

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия
(СибАДИ)

На правах рукописи

Сологаев Валерий Иванович

**ПРОГНОЗЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОДТОПЛЕНИЯ И ДРЕНИРОВАНИЯ
В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

05.23.16 – гидравлика и инженерная гидрология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор А.Ж. Муфтахов

Омск 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Проблема и защита от подтопления в городском строительстве	11
1.1. Проблема подтопления городов	11
1.2. Причины, источники и последствия подтопления застройки	14
1.3. Методы и средства защиты от подтопления	20
1.4. Обзор существующих методов, методик и подходов к разработке защиты от подтопления	30
1.5. Конструктивно-технологический подход к защите от подтопления	38
1.6. Выводы по главе 1	41
2. Теоретические обоснования прогнозов и моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве	42
2.1. Закономерности фильтрации воды и воздуха	43
2.1.1. Дифференциальные уравнения фильтрации воды и воздуха	52
2.1.2. Дифференциальные уравнения фильтрационной консолидации	63
2.1.3. Закон диффузии влаги и дифференциальные уравнения ваготеплопереноса	66
2.1.4. Электроосмос и его дифференциальные уравнения	68
2.2. Критерии линеаризации гидравