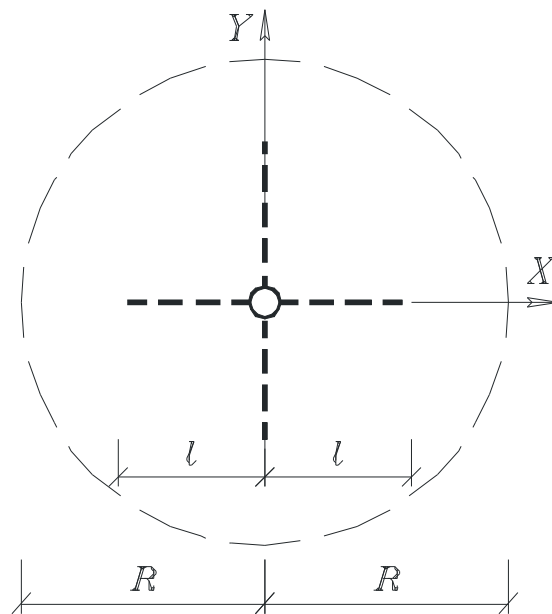


Рис. 183. План лучевого дренажа

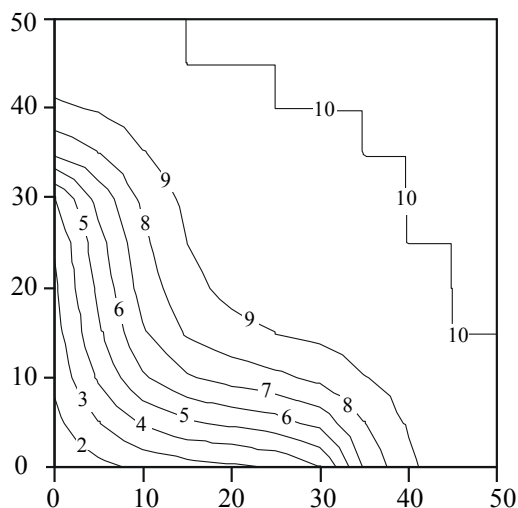


Рис. 184. Напоры на кровле пласта

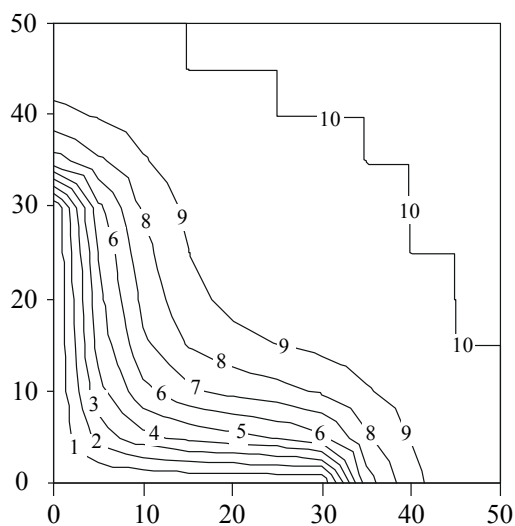


Рис. 185. Напоры на подошве пласта

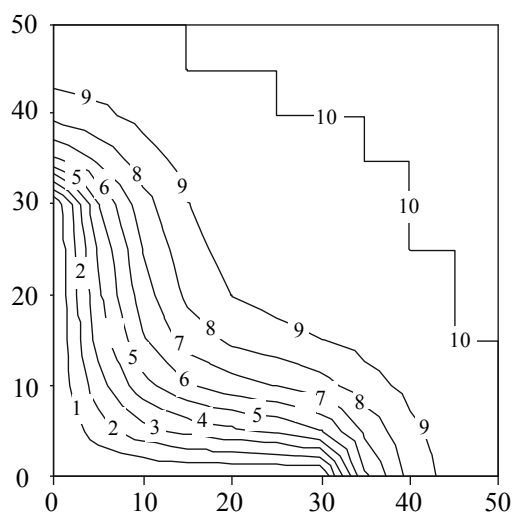


Рис. 186. Напоры по [260]

здесь-то как раз и скажутся преимущества явной разностной схемы, удачно сочетающиеся с недокументированными свойствами Excel и нашим алгоритмом `ДопЛистСсыл()`. В результате, когда на экране появится последний моделируемый шаг времени, модель будет рассчитана полностью.

Результаты моделирования приведены на рис. 184 и 185. Карта гидроизопез в уровне кровли напорного пласта через сутки после начала эксплуатации дренажа, построенная по данным трёхмерного моделирования, показана на рис. 184.

На рис. 185 показана аналогичная карта в уровне подошвы пласта, где находятся лучи-дрены (та же трёхмерная модель).

Рис. 186 иллюстрирует карту изолиний по формуле для двухмерной расчетной схемы этого же крестообразного дренажа при всех прочих равных условиях из данного примера. Формула в [260] получена с помощью метода конформных отображений.

Нетрудно заметить, что распределение напоров в уровне подошвы водоносного пласта и дрены почти одинаково отображается как в трёхмерной, так и в двухмерной постановках (см. рис. 185 и 186). А вот карта изолиний в уровне кровли пласта на рис. 184 даёт весьма ценную информацию о том, что над дренажной напор не срабатывается полностью, а образуется нависание воды переменным слоем от 2 до 4 метра. Эта особенность подтверждается натурными обследованиями лучевых дренажей [201]. Двухмерным же моделированием или аналитическими расчетами таких результатов достичь не удаётся, и оно даёт ложно-оптимистическую информацию о сработке уровня воды над дренажной, что понижает надёжность проектирования защиты от подтопления. Поэтому при проектировании дренажей сложных пространственных конфигураций предпочтение следует отдавать трёхмерным моделям как более надёжным, которые можно реализовать с помощью методики МКР-Excel.

## Заключительные выводы и рекомендации

Методика автора по фильтрационным расчетам и компьютерному моделированию защиты от подтопления в городском строительстве предназначена для использования в технологии строительного производства и проектирования, а также в системах вузовского и послевузовского строительного образования, в том числе с использованием дистанционного обучения в Internet.

Проведены теоретические, экспериментальные и натурные исследования проблемы защиты от подтопления в городском строительстве. Разработана комплексная методика фильтрационных расчетов и компьютерного моделирования защиты от подтопления.

Проанализированы и уточнены существующие методики расчета и моделирования фильтрации воды применительно к защите от подтопления в технологии городского строительства с учетом техногенных изменений проницаемости грунтов оснований и микроклимата городской застройки в условиях грунтовых вод малой мощности.

Рекомендуются к применению новые аналитические решения для фильтрационных расчетов подтопления, водопонижения и дренирования в технологии городского строительства, учитывающие техногенные изменения проницаемости грунтов оснований и микроклимата городской застройки, а также случай малой мощности грунтовых вод (нелинейная постановка). В частности, определены радиусы влияния языков подтопления, дополнительно исследован барражный эффект застройки в нестационарном режиме, в нелинейной постановке уточнена методика расчета строительного водоотлива, водопонижения и дренажа и др.

Рекомендуется к широкому использованию технология компьютерного моделирования методом конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel) для стационарных и нестационарных процессов фильтрации воды, воздуха, влаготеплопереноса, электроосмоса, консолидации грунтов при прогнозах подтопления, водопонижения и дренирования в городском строительстве с учетом техногенных изменений проницаемости грунтов оснований и микроклимата городской застройки, с применением автоматизации обработки информации и управления моделированием.

В ходе исследований выявлены области применения МКР-Excel для компьютерного моделирования фильтрации и аналогичных процессов при защите от подтопления в городском строительстве:

- **ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.** Работники проектных, изыскательских, строительных и природоохранных организаций легко могут использовать методику в силу повсеместной распространенности электронных таблиц MS Excel, простоты и наглядности технологии мо-

делирования. Методика может быть использована в современных технологиях автоматизации строительного водоотлива, водопонижения и дренажа (в АСУТП и т.д.), в технологическом проектировании этих средств защиты от подтопления, при интерпретации данных откачек, наливов и нагнетаний в период инженерных изысканий и т.д.;

— **НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ** может быть существенно ускорено на малых (10-1000 узлов) , средних (1000-10000 узлов) и больших (10000-100000 узлов) МКР-Excel-моделях по следующим направлениям: проверка полученных аналитических зависимостей; комбинирование аналитических, численных методов с лабораторным и натурным экспериментом с быстрой аппроксимацией данных и получением эмпирических и полуэмпирических формул; чистое моделирование линейных и нелинейных процессов фильтрации жидкости и газа, влаготеплопереноса в пористых средах, не поддающихся аналитическому исследованию;

— **УЧЕБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.** Студенты и аспиранты (без специальной математической подготовки и программирования) легко и быстро осваивают данную методику благодаря ее простоте, наглядности и в то же время достаточной эффективности;

— **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ.** В середине 1990-х годов возникла новая информационная технология Microsoft OLE Automation (Active X) с открытой архитектурой программ и их библиотек. В рамках этого промышленного стандарта рекомендуется объединять МКР-Excel-модели с другими программными продуктами, чтобы расширить производительность моделирования фильтрации: MatLab, MathCAD, Mathematica, AutoCAD и др. (см. пример ForSurfer в прил. 2).

Информационная технология МКР-Excel может быть применена в других научных дисциплинах строительного профиля, промышленности, а также в климатологии и геофизике. В частности, в технологии строительного производства методика моделирования электроосмоса, изложенная в представленной работе (см. соответствующие примеры в § 28), легко трансформируется в моделирование электропрогрева бетона при производстве строительных работ в зимних условиях. В строительной физике МКР-Excel можно использовать при моделировании влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений, применяя аналогию физических процессов фильтрации, теплопроводности, диффузии и др. (см. прил. 4). В фундаментах и механике грунтов МКР-Excel можно применять для моделирования процессов фильтрационной консолидации оснований зданий и сооружений (см. § 26), прогнозировать осадки фундаментов и морозное пучение.

## Приложения

### Приложение 1

#### *Эмпирические зависимости по испаряемости*

В трудах по климатологии [95; 96; 142; 144 и др.] содержатся в виде таблиц первичные данные по испаряемости (максимально возможному испарению с поверхности суши)  $\varepsilon_0$ . Эту величину по-другому называют «водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов климата». При прогнозе подтопления и дренирования испаряемость  $\varepsilon_0$  входит в формулу С.Ф. Аверьянова (1). Для моделирования защиты от подтопления величину  $\varepsilon_0$  удобнее выразить в виде формулы. Поэтому мы обработали первичные табличные данные  $\varepsilon_0$  [95; 96; 142; 144] методом кусочной аппроксимации с помощью квадратичных полиномов [34]. Трудоемкие расчеты были автоматизированы в Excel. Таким образом были получены эмпирические формулы по суточной испаряемости  $\varepsilon_0$  (мм/сут) в двадцати городах Сибири, Алтая, Урала и Казахстана, которые приведены ниже. Коэффициенты корреляции достаточно высокие — более 0,9.

##### 1) ОМСК

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -7,06 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,124 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -1,3 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,13 \cdot 10^{-3} t + 5,92.$$

##### 2) ТАРА

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,86 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,114 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,56 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,68 \cdot 10^{-2} t + 6,32.$$

##### 3) ТОМСК

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -7,75 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,117 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -1,08 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,38 \cdot 10^{-4} t + 4,96.$$

##### 4) НОВОСИБИРСК

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -8,27 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,126 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -1,37 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,43 \cdot 10^{-3} t + 5,01.$$

##### 5) ТЮМЕНЬ

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -7,61 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,119 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -4,9 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,84 \cdot 10^{-2} t + 6,35.$$

6) ТОБОЛЬСК

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,11 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,106 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,54 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,46 \cdot 10^{-2} t + 6,22.$$

7) ИШИМ

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,9 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,12 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,56 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,95 \cdot 10^{-2} t + 6,88.$$

8) СУРГУТ

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,5 \cdot 10^{-4} t^2 + 7,68 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,86 \cdot 10^{-5} t^2 - 6,06 \cdot 10^{-2} t + 9,84.$$

9) САЛЕХАРД

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = 1,41 \cdot 10^{-4} t^2 + 2,77 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = 2,75 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,13 t + 15,2.$$

10) КЕМЕРОВО

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,24 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,115 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -1,31 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,34 \cdot 10^{-4} t + 5,94.$$

11) БАРНАУЛ

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -8,53 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,13 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -1,86 \cdot 10^{-4} t^2 + 2,02 \cdot 10^{-4} t + 4,37.$$

12) ЕКАТЕРИНБУРГ

С 1 апреля по 15 июня ( $0 \leq t \leq 76$  сут)

$$\varepsilon_0 = -7,71 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,118 t;$$

С 15 июня по 31 октября ( $76 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,59 \cdot 10^{-4} t^2 - 2,08 \cdot 10^{-4} t + 6,3.$$

13) АСТАНА

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,2 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,76 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,76 \cdot 10^{-4} t^2 + 7,83 \cdot 10^{-2} t + 0,64.$$



14) КОКЧЕТАВ

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,16 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,9 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,24 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,04 \cdot 10^{-2} t + 2,06.$$

15) КУСТАНАЙ

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,16 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,82 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,69 \cdot 10^{-4} t^2 + 7,55 \cdot 10^{-2} t + 0,97.$$

16) ГУРЬЕВ

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,7 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,132 t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -4,28 \cdot 10^{-4} t^2 + 7,18 \cdot 10^{-2} t + 4,02.$$

17) ДЖЕСКАЗГАН

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -6,05 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,108 t + 0,35;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -4,93 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,116 t - 1,74.$$

18) ПАВЛОДАР

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -5,33 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,101 t + 0,25;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,46 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,73 \cdot 10^{-2} t + 1,68.$$

19) КАРАГАНДА

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -4,54 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,82 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -2,81 \cdot 10^{-4} t^2 + 4,11 \cdot 10^{-2} t + 4,12.$$

20) ПЕТРОПАВЛОВСК

С 1 апреля по 15 июля ( $0 \leq t \leq 106$  сут)

$$\varepsilon_0 = -4,93 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,57 \cdot 10^{-2} t;$$

С 15 июля по 31 октября ( $106 < t \leq 214$  сут)

$$\varepsilon_0 = -3,07 \cdot 10^{-4} t^2 + 5,52 \cdot 10^{-2} t + 2,32.$$

*Макропрограмма ForSurfer()*

```

Sub ForSurfer()
‘Объявление переменных и массивов
  Dim numRows As Integer, numCols As Integer
  Dim theRow As Integer, theCol As Integer
  Dim i As Integer, k As Integer, arrayRange() As Single
  Dim numRows_1 As Integer, numCols_1 As Integer, numCols_2 As Integer
‘Присвоение значений переменным
  numRows = Selection.Rows.Count
  numCols = Selection.Columns.Count
  numCols_1 = numCols - 1
  numCols_2 = numCols - 2
  numRows_1 = numRows - 1
‘Переопределение динамического массива
  ReDim arrayRange(numRows, numCols)
‘Цикл запоминания в массив всей матрицы со значениями осей X и Y
  For theRow = 1 To numRows
    For theCol = 1 To numCols
      arrayRange(theRow, theCol) = Selection.Cells(theRow, theCol).Value
    Next theCol
  Next theRow
‘Вложенные циклы набора значений Z, Y, X в колонках C, B, A со строки 501
  For i = 1 To numRows_1
    For k = 0 To numCols_2
      Cells(i + 500 + k * numRows_1, 3).Value = arrayRange(i, 2 + k)
      Cells(i + 500 + k * numRows_1, 2).Value = arrayRange(i, 1)
      Cells(i + 500 + k * numRows_1, 1).Value = arrayRange(numRows, 2 + k)
    Next k
  Next i
‘Следующий код выделяет значения XYZ-данных (с 501-й строки)
‘и сохраняет в текстовом формате ASCII под текущим именем
‘файла Excel, но с расширением *.txt для SURFER 6.04
  Dim numX As Integer, numXstr As String
  Dim fileNameXls As String, numStrSimb As Integer
  Dim fileNameTxt As String
  numX = numRows_1 * numCols_1 + 500
  numXstr = CStr(numX)

```

```

fileNameXls = ActiveWorkbook.Name 'запоминает имя файла *.xls
numStrSimb = Len(fileNameXls) - 3 'кол-во символов в имени без 3
fileNameTxt = Left(fileNameXls, numStrSimb) & "txt"
Range("a501", "c" & numXstr).Select
Selection.Copy
Workbooks.Add
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Application.DisplayAlerts = False
ActiveWorkbook.SaveAs FileName:=fileNameTxt, FileFormat:=xlText
ActiveWorkbook.Close
Application.DisplayAlerts = True
'Запуск через OLE 2.0 Automation программы Surfer 6.04, где
'из файла fileNameTxt в каталоге C:\Мои документы создается
'grid-файл, затем создается карта изолиний, которой присваивается
'ID-имя Contour #1, которая записывается в каталог C:\Мои документы и
'выделяется на экране с копированием в Буфер Windows
Dim objSurfer5 As Object
Set objSurfer5 = CreateObject("Surfer.App")
objSurfer5.FileClose (2)
objSurfer5.FileNew (0)
InFile$ = "C:\Мои документы\" & fileNameTxt
OutFile$ = "C:\Мои документы\" & Left$(fileNameXls, numStrSimb) & "grd"
objSurfer5.GridData (InFile$)
objSurfer5.MapContour (OutFile$)
objSurfer5.Select ("Map:Contours")
objSurfer5.EditCopy ("Map:Contours")
'Возврат в Excel с закрыванием без сохранения Sheet
Dim xlSheet As Object
Set xlSheet = CreateObject("Excel.Sheet").ActiveSheet
xlSheet.Application.Visible = True
ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
xlName = ActiveWorkbook.Name
Application.DisplayAlerts = False
Workbooks(xlName).Close SaveChanges:=False
Application.DisplayAlerts = True
MsgBox "Карта построена. Перейдите в Surfer"
End Sub

```

Макропрограмма *ДопЛистСсыл()*

```

Sub ДопЛистСсыл()
‘Начальные действия:
‘Первый лист Excel назвать “Время 0.0” без кавычек
‘Набрать на первом листе Excel начальные значения поля напоров
‘Второй лист Excel назвать “Время 0.1” без кавычек
‘Набрать на 2-м листе Excel формулы моделирования, сославшись на 1-й лист
‘Находясь на 2-м листе, запустить данный макрос и отвечать на запросы диалога
‘Объявление переменных
    Dim СтартЛист As String, СтарСсыл As String
    Dim M, T, D, N
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim ПредЛист As String, НовЛист As String, ЛеваяЧасть As String
    Dim ТриСимвСправа As String, НомерЛиста As Single
    Dim ЛевИмяЛиста As String, НовоеИмяЛиста As String
‘Диалоговое окно ввода Dialog “InputBox”
    СтартЛист = ActiveSheet.Name
    ActiveSheet.Previous.Select
    СтарСсыл = ActiveSheet.Name
    ActiveSheet.Next.Select
    M = “Введите количество добавляемых листов”
    T = “Ввод”
    D = “1”
    N = InputBox(M, T, D)
‘Цикл добавления и именования листов
    For i = 1 To N
        ПредЛист = ActiveSheet.Name
        ActiveSheet.Copy after:=ActiveSheet
        НовЛист = ActiveSheet.Name
        ЛеваяЧасть = Left$(НовЛист, 9)
        ТриСимвСправа = Right$(ЛеваяЧасть, 3)
        НомерЛиста = Val(ТриСимвСправа)
        НомерЛиста = НомерЛиста + 0.1
        ТриСимвСправа = Format(НомерЛиста)
        ЛевИмяЛиста = Left$(ЛеваяЧасть, 6)
        НовоеИмяЛиста = ЛевИмяЛиста & ТриСимвСправа
        ActiveSheet.Name = НовоеИмяЛиста
    Next i
‘Переход на стартовый лист “СтартЛист”
    Sheets(СтартЛист).Select
‘Цикл корректировки ссылок на предыдущий лист “ПредЛист”
    For j = 1 To N
        ПредЛист = ActiveSheet.Name
        ActiveSheet.Next.Select
        ActiveSheet.Cells.Replace What:=СтарСсыл, Replacement:=ПредЛист
    Next j
End Sub

```

Аналогия физических процессов

Аналогия физических процессов [12; 19; 50; 130; 131; 151; 152; 173; 178; 210; 290; 314] дана по обобщенному параболическому уравнению нестационарного процесса:

$$K \nabla^2 F + Q + A(F_* - F) = E \partial F / \partial t,$$

где  $F$  — функция (напор, давление, влажность или температура);  $F_*$  — значение функции вне области процесса;  $K$  — свойство проводимости;  $Q$  — внутренний источник или сток некоторой интенсивности;  $A$  — параметр перетекания или обмена с внешней средой;  $E$  — емкостное свойство;  $\nabla^2$  — оператор Лапласа по формулам (60), (61), (63), (64). Функции и параметры для соответствующих процессов приведены в таблице. Прочерк означает, что обычно данный член в уравнении не используется.

Физический процесс	$F$	$K$	$Q$	$A$	$E$
1. Напорная фильтрация воды	$H$	$kM$	$q$	$k_*/m_*$	$\mu_{\text{упр}}$
2. Безнапорная плановая фильтрация воды (I способ линеаризации)	$H$	$kh_c$	$\omega$	$k_*/m_*$	$\mu$
3. Безнапорная плановая фильтрация воды (II способ линеаризации)	$h^2/2$	$kh_c$	$\omega$	$k_*/m_*$	$\mu$
4. Фильтрация газа (воздуха)	$p^2/2$	$k_0 p_c / \mu_r$	—	—	$n_a$
5. Диффузия влаги в грунте	$W$	$D$	$q_w$	—	1
6. Теплопроводность в твердом теле	$T$	$\lambda$	$q_T$	$\alpha$	$\rho c$

В таблице приведены следующие функциональные характеристики и параметры:  $H$  — напор (head);  $h$  — напор и мощность (thickness) грунтовых вод (groundwater) на горизонтальном водоупоре;  $p$  — давление (pressure) в газе (воздухе);  $W$  — влажность грунта (moisture content);  $T$  — температура (temperature) твердого тела;  $kM$  — водопроводимость (transmissibility), где  $k$  — коэффициент фильтрации (hydraulic conductivity) и  $M$  — мощность напорного пласта;  $h_c$  — средняя мощность грунтовых вод;  $k_0$  — проницаемость (permeability);  $p_c$  — среднее давление;  $\mu_r$  — динамическая вязкость (dynamic viscosity) газа;  $D$  — коэффициент диффузии (diffusion coefficient);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности (heat conductivity);  $q$  — внутренний источник (source) или сток (sink) воды;  $\omega$  — инфильтрация (infiltration rate) или испарение (evaporation rate) воды;  $q_w$  — внутренний источник влаги;  $k_*/m_*$  — параметр перетекания через слабопроницаемый прослой мощностью  $m_*$  с коэффициентом фильтрации  $k_*$ ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи (convective heat transfer coefficient);  $\mu_{\text{упр}}$  — упругая водоотдача (storage coefficient);  $\mu$  — гравитационная водоотдача (specific yield);  $n_a$  — активная пористость (porosity) по газу;  $\rho$  — плотность (density);  $c$  — удельная теплоемкость (specific heat).

*Исправления справочного пособия к СНиП*

Приводим исправления справочного пособия к СНиП 2.06.15-85 «Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях» [208] по замеченным опечаткам. Ниже даны правильные фрагменты текста, рисунков и формул:

1) страница 9, строка 11 сверху:

«Отмеченные обстоятельства позволяют сделать следующий вывод: нельзя получить более достоверные результаты построением простейшей модели области фильтрации и последующей ее реализацией на АВМ и ЭВМ по сравнению с аналитическим методом...»;

2) страница 15, строка 1 снизу, формула (8):

$$h_1^2 = \frac{\omega}{k} \cdot \frac{r_0^2}{R^2(t) - r_0^2} \left[ R^2(t) \ln \frac{R(t)}{r_0} - \frac{R^2(t) - r_0^2}{2} \right] - \frac{\omega}{2k} (r^2 - r_0^2);$$

3) страница 17, таблица 1, формула (10):

$$\Delta h = \frac{\omega t}{\pi n} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\xi_1}{\tau} + \operatorname{arctg} \frac{\xi_2}{\tau} - \frac{\xi_1}{2\tau} \ln \frac{\xi_1^2}{\xi_1^2 + \tau^2} - \frac{\xi_2}{2\tau} \ln \frac{\xi_2^2}{\xi_2^2 + \tau^2} \right];$$

4) страница 22, продолжение табл. 1, условные обозначения дополнить:

$$\sigma = k_2/k_1; \quad a = kh_c/n; \quad k_{np} = \sqrt{k_x k_z}.$$

5) страница 23, рис. 3, наименование:

$$\operatorname{erf} x \text{ (1) и } i^2 \operatorname{erfc} x \text{ (2);}$$

6) страница 44, рис. 13, функция:

$$F_{16}(a, b) = \int_0^\infty \sin x \exp(-bx \operatorname{th} ax) \frac{dx}{x};$$

7) страница 46, продолжение табл. 10, условные обозначения дополнить:

$$k_{np} = \sqrt{k_z k_r};$$

8) страница 53, продолжение табл. 13, примечание дополнить:

$$\beta = \sigma \bar{M} (\bar{h}_c - \bar{M}) \quad \text{см. с. 46.}$$

9) страница 63, рис. 20, функция:

$$F_{26}(\bar{x}, f_0) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos \frac{2n-1}{2} \pi (1-\bar{x}) \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2}{4} \pi^2 f_0 \right];$$

10) страница 64, рис. 22, функция:

$$F_{27}(\bar{x}, f_0) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \pi n \bar{x} \exp(-\pi^2 n^2 f_0);$$

11) страница 69, строка 6 снизу:

«... приведенные в табл. 10, методика расчета остается прежней...»;

12) страница 131, рис. 58 и 59:

подрисуточные подписи поменять местами;

13) страница 155, строка 6 снизу, формула (73):

$$r_0 = \sqrt{\frac{ac + (b-c)c + 0,5(b-c)(a-c)}{\pi}};$$

14) страница 157, строка 7 снизу, формула:

$$\Phi_0(\bar{r}, \tau, \bar{h}_c) = 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{J_0(v_n \bar{r})}{v_n J_1(v_n)} \exp(-\tau v_n \operatorname{th} v_n \bar{h}_c);$$

15) страница 161, строка 9 сверху, формула (80):

$$\frac{k}{\omega_2} (h_e^2 - h_{op}^2) = R_\omega^2 \ln \frac{R_\omega}{r_0} - \frac{R_\omega^2 - r_0^2}{2};$$

16) страница 162, строка 8 сверху, формула (85):

$$Q = \pi \omega_1 r_0^2 + \pi \omega_2 (R_\omega^2 - r_0^2);$$

17) страница 162, строка 16 сверху, формула (89):

$$\xi_1 = \frac{m}{\pi r_0} \ln \frac{8r_0}{r_{др}},$$

где  $r_{др}$  — радиус дрены с фильтрующей обсыпкой.

18) страница 207, строка 14 снизу:

«... приведенных в табл. 31.»;

19) страница 208, строки 8–9 снизу, формула (184):

$$R \sqrt{\lg R - \lg r_0 - 0,217} = 0,66 \sqrt{\frac{k}{\omega} (2h_e - S_{др}) S_{др} - 0,5 r_0^2};$$

20) страница 214, строка 13 сверху:

«... определим по формуле (59)...»;

21) Страница 218, строка 8 сверху:

«Динамический коэффициент вязкости воздуха...».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С.К. Гидрогеологические расчеты вертикальных дренажей при осушении угольных месторождений. – М.: Углетехиздат, 1955. – 243 с.
2. Абрамов С.К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. – М.: Стройиздат, 1973. – 280 с.
3. Абрамов С.К., Кузнецова Н.А., Муфтахов А.Ж. Пластовые дренажи в промышленном и городском строительстве. – М.: Стройиздат, 1964. – 180 с.
4. Аверьянов С. Ф. Расчет линейной системы артезианских колодцев // Инженерный сборник. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 5. – Вып. 2. – С. 194-203.
5. Аверьянов С.Ф. Зависимость водопроницаемости почво-грунтов от содержания в них воздуха // Доклады АН СССР. – М., 1949. – Т. 69. – Вып. 2. – С. 141-144.
6. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод // Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. – М.: АН СССР, 1956. – С. 85-447.
7. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. – М.: Колос, 1982. – 238 с.
8. Алексеев В.С., Ткаченко В.П., Коммунар Г.М. Исследования гидравлических характеристик и параметров кольматажа дренажных скважин большого диаметра // Инженерная защита территорий: Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1982. – С. 65-73.
9. Аравин В. И. Приток грунтовых вод к водосборным совершенным колодцам // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1951. – Т. 46. – С. 63-71.
10. Аравин В. И. Приток грунтовых вод к котловану прямоугольной формы в плане, основанному на горизонтальном водонепроницаемом слое // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1938. – Т. 22. – С. 21-35.
11. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Плановая задача фильтрации // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1951. – Т. 44. – С. 3-22.
12. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. – М: Гостехтеориздат, 1953. – 616 с.
13. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчёты гидротехнических сооружений. – М.; Л.: Госстройиздат, 1955. – 292 с.
14. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1969. – 288 с.
15. Артемьева З.Н., Елизаров Б.А., Лукашенко П.К. Организация и технология дренажных работ. – Л.: ВО «Агропромиздат», 1988. – 239 с.
16. Арутюнян Р.Н. Вакуумное водопонижение в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
17. Атлас Омской области. – Омск: Изд-во «Роскартография», 1996. – 56 с.
18. Баренблатт Г.И. О некоторых неустановившихся движениях жидкости и газа в пористой среде // Прикладная математика и механика. – 1952. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 67-78.
19. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
20. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
21. Бахолдин Б.В. Гидродинамическое давление и несущая способность свай // Тр. НИИОСП. – 1975. – Вып. 65. – С. 158-165.
22. Бахолдин Б.В., Большаков Н.М. Исследование напряженного состояния глинистых грунтов при погружении свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1973. – №5. – С. 7-9.



23. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1978. – 328 с.
24. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1982. – Ч. 2. – 304 с.
25. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962. – Т. II. – 640 с.
26. Боголюбов К.С. Основы комплексного расчета вакуумного водопонижения эжекторными установками // Технология и технические средства строительного водопонижения и дренажа: Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1990. – С. 3-13.
27. Боголюбов К.С., Краковский Б.С., Кузьмина А.С. Экспериментальные исследования эжектора водопонижительной установки ЭСУ-20 при откачке водовоздушной смеси // Технология и технические средства строительного водопонижения и дренажа: Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1990. – С. 13-27.
28. Болгов М.В., Дзекцер Е.С., Писаренко В.Ф. Статистический анализ подтопления застраиваемых территорий // Водные ресурсы. – 1998. – № 5. – С. 534-540.
29. Болотских Н.С. Строительное водопонижение в сложных гидрогеологических условиях. – Киев: Изд-во «Будівельник», 1976. – 112 с.
30. Большая Советская Энциклопедия (В 30 томах). – 3-е изд. – М.: «Советская Энциклопедия», 1970-1978.
31. Борисов Ю. П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин // Труды МНИ. – М., 1951. – Вып. 8. – С. 170-184.
32. Борисов Ю.П. Учет неоднородности пласта при проектировании разработки нефтяной залежи // Труды Всесоюз. нефт. ин-та. – М., 1959. – Вып. 1. – С. 245-260.
33. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
34. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
35. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
36. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 255 с.
37. Бывальцев И.М. Расчет вентиляционных дренажных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1989. – 26 с.
38. Бывальцев И.М., Нагуманов Р.А. Защита территорий от подтопления комбинированной системой горизонтальных дрен и поглощающих скважин // Технология и технические средства строительного водопонижения и дренажа. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1990. – С. 91-94.
39. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971. – 452 с.
40. Веригин Н.Н. О гравитационно-упругом режиме фильтрации // Труды ин-та ВОДГЕО, вып. 22: Инженерная гидрогеология. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1969. – С. 6-17.
41. Веригин Н.Н. О неустановившемся движении грунтовых вод вблизи водохранилищ // Доклады Академии наук СССР. – М.: АН СССР, 1949. – Т. 66, № 6. – С. 1067-1070.
42. Веригин Н.Н. О фильтрации из канала в сухой грунт // Доклады Академии наук СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 79, № 4. – С. 581-584.
43. Веригин Н.Н. Потери на фильтрацию и подпор грунтовых вод в каналах и водохранилищах СССР // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986. – С. 5-8.

44. Веригин Н.Н. Расчет прямолинейных бесконечных рядов скважин // Труды лаборатории инженерной гидрогеологии. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1962. – Вып. 4. – С. 4-23.
45. Веригин Н.Н., Шестаков В.М. Методы расчета движения грунтовых вод в двухслойной среде. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1954. – 47 с.
46. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий / С.К. Абрамов, Н.Н. Биндеман, Ф.М. Бочеввер, Н.Н. Веригин. – М.: Госстройиздат, 1960. – 318 с.
47. Водопонижение в гидротехническом строительстве / Л.Н. Воробков, В.М. Гаврилко, П.В. Лобачёв, В.М. Шестаков. – М.: Стройиздат, 1960. – 244 с.
48. Волынский Б.А., Бухман В.Е. Модели для решения краевых задач. – М.: Физматгиз, 1960. – 451 с.
49. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. – М.: Недра, 1988. – 349 с.
50. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1980. – 359 с.
51. Гаврилко В.М., Алексеев В.С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
52. Гавшина З.П., Дзекцер Е.С. Условия подтопления грунтовыми водами застраиваемых территорий. – М.: Стройиздат, 1982. – 116 с.
53. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. – М.; Л.: ОНТИ, 1937. – 242 с.
54. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
55. Гидродинамические основы изучения режима грунтовых вод и его изменение под влиянием искусственных факторов (метод конечных разностей) / Г.Н. Каменский, И.К. Гавич, Н.А. Мясникова, С.М. Семенова // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. XXVI. – 190 с.
56. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. – М.: Пищепромиздат, 1960. – 684 с.
57. Гирицкий Н.К. Некоторые вопросы динамики подземных вод // Гидрогеология и инженерная геология. – М.; Л., 1947. – № 9. – С. 3—100.
58. Годес Э.М., Нарбут Р.М. Строительство в водной среде: Справочник. – Л.: Стройиздат, 1989. – 528 с.
59. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
60. Гольцов В.М. Оценка сохранности ненагруженных типовых свай в промерзающих пучинистых грунтах // Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири». – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – С. 440-441.
61. Горбунов-Посадов М.И. Разрыв сплошности и уплотнение основания телом забивной сваи // Тр. НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1970. – Вып. 60. – С. 118-141.
62. Григорьев В.М. Вакуумное водопонижение. – М.: Стройиздат, 1973. – 224 с.
63. Григорьев В.М. Понижение уровня грунтовых вод иглофильтровыми установками. – М.: Госстройиздат, 1955. – 232 с.
64. Григорьев В.М. Расчет неустановившегося движения грунтовых вод к иглофильтрам установок вакуумного водопонижения // Труды ин-та ВОДГЕО, вып. 22: Инженерная гидрогеология. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1969. – С. 56-62.
65. Громадка П.Т., Лей Ч. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах. – М.: Мир, 1990. – 304 с.
66. Гумилев Л.Н. Этногенез и биосфера Земли. – М.: ДИ-КАРТ, 1993. – 503 с.
67. Гусак А.А., Гусак Г.М., Бричикова Е.А. Справочник по высшей математике. – Минск: ТетраСистемс, 2000. – 640 с.

68. Давидянц Н.М., Карагодин А.Л., Карагодин В.Л. Городские водостоки. – М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1961. – 184 с.
69. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. – М.: Мир, 1969. – 312 с.
70. Дегтярев Б.М. Дренаж в промышленном и гражданском строительстве. – М.: Стройиздат, 1990. – 238 с.
71. Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Муфтахов А.Ж. Защита оснований зданий и сооружений от воздействия подземных вод. – М.: Стройиздат, 1985. – 264 с.
72. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.
73. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 544 с.
74. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 467 с.
75. Дренаж сельскохозяйственных земель: Пер. с англ. / Под ред. Дж.Н. Лутин – М.: Колос, 1964. – 720 с.
76. Емельянов А.В., Клейман Д.Б. Водопонижение в гражданском и промышленном строительстве. – М.: Стройиздат, 1971. – 81 с.
77. Ермаков С.М., Некруткин В.В., Сипин А.С. Случайные процессы для решения классических уравнений математической физики. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
78. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. – Киев: Вища школа, 1976. – 192 с.
79. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
80. Жиленков В.Н. Водопроницаемость экранов из глинистых грунтов (опыт исследований) // Фильтрационные исследования и расчёты при проектировании гидротехнических сооружений: Материалы Всесоюз. науч.-тех. совещания, Нарва, 18-20 мая 1982. – Л., 1983. – С. 119-127.
81. Жинкин Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве. – Л.; М.: Стройиздат, 1966. – 196 с.
82. Жуковский Н.Е. Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод // Журнал русского физико-химического общества. – 1889. - Т. XXI, отд. I, вып. 1. – С. 1-20.
83. Зальцберг Э.А. Режим и баланс грунтовых вод зоны избыточного увлажнения. – Л.: Недра, 1980. – 207 с.
84. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.
85. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
86. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
87. Зубец В.М., Вакар А.Е. Эксплуатация закрытых осушительных систем. – М.: ВО «Агропромиздат», 1989. – 136 с.
88. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. – М.: Высш. школа, 1985. – 352 с.
89. Истомина В.С., Буренкова В.В., Мишурова Г.В. Фильтрационная прочность глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1975. – 220 с.
90. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
91. Каменский Г.Н. Основы динамики подземных вод. – М.: Госгеолтехиздат, 1943. – 248 с.

92. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
93. Канюка Н.С., Шевчук Б.М., Белостоцкий О.Б. Справочник по проектированию организации строительства. – Киев: Изд-во «Будівельник», 1969. – 448 с.
94. Карнацевич И.В. Закономерности и ресурсы тепловлагообмена на территории Сибири: Дис. ... д-ра геогр. наук. – Иркутск.: СО АН СССР, 1991. – 466 с.
95. Карнацевич И.В. Расчеты тепловых и водных ресурсов малых речных водосборов на территории Сибири. Ч. I. Теплоэнергетические ресурсы климата и климатических процессов: Учеб. пособие / ОмСХИ. – Омск, 1989. – 76 с.
96. Карнацевич И.В. Расчеты тепловых и водных ресурсов малых речных водосборов на территории Сибири. Ч. II. Водный баланс и водные ресурсы: Учеб. пособие / ОмСХИ. – Омск, 1991. – 84 с.
97. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
98. Карслоу Х., Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. – М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. – 292 с.
99. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
100. Климат Омска / Под ред. Ц.А. Швер. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.
101. Климентов П.П., Кононов В.М. Динамика подземных вод. – М.: Высшая школа, 1985. – 384 с.
102. Клиорина Г.И., Осин В.А., Шумилов М.С. Инженерная подготовка городских территорий. – М.: Высшая школа, 1984. – 271 с.
103. Кнаупе В. Устройство котлованов и водопонижение / Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1988. – 376 с.
104. Кожин И.В., Добровольский Р.Г. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. – М.: Стройиздат, 1988. – 348 с.
105. Кондон Р. IP — новый шаг в технологии программирования // Компьютеры + программы. – Киев: Комиздат, 1995. – № 8. – С. 19.
106. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
107. Коротеев А.П. Спутник гидрогеолога. – М.; Л.: ОНТИ, 1934. – 316 с.
108. Косте Ж., Санглер Г. Механика грунтов. – М.: Стройиздат, 1981. – 456 с.
109. Костерин Э.В. Основания и фундаменты. – М.: Высшая школа, 1990. – 431 с.
110. Костин С.И. Основы метеорологии и климатологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1955. – 395 с.
111. Кох О. Excel 4.0 для пользователя. – М.: БИНОМ, 1994. – 448 с.
112. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
113. Крейшман К.К. Защита деревянных конструкций от гниения, древоточцев и огня. – Л.: Стройиздат, 1967. – 136 с.
114. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
115. Кристеа Н. Подземная гидравлика. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – Т. II. – 492 с.
116. Куприянов Е.М. Уплотнение и осадки грунтов. – М.: Госстройиздат, 1954. – 168 с.
117. Куранов Н.П. Линейные модели гидродинамической теории фильтрации // Доклады Академии наук СССР. – М.: Наука, 1984. – Т. 278, № 2. – С. 309-313.

118. Куранов Н.П. О связи гидродинамической и гидравлической теорий фильтрации и способах их линеаризации при исследовании вопросов подтопления территорий грунтовыми водами // Инженерная защита территорий. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – С. 5-20.
119. Куранов Н.П. Прогноз формирования верховодки на непроницаемых и слабопроницаемых породах // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986. – С. 51-61.
120. Куранов Н.П. Прогнозы подтопления и дренирования застроенных территорий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 42 с.
121. Кусакин И.П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 248 с.
122. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
123. Ландсберг Г.Е. Климат города: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 248 с.
124. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. – 316 с.
125. Лейбензон Л.С. Движение газа в пористой среде // Нефтяное и сланцевое хозяйство. – 1929. – № 10. – С. 497-519.
126. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988. – 228 с.
127. Ломизе Г.М., Нетушил А.В. Электроосмотическое водопонижение. – М.; Л.: Энергоиздат, 1958. – 173 с.
128. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра, 1984. – 511 с.
129. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. – Л.: Недра, 1978. – 496 с.
130. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1976. – 408 с.
131. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
132. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
133. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
134. Маккавеев А.А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
135. Мак-Кинни Б. Крепкий орешек Visual Basic 4. – М.: Microsoft Press, 1996. – 560 с.
136. Мариупольский Г.М. Основные параметры водопонижительных систем и методика типовых расчетов // Индустриальные методы строительного водопонижения. – 1962. – № 48. – С. 5-37.
137. Мариупольский Г.М. Теоретические основы и расчет гидромеханического и электроосмотического вакуумирования фильтрационного потока при водопонижении // Специальные способы строительного водопонижения. – 1959. – № 35. – С. 5-30.
138. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
139. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
140. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.
141. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высш. школа, 1982. – 512 с.
142. Мезенцев В.С. Гидролого-климатические основы проектирования гидромелиораций: Учеб. пособие / ОмСХИ. – Омск, 1993. – 128 с.

143. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Антропогенные изменения в режиме Иртыша у Омска до 1980 г. // Водохозяйственные проблемы освоения Сибири. – Омск: ОмГАУ, 1996. – С. 10-17.
144. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.
145. Мелиорация и водное хозяйство: Справочник / Под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – Т. 5. – 400 с.
146. Мелиорация и использование осушенных земель / Под ред. В.Е. Алексеевского. – Киев: Урожай, 1988. – 184 с.
147. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
148. Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло) / Под ред. Ю.А. Шрейдера. – М.: Физматгиз, 1962. – 332 с.
149. Методические рекомендации по оценке ущерба от подтопления территорий городов и определению экономической эффективности применения предупредительных и защитных мероприятий / НИИЭС Госстроя СССР. – М., 1986. – 64 с.
150. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения / Ф.М. Бочевер и Н.Н. Веригин; ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Госстройиздат, 1961. – 200 с.
151. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем / С.В. Васильев, Н.Н. Веригин, Б.А. Глейзер и др.; Под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Колос, 1970. – 440 с.
152. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. – М.: Недра, 1983. – 358 с.
153. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. – М.: Недра, 1974. – 295 с.
154. Молоков М.В. Дождевая канализация площадок промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1964. – 184 с.
155. Момчилов В.С. Защита шахт от подземных вод. – М.: Недра, 1989. – 189 с.
156. Муфтахов А.Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975. – 44 с.
157. Муфтахов А.Ж. О влиянии интенсивности дополнительной инфильтрации на динамику уровней грунтовых вод при подтоплении территорий // Инженерная защита территорий. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – С. 20-24.
158. Муфтахов А.Ж. Расчеты горизонтальных дренажей в двухслойных пластах при заглублении дрен в нижний слой // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986. – С. 146-151.
159. Муфтахов А.Ж. Фильтрация загрязненных вод к кольцевому горизонтальному дренажу // Гидрогеологические исследования и расчеты защиты подземных вод от загрязнения. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – С. 73-77.
160. Муфтахов А.Ж., Абдель Азиз Н.М.Х. Экспресс-методы определения фильтрационных параметров слабопроницаемых пород // Технология и технические средства строительного водопонижения и дренажа. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1990. – С. 27-36.
161. Муфтахов А.Ж., Брумштейн Ю.М. Методика численного решения двумерных осесимметричных задач фильтрации со свободной поверхностью // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988. – С. 38-48.
162. Муфтахов А.Ж., Шевчик А.П. Прогноз влажностного режима слабопроницаемых грунтов при их вентиляционном дренировании // Методы расчета процессов

- массопереноса в гидрогеологических исследованиях. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1984. – С. 28-33.
163. Найфельд Л.Р. Инженерная подготовка пойменных и заболоченных территорий для градостроительства. – М.: Стройиздат, 1974. – 179 с.
164. Найфельд Л.Р., Тарасов Н.А. Освоение неудобных земель под городскую застройку. – М.: Стройиздат, 1968. – 224 с.
165. Нарбут Р.М. Работа свай в глинистых грунтах. – Л.: Стройиздат, 1972. – 160 с.
166. Недрига В.П. Расчет пространственной фильтрации в земляных плотинах на участке их примыкания к бетонным сооружениям с учетом водопроницаемости противофильтрационной диафрагмы. – М.: Изд-во ВОДГЕО, 1959. – 118 с.
167. Недрига В.П., Покровский Г.И. К вопросу о фильтрационном расчете рядов взаимодействующих скважин // Инженерная гидрогеология: Труды института ВОДГЕО. – М., 1976. – Вып. 52. – С. 5-8.
168. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1971. – 267 с.
169. Нумеров С.Н. Медленно изменяющаяся неустановившаяся фильтрация // Известия ВНИИГ. – Л., 1948. – Т. 37. – С. 3-29.
170. Нумеров С.Н. О фильтрации к несовершенной дренажной траншее в горизонтальном артезианском пласте // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1954. – Т. 52. – С. 119-130.
171. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.
172. Омск – 2000: Справочный материал для депутатов городского совета / ГлавОмскархитектура. – Омск, 1989. – 56 с.
173. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. – М.: Мир, 1990. – 662 с.
174. Орвис В.Д. Excel для ученых, инженеров и студентов. – Киев: Юниор, 1999. – 528 с.
175. Орвис В.Д. Visual Basic for Application на примерах. – М.: БИНОМ, 1995. – 512 с.
176. Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
177. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / Гавич И.К. и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
178. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочевер, И.В. Гармонов, А.В. Лебедев, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1969. – 368 с.
179. Основы советского градостроительства / Центральный научно-исследовательский и проектный институт по градостроительству. – М.: Стройиздат, 1967. – 196 с. – Т. 3.
180. Павилонский В.М. Исследование метода уплотнения на коэффициент фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та ВОДГЕО, вып. 35: Гидрогеология. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1972. – С. 45-50.
181. Павилонский В.М. Метод определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та ВОДГЕО, вып. 7. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1964. – С. 59-79.
182. Павилонский В.М. Противофильтрационные устройства накопителей отходов промышленных предприятий // Исследования хвостохранилищ и накопителей промстоков. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – С. 12-28.
183. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 284 с.
184. Павловская Л.Н., Шестаков В.М. Методические указания по фильтрационным расчетам водопонижительных установок. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 124 с.

185. Павловский Н.Н. Основы метода гидромеханического решения задачи о свободной фильтрации из открытых русел // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1936. – Т. 19. – С. 5-24.
186. Павловский Н.Н. Собрание сочинений. Т. II. Движение грунтовых вод. – М.; Л.: АН СССР, 1956. – 772 с.
187. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. – Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института, 1922. – 752 с.
188. Панов Д.Ю. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений. – М.; Л.: Гостехтеориздат, 1950. – 184 с.
189. Пек Р.Б., Хенсон У.Э., Торнбурн Т.Х. Основания и фундаменты: Пер. с англ. – М.: Госстройиздат, 1958. – 336 с.
190. Песков В.Г., Зинь В.С., Мобило Л.В. Механизация эксплуатационных работ на гидромелиоративных системах. – М.: Агропромиздат, 1986. – 143 с.
191. Пилатовский В. П. Основы гидромеханики тонкого пласта. – М.: Недра, 1966. – 309 с.
192. Пильдыш С.А. Определение фильтрационных параметров слабопроницаемого разделяющего слоя грунта // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988. – С. 83-88.
193. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 456 с.
194. Плотников Н.А., Алексеев В.С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
195. Плотников Н.И., Краевский С. Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. – М.: Недра, 1983. – 208 с.
196. Поздняков С.П. Исследование процессов дренирования покровных отложений (на примере западной части Чуйской впадины): Автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук. – М.: МГУ, 1984. – 18 с.
197. Полубаринова-Кочина П.Я. О перемещении языка грунтовых вод при фильтрации из канала // Доклады Академии наук СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Т. 82, № 6. – С. 853-855.
198. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Гостехтеориздат, 1952. – 676 с.
199. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
200. Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н. Математические методы в вопросах орошения. – М.: Наука, 1969. – 416 с.
201. Пономаренко Ю.В., Анпилов В.Е. Лучевой дренаж застроенных территорий. – М.: Недра, 1989. – 198 с.
202. Последствия подтопления застроенных территорий и способы их дренирования / Н.П. Куранов, А.Ж. Муфтахов, А.П. Шевчик, И.М. Бывальцев // Итоги науки и техники: Гидрогеология. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1991. – Т.13. – 130 с.
203. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплого режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02-85) / СоюздорНИИ. – М.: Стройиздат, 1989. – 97 с.
204. Пособие по производству работ при устройстве оснований и фундаментов (к СНиП 3.02.01-83). – М.: Стройиздат, 1986. – 576 с.
205. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве / С.К. Абрамов, Б.М. Дегтярев, Е.С. Дзекцер и др.; Под. ред. С.К. Абрамова. – М.: Стройиздат, 1978. – 177 с.



206. Прогноз и предотвращение подтопления подземными водами Омского метрополитена и прилегающей территории (1 очередь 1 линии): Отчет о НИР / СиБАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. - № ГР 01920019546; Инв. № 03920013881. – Омск, 1992. – 85 с.
207. Прогноз и предотвращение подтопления подземными водами Омского метрополитена и прилегающей территории (2 очередь 1 линии): Отчет о НИР / СиБАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. - № ГР 01930008972; Инв. № 03940001030. – Омск, 1993. – 76 с.
208. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: Справочное пособие к СНиП / А.Ж. Муфтахов, И.В. Коринченко, Н.М. Григорьева и др.; ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1991. – 272 с.
209. Радищев П.В. Градостроительные методы предупреждения подтопления территорий и зданий населённых мест юга Западно-Сибирской равнины / ВДНХ СССР, СиБАДИ. – Омск: Изд-во «Омская правда», 1986. – 8 с.
210. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1967) / Под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. – М.: Наука, 1969. – 546 с.
211. Разработка систем вакуумного водопонижения для подземных щитовых проходок (на примере 1 очереди 1 линии Омского метрополитена): Отчет о НИР / СиБАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. – № ГР 01940001695; Инв. № 03940001031. – Омск, 1993. – 51 с.
212. Разумов Г.А., Хасин М.Ф. Тонущие города. – М.: Стройиздат, 1991. – 256 с.
213. Рекомендации по методике оценки и прогноза гидрогеологических условий при подтоплении городских территорий / ПНИИИС Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с.
214. Рекомендации по натурному обследованию дренажей застроенных территорий / ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1984. – 14 с.
215. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 141 с.
216. Рекомендации по определению капитальных вложений и эксплуатационных расходов для сооружений инженерной защиты от подтопления территорий городов / ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1987. – 47 с.
217. Рекомендации по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Изд-во ВНИИ ВОДГЕО, 1976. – 324 с.
218. Рекомендации по проектированию и расчетам защитных сооружений и устройств от подтопления промышленных площадок грунтовыми водами / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Изд-во ВНИИ ВОДГЕО, 1979. – 328 с.
219. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
220. Ретхати Л. Грунтовые воды и строительство: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1989. – 432 с.
221. Романов А.В. Приток воды к водозаборам подземных вод и дренам // Труды ин-та ВОДГЕО, вып. 1: Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1952. – С. 62-131.
222. Рудаков В.К., Харченко Э.М. Расчеты методом Монте-Карло пространственной неустойчивившейся фильтрации при орошении в неоднородных водоносных пластах // Вопросы гидрогеологических прогнозов в связи с ирригацией земель и водоснабжением: Тр. Днепропетровского гос. ун-та. – Днепропетровск, 1973. – Вып. 6. – С. 18-23.

223. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1977. – 240 с.
224. Руководство пользователя MathCAD 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчёты в среде Windows 95: Пер. с англ. – М.: Изд-во «Филинь», 1996. – 712 с.
225. Савельев А.Я., Сазонов Б.А., Лукьянов С.Э. Персональный компьютер для всех. Кн. 4. Вычислительные и графические возможности. – М.: Высшая школа, 1991. – 208 с.
226. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
227. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
228. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
229. Самсонов Б.Г. Приток подземных вод к разведочным горным выработкам. – М.: Недра, 1991. – 159 с.
230. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. – М.: Физматгиз, 1962. – 464 с.
231. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – 9-е изд. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
232. Сенченко Н.М. Сырость в жилых зданиях, её источники и борьба с ней. – М.: Стройиздат, 1967. – 257 с.
233. Силин-Бекчурин А.И. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1965. – 375 с.
234. Смородинов М.И. Водопонижительные установки. – М.: Стройиздат, 1984. – 117 с.
235. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений. – М.: ГУП ЦПП, 1995. – 50 с.
236. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
237. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с.
238. СНиП 2.06.14-85. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 40 с.
239. СНиП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 20 с.
240. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 58 с.
241. СНиП 3.01.01-85\*. Организация строительного производства. – М.: ГУП ЦПП, 1995. – 36 с.
242. СНиП II-3-79\*\*. Строительная теплотехника. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 40 с.
243. Совершенствование методов интерпретации данных кустовых откачек из скважин при определении гидрогеологических параметров грунтов (на примере 1 очереди 1 линии Омского метрополитена): Отчет о НИР / СибАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. – № ГР 01940001694; Инв. № 03940001032. – Омск, 1993. – 49 с.
244. Соколовский В.В. Теория пластичности. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
245. Сологаев В.И. Автономная защита от подтопления застройки в Омской области // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 22-26.
246. Сологаев В.И. Аналоговое моделирование трубопроводных систем на языке функциональных блоковых диаграмм // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 31-35.
247. Сологаев В.И. Влияние несовершенных свайных фундаментов на фильтрацию грунтовых вод // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986. – С. 151-154.

248. Сологаев В.И. Влияние свайных оснований на фильтрационный поток из водоемов // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986. – С. 69-74.
249. Сологаев В.И. Задачи по механике жидкости и газа: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1995. – 24 с.
250. Сологаев В.И. Защита от подтопления в городском строительстве. Устройство и работа: Конспекты лекций. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – 56 с.
251. Сологаев В.И. К определению проницаемости грунта около забивных свай // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1991. – № 1. – С. 110-112.
252. Сологаев В.И. Компьютерное моделирование трёхмерной нестационарной фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 236 - 242.
253. Сологаев В.И. Конспекты лекций по аэродинамике. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1992. – 28 с.
254. Сологаев В.И. Конспекты лекций по гидравлике. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1991. – 36 с.
255. Сологаев В.И. Концепции моделирования защиты от подтопления территорий застройки // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 17-22.
256. Сологаев В.И. Механика жидкости и газа. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1995. – 56 с.
257. Сологаев В.И. Моделирование фильтрации с применением компьютерных ОЛЕ-технологий // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 229-236.
258. Сологаев В.И. Об изменении проницаемости грунта, уплотненного забивной сваей // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – № 1. – С. 112-114.
259. Сологаев В.И. Прогноз и моделирование верховодки на вытянутых геологических и техногенных линзах // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 26-31.
260. Сологаев В.И. Проектирование крестообразного лучевого дренажа // Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири». – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – С. 430-432.
261. Сологаев В.И. Разностные схемы компьютерного моделирования фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 242-247.
262. Сологаев В.И. Расчет подтопления застраиваемых территорий с учетом влияния свайных оснований: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 242 с.
263. Сологаев В.И. Расчет подтопления застраиваемых территорий с учетом влияния свайных оснований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 23 с.
264. Сологаев В.И. Фильтрационный расчёт двухлинейного ряда водосбросных колодцев / СибАДИ. – Омск, 1990. – 7 с. – Деп. ВНИИНТПИ № 10683. – Библ. указатель деп. рукописей ВНИИНТПИ, 1990. – Вып. 9.
265. Сологаев В.И. Фильтрация загрязненных вод к горизонтальным дренажам на территориях со свайными основаниями зданий и сооружений // Гидрогеологические исследования и расчеты защиты подземных вод от загрязнения. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – С. 94-100.
266. Сооружение Кругобайкальской железной дороги: Сборник пояснительных записок, технических условий и расчетов сооружений. – С.-Петербург, 1907. – 722 с.

267. Сотников А.Б. Гидрогеологические прогнозы при строительстве в суровых климатических условиях. – М.: Недра, 1984. – 80 с.
268. Спорышев В.С. Влияние пластового включения круглой формы на однородный фильтрационный поток // Труды Всесоюзного нефтегазового НИИ. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – С. 10-22.
269. Справочник по климату СССР. Ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 72 с.
270. Справочник по климату СССР. Ч. I. Температура воздуха. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Метеорологические данные за отдельные годы. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 256 с.
271. Справочник по климату СССР. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 260 с.
272. Справочник по климату СССР. Ч. VIII. Температура поверхности почвы. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Метеорологические данные за отдельные годы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т. 1. – 254 с.
273. Справочник по осушению горных пород. – М.: Недра, 1984. – 572 с.
274. Справочник по проектированию инженерной подготовки застраиваемых территорий / Под ред. В.С. Нищука. – Киев: Будівельник, 1983. – 192 с.
275. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
276. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. – Л.: Недра, 1979. – 512 с.
277. Строительная механика / Под ред. А.В. Даркова. – М.: Высш. школа, 1976. – 600 с.
278. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. – Кн. 2.
279. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 508 с.
280. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958. – 608 с.
281. Технология городского строительства / Под ред. П.Х. Бесценного. – М.: Высш. школа, 1975. – 336 с.
282. Технология строительных процессов / Под ред. Н.Н. Данилова. – М.: Высш. школа, 2000. – 464 с.
283. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Конструкции пластовых дренажей. Серия 8.005-1. Вып. 0. Материалы для проектирования / Институт «Фундаментпроект» Минмонтажспецстроя СССР. – М., 1986. – 39 листов.
284. Тихомолова К.П. Электроосмос. – Л.: Химия, 1989. – 248 с.
285. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
286. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
287. Тулаев А.Я. Осушение земляного полотна городских дорог. – М.: Стройиздат, 1983. – 132 с.
288. Тюменцева О.В. О развитии процесса подтопления в городе Омске // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 67-73.

289. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / ГГИ гидрометслужбы СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 84 с.
290. Усенко В.С. Вопросы теории фильтрационных расчетов дренажных и водозаборных скважин. – М.: Колос, 1968. – 302 с.
291. Уэллс Э., Харшбаргер С. Microsoft Excel 97. Библиотека разработчика: Пер. с англ. – М.: Изд-во «Русская редакция», 1998. – 536 с.
292. Фальковский Н.И. История водоснабжения в России. – М.; Л.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1947. – 308 с.
293. Федоров В.И. Активная защита сооружений и фундаментов в обводняющихся пучинообразных грунтах. – Владивосток: Дальпресс, 1995. – 156 с.
294. Флорин В.А. Вопросы консолидации земляных масс // Известия ВНИИГ. – Л., 1947. – Т. 34. – С. 133-146.
295. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. I. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. – М.: Госстройиздат, 1959. – 358 с.
296. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. II. Деформация и устойчивость оснований сооружений. – М.: Госстройиздат, 1961. – 544 с.
297. Флорин В.А. Расчеты оснований гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1948. – 188 с.
298. Флорин В.А. Теория уплотнения земляных масс. – М.: Госстройиздат, 1948. – 284 с.
299. Форхгеймер Ф. Гидравлика. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 616 с.
300. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне (гидрологические аспекты). – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 240 с.
301. Холопов О.В. Расчет времени затопления грунтовыми водами линейных подземных сооружений // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления. – М.: ВНИИ ВОДГЕО 1988. – С. 77-83.
302. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. – М.: Недра, 1966. – 304 с.
303. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 196 с.
304. Чекалюк Э. Б. Об эффективном радиусе влияния скважины // Нефтяное хозяйство. – М., 1950. – № 4. – С. 33—36.
305. Чепмен Р.Е. Геология и вода. Введение в механику флюидов для геологов. – Л.: Недра, 1983. – 160 с.
306. Чернега Л.Г. и др. Экономическая оценка последствий подтопления на урбанизированных территориях // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988. – С. 48-53.
307. Черный Г.И. Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. – Киев: Наукова думка, 1979. – 132 с.
308. Чистякова С.Б., Семенова Е.С. Озеленение улиц южного города с учетом защиты от инсоляции // Исследования по микроклимату и шумовому режиму населенных мест / ЦНИИПградостроительства. – М.: Стройиздат, 1965. – Сб. 3. – С. 33-42.
309. Швидлер М. И. Фильтрационные течения в неоднородных средах. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 136 с.
310. Швидлер М.И. Решение плоских фильтрационных задач методом Монте-Карло // Известия АН СССР. ОТН. Мех. и машиностр.. – М., 1963. – № 1. – С. 141-145.
311. Швидлер М.И. Статистическая гидродинамика пористых сред. – М.: Недра, 1985. – 288 с.

312. Шепелев Н.П., Шумилов М.С. Реконструкция городской застройки. – М.: Высшая школа, 2000. – 271 с.
313. Шержуков Б.С., Малышев А.С. Расчет перехватывающего дренажа при изменяющемся во времени уровне в хранилище жидких отходов промпредприятий // Гидрогеологические исследования и расчеты защиты подземных вод от загрязнения. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – С. 86-91.
314. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 368 с.
315. Шестаков В.М., Кравченко И.П., Пашковский И.С. Практикум по динамике подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 224 с.
316. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Сойфер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. – М.: Недра, 1982. – 245 с.
317. Шестаков В.Н. Основы прогнозирования теплофизического режима в технологии дорожного строительства: Дис. ... д-ра техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1997. – 343 с.
318. Шнейдерман Б. Психология программирования: Человеческие факторы в вычислительных и информационных системах. – М.: Радио и связь, 1984. – 304 с.
319. Шоу Р.Х. Модель компонентного объекта OLE // PC Magazin. – 1996. – № 6. – С. 145-150.
320. Шоу Р.Х. Основы технологии OLE // PC Magazin. – М., 1996. – № 2. – С. 145-150.
321. Эггельсманн Р. Руководство по дренажу / Пер. с нем. – М.: Колос, 1984. – 247 с.
322. Элбакидзе М.Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.
323. Эмих В.Н. Решение одной плановой задачи неустановившейся фильтрации грунтовых вод методом статистических испытаний // Прикладная механика и техническая физика. – М., 1968. – № 4. – С. 163-168.
324. Яковлев С.В., Ласков Ю.М. Канализация. – М.: Стройиздат, 1987. – 319 с.
325. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
326. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control // J. Irrigation and Drain. Eng. – 1989. -115, № 4. - P. 588—607.
327. Blight G.E. Lowering of the groundwater table by deep-rooted vegetation — The geotechnical effects of water table recovery // Groundwater Eff. Geotechn. Eng: Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. — 3 Sept., 1987. Vol. 1.—Rotterdam; Boston, 1987.—P. 285—288.
328. Blower Tim, Simpson Brian. Rising ground-water levels beneath London // «Struct. Surv.», 1988. – 6, № 3. – P. 229-232.
329. Borreman N. Onderzoek naar de oorzaak van te lage grondwaterstanden in stedelijk gebied // Tijdschr. watervoorz. en afvalwaterbehandel. – 1988. – 21, № 26. – S. 776-779, 755, 775.
330. Boussinesq J. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. – C.R. Acad. Sci. – Paris. – J. Math. pures et appl., 1903-1904. – 10. – P. 5-78, 363-394.
331. Darcy H. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. – Paris, 1856. – 647 p.
332. Davies J. A. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation // Groundwater Eff. Geotechn. Eng: Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. – 3 Sept., 1987. - Vol. 1. – Rotterdam; Boston, 1987. – P. 139—144.
333. Dupuit J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. – Paris: Dunod editeur, 1863. – 304 p.

334. Forchheimer Ph. Hydraulik. – Leipzig, Berlin: Teubner, 1924. – 556 s.
335. Geldof G.D., Boere E.N., Ven F. H. M., Acht W.N. Grondwaterbeheersing in stedelijke gebieden. // «PT/Civ. techn.». – 1987. – 42, № 1. – S. 43-48.
336. Gerdes H. Grundwasserdüker bei Tunnelbauwerken // «Wasser und Boden». - 1987. – 39, № 11. – S. 575-578.
337. Karácsonyi Sándor. közmuvesltés hatása 0 település alatti talajvizszint alakulására // Közlekedésépítés mélyépítéstud. szem. – 1988. – 38, № 7. – S. 305-309, 334, 335, 336.
338. Kozeny J. Hydrologische Grundlagen des Dränversuches. – Wien: Acad. Wissensch, 1927. – 136 (2a). – S. 271-406.
339. Lin Chen, Kaiming Tian. The effect of vegetation transpiration on the deformation of high void ratio expansive soil foundation // «Transp. Res. Rec.». – 1985. – № 1032. – P. 68-75.
340. Olsen H.W. Darcy's law in saturated kaolinite // Water Resources Res. – 1966. – 2. – P. 287-296.
341. Olsen H.W. Deviations from Darcy's law in saturated clays // Proc. Soil Sci. Soc. Amer. – 1965. – 29. – P. 135-140.
342. Pavilonsky V. M. The absence of threshold gradient in clayey soils // Groundwater Eff. Geotechn. Eng: Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. – 3 Sept., 1987. – Vol. 2. – Rotterdam; Boston, 1987. – P. 917-921.
343. Perger Laszló. Belterületi talajvízproblémák // Műnőkeol. szem. – 1988. – № 36. – S. 69-84.
344. Pope R.G., Ho C.S. The effect of piles and caissons on groundwater flow. – Hong Kong Engineer. – 1982, 10, № 11, – P. 25-27.
345. Schneider G. Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumabnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umströmungsmöglichkeit // Die Bautechnik. – 1983. – 60B, H. 6. – S. 189-196.
346. Schneider G. Berechnung der Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumabnahmen // Die Bautechnik. – 1981. – 58B, H. 2. – S. 67-69.
347. Schneider G. Möglichkeit zur Berechnung der Grundwasserspiegelbeeinflussung durch ein sehr langes Bauwerk mit abschnittweisen Durchbrüchen // Die Bautechnik. – 1982. – 59B, H. 10. – S. 332-337.
348. Slichter C. Theoretical investigation of the motion of ground-water // XIX Ann. Rep. United States Geol. Surv. – 1897-1898. – 295 p.
349. Sochatzy G. Verfahren zur Beherrschung der Grundwasserprobleme in Zuge von NÖT-Vortrieben beim U-Bahn-Bau der Stadt Wien // «Berg- und Huttenmänn. Monatsh.». - 1988, 133, № 6. – S. 287-296.
350. Stallmann R.W. Effects of Water Table Conditions on Water Level Changes near Pumping Wells // Water Resources Research. – 1965. – Vol. 1, № 2. – P. 295-312.
351. Terzaghi K. von. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. – Leipzig, Wien: Deuticke, 1925. – 399 s.
352. Volder H. de, Liebaert M., Doyen L. Ecoulement de la nappe phréatique au droit des ouvrages métro // Groundwater Eff. Geotechn. Eng., Vol. 1. – Rotterdam; Boston, 1987. – P. 145-148.

## Буквенные обозначения

- $A$  и  $B$  — длина и ширина объекта,  $m$  (см. с. 266).
- $a$  и  $b$  — прогоночные коэффициенты (см. с. 314).
- $a$  — коэффициент пьезо- или уровнепроводности,  $m^2/сут$  (см. с. 97).
- $a$  — шаг свай в ряду,  $m$  (см. с. 146).
- $a_c$  — коэффициент сжимаемости грунта,  $Па^{-1}$  (см. с. 73).
- $a_y$  — коэффициент уровнепроводности грунтовых вод,  $m^2/сут$  (см. с. 96).
- $C$  — константа интегрирования (см. с. 223).
- $C_r$  — сцепление грунта,  $Па$  (см. с. 139).
- $D$  — коэффициент диффузии,  $m^2/сут$  (см. с. 102).
- $d$  — размер поперечного сечения свай,  $m$  (см. с. 147).
- $DL, Dx, Dy, Dz, Dr$  — пространственные шаги конечно-разностной сетки,  $m$  (см. с. 272).
- $Dt$  — шаг времени на конечно-разностной сетке,  $сут$  (см. с. 276).
- $Dt_{max}$  — максимально возможный шаг времени на одно-, двух- и трехмерных МКР-моделях по явным схемам (критерий устойчивости),  $сут$  (см. с. 277 – 278).
- $e$  — коэффициент пористости (см. с. 71).
- $F$  — площадь,  $m^2$  (см. с. 127).
- $G$  — степень влажности грунта (см. с. 84).
- $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$  (см. с. 80).
- $H$  — напор,  $m$  (см. с. 76).
- $h$  — мощность грунтовых вод,  $m$  (см. с. 94).
- $h_e$  — естественная мощность грунтовых вод,  $m$  (см. с. 16).
- $h_p$  — пьезометрическая высота или пьезометрический напор,  $m$  (см. с. 17).
- $h_k$  — высота капиллярного поднятия,  $m$  (см. с. 74, 82).
- $h_c$  — средняя мощность грунтовых вод,  $m$  (см. с. 95).
- $I$  — пьезометрический уклон или градиент напора (см. с. 78).
- $i, j$  — индексы или номера (см. по тексту).
- $k$  — коэффициент фильтрации,  $m/сут$  (см. по тексту).
- $k_0$  — газопроницаемость,  $m^2$  (см. с. 99).
- $k_{\varepsilon}$  — коэффициент электроосмотической фильтрации,  $m^2/(B \cdot сут)$  (см. с. 104).
- $L$  — длина пути фильтрации,  $m$  (см. с. 78).
- $L$  — длина пути диффузии,  $m$  (см. с. 102).
- $L$  — длина области фильтрации,  $m$  (см. с. 123).
- $L_t$  — расчетная длина области питания траншеи или вытянутого котлована (для расчета водопритока),  $m$  (см. с. 202).
- $L_{вл}$  — зона влияния откачки из траншеи или вытянутого котлована на УГВ (длина кривой депрессии),  $m$  (см. с. 202).
- $L_{исп}$  — удельная теплота испарения воды,  $МДж/(m^2 \cdot мм)$  (см. с. 27).
- $L_{яз}$  — длина языка подтопления,  $m$  (см. с. 164, 170).



$l$  — мощность водонасыщенного слоя грунта, примыкающего к боковой поверхности сваи,  $m$  (см. с. 140).  
 $l$  — ширина зоны стока с края вытянутой линзы,  $m$  (см. с. 158).  
 $l$  — длина фильтра скважины,  $m$  (см. с. 274).  
 $M$  — мощность напорного водоносного пласта,  $m$  (см. с. 17).  
 $m$  — расстояние от водоупора до низа траншеи, котлована или дренажа,  $m$  (см. с. 203, 206, 207).  
 $N$  — число пространственных измерений (см. с. 73).  
 $N_{\text{ш}}$  — число шагов конечно-разностной сетки (см. с. 273).  
 $n$  — эмпирический коэффициент в формуле (1) (см. с. 26).  
 $n$  — пористость грунта (см. с. 71).  
 $p$  — давление,  $Па$  (см. по тексту).  
 $Q$  — расход (полный водоприток),  $m^3/сут$  (см. с. 76, 206).  
 $q$  — расход (водоприток) на 1 погонный метр длины траншеи, вытянутого котлована или дренажа,  $m^3/(сут \cdot m)$  (см. с. 202, 222, 266).  
 $R$  — радиус чего-либо,  $m$  (см. по тексту).  
 $R_{\text{мст}}$  — радиационный баланс (остаточная радиация), измеренный на городской метеостанции,  $МДж/м^2$  (см. с. 27).  
 $r$  — радиальная или горизонтальная цилиндрическая координата,  $m$  (см. по тексту).  
 $S$  — понижение (перепад) уровней воды,  $m$  (см. с. 128, 203).  
 $S$  — номер шага времени в МКР-модели (см. с. 282).  
 $T$  — температура,  $^{\circ}C$  (см. с. 79).  
 $t$  — время,  $сут$  (см. по тексту).  
 $U$  — математическая подстановка (см. с. 96, 155, 165).  
 $U$  — электрическое напряжение или потенциал,  $B$  (см. с. 104, 107, 241, 362).  
 $u$  — периметр сваи,  $m$  (см. с. 140).  
 $V$  — объем,  $m^3$  (см. с. 76).  
 $\mathcal{V}$  — скорость фильтрации,  $m/сут$  (см. с. 76).  
 $W$  — массовая влажность грунта или материала,  $кг/кг$  (см. с. 105).  
 $W_o$  — объемная влажность грунта или материала (см. с. 105).  
 $x, y$  — горизонтальные декартовы координаты,  $m$  (см. по тексту).  
 $z$  — вертикальная декартова координата или вертикальная отметка точки,  $m$  (см. по тексту).  
 $z$  — глубина залегания УГВ от поверхности земли в формуле (1) (см. с. 26).  
 $z_0$  — критическая глубина залегания УГВ от поверхности земли в формуле (1) (см. с. 26).  
 $\alpha_{\text{мст}}$  — альbedo поверхности земли на метеостанции (см. с. 27).  
 $\alpha_{\text{ст}}$  — коэффициент стока верховодки с края вытянутой линзы (см. с. 158).  
 $\alpha_y$  — альbedo поверхности земли на участке застройки (см. с. 27).  
 $\beta$  — коэффициент (см. по тексту).  
 $\beta_s$  — коэффициент уплотнения грунта под статической нагрузкой (см. с. 132).  
 $\beta_D$  — коэффициент уплотнения грунта под динамической нагрузкой (см. с. 133).

$\gamma$  — удельный вес воды,  $H/m^3$  (см. с. 18).  
 $\gamma_i$  — коэффициент анизотропии (см. с. 98).  
 $\gamma, \xi$  — относительные координаты эллиптического цилиндра (см. с. 191).  
 $\Delta$  — разность чего-либо (см. по тексту).  
 $\delta$  — относительная ошибка или погрешность, % (см. по тексту).  
 $\delta$  — толщина «стены в грунте»,  $m$  (см. с. 211).  
 $\varepsilon$  — интенсивность испарения влаги с УГВ,  $m/сут$  (см. с. 25).  
 $\varepsilon_0$  —испаряемость,  $m/сут$  (см. с. 26).  
 $\varepsilon_{мст}$  —испаряемость, измеренная на городской метеостанции,  $m/сут$  (см. с. 26).  
 $\zeta$  — дополнительное фильтрационное сопротивление (см. с. 202).  
 $\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления (см. с. 241).  
 $\zeta_{пл}$  — дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенного котлована (пластового дренажа) (см. с. 206).  
 $\eta$  — обобщенная координата (см. с. 99).  
 $\eta$  — относительная проницаемость грунта (см. с. 141).  
 $\eta_{уп}$  — коэффициент упругости,  $m^{-1}$  (см. с. 73).  
 $\Theta$  — объемная деформация грунта (см. с. 143).  
 $\lambda$  — обозначение в формуле (155) (см. с. 156).  
 $\mu$  — коэффициент гравитационной водоотдачи, недостаток насыщения (см. с. 71).  
 $\mu_y$  — коэффициент упругой водоотдачи (см. с. 120).  
 $\mu_{уп}$  — коэффициент упруго-пластической водоотдачи (см. с. 74).  
 $\mu_э$  — коэффициент электроосмотической водоотдачи (см. с. 104).  
 $\xi$  — автомодельная переменная (см. с. 165).  
 $\xi$  — коэффициент бокового давления грунта (см. с. 74, 100).  
 $\xi$  — обобщенная координата (см. с. 291).  
 $\xi$  — характерный размер области фильтрации (см. с. 116, 123).  
 $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  — фильтрационные сопротивления (см. с. 212).  
 $\rho$  — зона стока верховодки с края круглой в плане линзы,  $m$  (см. с. 162).  
 $\rho$  — плотность жидкости (воды),  $kg/m^3$  (см. с. 105).  
 $\rho_{сух.гр}$  — плотность сухого грунта,  $kg/m^3$  (см. с. 105).  
 $\sigma$  — параметр в формуле (257) (см. с. 191).  
 $\sigma_r$  — нормальное давление грунта,  $Pa$  (см. с. 139).  
 $\tau$  — безразмерный параметр времени — критерий Фурье (см. с. 123).  
 $\varphi$  — относительная влажность воздуха, % (см. с. 29).  
 $\varphi$  — переменная интегрирования (см. с. 136).  
 $\varphi_r$  — угол внутреннего трения грунта (см. с. 139).  
 $\omega$  — интенсивность дополнительной инфильтрации влаги,  $m/сут$  (см. с. 34).  
 $\omega$  — площадь живого сечения потока,  $m^2$  (см. с. 76).

## Именной указатель

- Абрамов С.К. 9, 12, 226, 227  
Аверьянов С.Ф. 9, 12, 13, 25, 26, 30, 84,  
85, 88, 97, 113, 114, 115,  
123, 163, 184, 226, 227,  
237, 239, 312, 367, 383  
Алексеев В.С. 131  
Альтовский М.Е. 227  
Аравин В.И. 8, 9, 11, 12, 88, 97, 119, 163,  
207, 226, 371  
Арутюнян Р.Н. 12, 227  
  
Багров Н.А. 94, 96, 155, 157  
Балли Р.Ж. 104  
Баренблатт Г.И. 163  
Барон В.А. 9  
Бессель Ф.В. 161, 181  
Биндеман Н.Н. 150, 163  
Болгов М.В. 246  
Боголюбов К.С. 12, 62  
Бойль Р. 81, 87  
Борисов Ю.П. 12, 202, 206, 227, 245  
Бочеввер Ф.М. 9, 226  
Бреббиа К.А. 10, 247  
Будыко М.И. 27  
Буссинеск Ж. 10, 88, 92, 93, 94, 95, 96,  
97, 107, 108, 114, 115, 116,  
120, 121, 122, 128, 154,  
155, 157, 164, 168, 189,  
204, 207, 226, 227, 280,  
281, 283, 290, 310, 311,  
312, 315, 326, 336, 339,  
344, 345, 360, 366, 376  
Бывальцев И.М. 23, 102  
Бэр Я. 10, 88  
  
Ван-Эвердинген А. 224  
Васильев С.В. 163  
Ведерников В.В. 8  
  
Веригин Н.Н. 9, 12, 26, 72, 88, 94, 96,  
97, 155, 157, 163, 170, 172,  
226, 227, 275, 307  
  
Гавич И.К. 10, 11, 13, 88, 113, 114, 115,  
129, 237, 245, 269, 317  
Гармонов И.В. 163  
Герсеванов Н.М. 73, 100, 135  
Гиринский Н.К. 119, 207, 236, 266, 267,  
291, 296, 341, 371  
Горбунов Б.П. 104  
Горбунов-Посадов М.И. 142  
Григорьев В.М. 12, 226, 227, 365, 367,  
371  
Грин Д. 89  
Гуссейнов Г.П. 153  
  
Дарси А. 8, 69, 78, 80, 82, 86, 89, 90, 97,  
154, 156, 215, 245, 250,  
255, 262, 266, 330, 358  
Дегтярев Б.М. 9, 15, 43  
Дзекцер Е.С. 9, 246  
Де Уист Р. 10  
Дирихле П. 118  
Дюпюи Ж. 10, 92, 96, 97, 154, 163, 205,  
206, 209, 239, 295, 306  
Дюфо Л. 103  
  
Жернов И.Е. 10, 11, 120, 216  
Жиленков В.Н. 132, 133, 135, 138, 234,  
235, 332  
Жинкин Г.Н. 104, 105, 376  
Жуковский Н.Е. 8, 97, 150, 226  
  
Зарецкий Ю.К. 132  
Зенкевич О. 10, 247  
Зиангиров Р.С. 104  
Зихардт В. 12

- Иванов П.Л. 100, 101, 332  
Ирмей С. 88
- Кабакова С.И. 13  
Казагранде Л. 12, 104, 133, 134, 147  
Калиткин Н.Н. 277, 311, 345, 346, 347  
Каменецкий С.Г. 224  
Каменский Г.Н. 10, 87, 126, 237, 246, 269, 292, 298, 318  
Карнацевич И.В. 26  
Киркхем Д. 126, 359  
Кирхгоф Г.Р. 362  
Клапейрон Б.П. 81  
Кнаупе В. 12, 104, 106, 226, 228  
Ковда В.А. 26  
Козени И. 133, 134, 147, 239  
Комиссаров С.В. 227  
Краковский Б.С. 12, 62  
Куранов Н.П. 9, 88, 97, 102, 153, 155, 156, 160, 176, 189, 281, 337  
Кусакин И.П. 12, 226
- Лаплас П.С. 91, 92, 99, 101, 102, 103, 177, 180, 183, 186, 214  
Лапшин Н.Н. 9  
Лебедев А.В. 163  
Лебедев А.Ф. 84  
Лейбензон Л.С. 82, 99  
Лембке К.Э. 204  
Ломакин Е.А. 10, 127  
Ломизе Г.М. 104, 228  
Лукнер Л. 11  
Лыков А.В. 102, 103  
Лямаев Б.Ф. 63
- Мариотт Э. 81, 87  
Мариупольский Г.М. 12, 226, 227, 228  
Маскет М. 10, 275  
Мезенцев В.С. 26
- Мироненко В.А. 9, 11, 72, 73, 88, 97, 127, 262  
Муфтахов А.Ж. 7, 9, 12, 88, 94, 97, 98, 102, 113, 116, 128, 153, 156, 160, 163, 182, 187, 205, 207, 209, 226, 267, 281, 290, 302, 312, 337, 344, 358  
Мухин А.А. 104  
Мушкетов И.В. 353  
Мясникова Н.А. 269  
Мягиев А.Н. 291, 296, 341
- Нагуманов Р.А. 9, 23, 67  
Недрига В.П. 9, 163, 218, 226  
Нейман К.Г. 118  
Нетушил А.В. 228  
Николаи Е.Л. 246  
Нумеров С.Н. 8, 9, 11, 12, 88, 97, 163, 202, 206, 227
- Олсен Х.В. 78  
Ом Г.С. 106, 362, 376  
Орвис В.Д. 248  
Остроградский М.В. 89
- Павилонский В.М. 78, 133  
Павловская Л.Н. 226  
Павловский Н.Н. 8, 10, 88, 89, 91, 97, 155, 156, 195, 197, 217, 237, 240, 343  
Панов Д.Ю. 10, 103, 166, 246, 251, 269, 270  
Пашковский И.С. 151, 155, 224, 318  
Пек Р. 12, 239  
Петухов П.М. 227  
Пиасковский А. 104  
Пилатовский В.П. 12  
Пильдыш С.А. 155, 337  
Писаренко В.Ф. 246

- Поздняков С.П. 13, 246
- Полубаринова-Кочина П.Я. 9, 11, 13, 26,  
88, 92, 96, 97, 121, 150,  
163, 164, 165, 166, 167,  
189, 204, 209, 281, 310,  
331
- Покровский Г.И. 226
- Поуп Р.Г. 12
- Пуассон С.Д. 135, 136
- Радищев П.В. 18
- Разумов Г.А. 9
- Рельтов Б.Ф. 104
- Реттер Э.И. 29
- Ржаницын Б.А. 104
- Ризенкамф Б.К. 163
- Романов А.В. 9, 202, 226, 227
- Рудаков В.К. 9, 12, 13, 97, 178, 182, 185,  
245
- Самарский А.А. 10, 99, 103, 246, 262,  
279, 280, 339, 354, 361,  
366
- Самсонов Б.Г. 201
- Саркисян В.С. 9
- Семенова С.М. 269
- Сойфер А.М. 318
- Соутвелл Р.В. 10, 310
- Седов Л.И. 163
- Силин-Бекчурин А.И. 80
- Симони Ч. 253
- Слихтер Ч.С. 88
- Соколовский В.В. 144
- Соре Ш. 103
- Сотников А.Б. 201, 353, 359
- Спорышев В.С. 12
- Столмен Р.В. 10
- Терцаги К. 12, 73, 100, 101, 133, 134, 147,  
148, 149, 239, 332
- Тихомолова К.П. 104
- Тулаев А.Я. 28
- Усенко В.С. 9, 88, 150, 273, 274, 296, 355
- Федоров В.И. 9, 103, 131
- Фик А. 102, 103
- Флорин В.А. 73, 100, 101, 135, 332, 374
- Форхгеймер Ф. 10, 12, 92, 97, 226, 365
- Фурье Ж. 103, 123, 169, 177
- Хазен А. 79, 239
- Харченко С.И. 27
- Холопов О.В. 227
- Хоу К.С. 12
- Чарный И.А. 9, 12, 226, 227
- Чекалюк Э.Б. 9, 206, 207
- Чепмен Р.Е. 78
- Чернега Л.Г. 13
- Черный Г.И. 132, 135, 138, 144, 332
- Швидлер М.И. 12, 13, 245
- Шевчик А.П. 9, 102
- Шержуков Б.С. 9, 97, 163, 224
- Шестаков В.М. 9, 11, 12, 73, 88, 97, 114,  
115, 120, 127, 174, 207,  
216, 226, 227, 262
- Шестаков В.Н. 13
- Шкиннис Ц.Н. 9
- Шнейдер Г. 12
- Шульгин Д.Ф. 9
- Эйлер Л. 187, 246
- Эмих В.Н. 245

## Предметный указатель

- Абсолютная отметка 298  
Абсолютная ссылка (в Excel) 287  
Абсолютный водоупор 126  
Автомодельное решение 165  
Альбедо 27  
Аналитический метод 57  
Анизотропность 101
- Балансовый принцип 262  
Барражный эффект 41  
Вакуумные скважины 63  
Верховодка 17  
Влажность грунта по массе 105  
Влажность грунта объемная 105  
Водоотлив 59  
Водопонижение 60  
Водоупор 70  
Выемка 201  
Выработка 202
- Геоинформационные системы 246  
Гидравлическая теория 9  
Гидродинамическая теория 92  
Гидроизогипсы 18  
Гидроизоляция 38  
Гидроизопьезы 18  
Гидронамыв 38  
Градиент напора 78  
Грунтовые воды 16  
ГУ1—ГУ4 117
- Двухмерное моделирование 296  
Дрена 48  
Дренаж 42  
Дренаж вакуумный 43  
Дренаж вентиляционный 42  
Дренаж гравитационный 43  
Дренаж двухлинейный 52  
Дренаж кольцевой 48  
Дренаж лучевой 53  
Дренаж перехватывающий 46  
Дренаж пневмонагнетательный 44  
Дренаж пристенный 52  
Динамика подземных вод 16  
Динамическая модель 286
- Закон Дарси 79  
Зона аэрации 16
- Жесткая фильтрация воды 93
- Иглофильтр 61  
Избыточное давление 76  
Изотропность 101  
Инфильтрация влаги 34  
Испарение с УГВ 26  
Испаряемость 26
- Калибровка модели 252  
Капиллярная зона 74  
Классификации дренажей 43  
Классификация подземных вод 16  
Коэффициент водоотдачи 71  
Коэффициент пористости 71  
Коэффициент фильтрации 79  
Кривая депрессии 203
- Линза 153  
Линеаризация уравнения Буссинеска 94
- Метод АДЧМ 164  
Метод аналогии 151

Метод интегрального баланса 170	Сезонное подтопление 21
Метод конечных разностей 246	Скважины 49
Метод прогонки 310	Смотровой колодец 49
Метод ЭГДА 240	Средняя мощность грунтовых вод 95
Методы защиты от подтопления 37	Статическая модель 284
МКР-Excel 2	Стена в грунте 40
Моделирование 237	Строительное водопонижение 60
Модель 237	
Мощность грунтовых вод 18	Техногенное подтопление 18
Мощность напорного пласта 17	Трубофильтры 48
Напор фильтрационный 76	УГВ 16
Напор пьезометрический 76	УНПВ 16
Напорные подземные воды 16	УПВ 14
Натурные обследования 67	УСВ 17
Начальные условия 117	Упруго-пластическая водоотдача 73
Недокументированное в Excel 267	Уравнение Буссинеска 93
Недостаток насыщения 71	
Норма осушения 14	Фильтрация 70
	Фильтрационная консолидация 72
Осесимметричная фильтрация 272	Фильтрующие обсыпки 48
Относительный водоупор 217	Флюид 70
Плановая фильтрация 117	Эволюционный метод 345
Плоская фильтрация 271	Эжектор 64
Плоскопараллельная фильтрация 119	Электроосмос 104
Поглощающие скважины 23	Элементы водоотлива 60
Подземные воды 16	Элементы водопонижения 60
Пористость 71	Элементы дренажа 47
Поровое давление 100	
Последствия подтопления 35	AutoCAD 318
Причины подтопления 31	Excel 2
Прогнозы подтопления 56	ForSurfer 257
Пьезометрический уклон 78	MatLab 189
	MathCAD 130
Радиальная фильтрация 119	Surfer 256
Ремонты дренажей 66	Visual Basic for Application (VBA) 11

Научное издание

Сологаев Валерий Иванович

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ  
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ  
В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Монография

Набор, иллюстрации и макет автора

Редакторы:  
Т.И. Калинина,  
Н.И. Косенкова,  
И.Г. Кузнецова

Подписано в печать 22.02.2002.  
Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 26. Уч.-изд. л. 25.  
Тираж 150 экз. Заказ № 125

Издательство СибАДИ  
Лицензия ИД № 00064 от 16.08.99.  
644099, Омск, ул. Петра Некрасова, 10

Отпечатано в типографии ЧП Выставного И.Л.  
Лицензия ПЛД № 58–63 от 19.09.99  
644099, Омск, ул. Петра Некрасова, 10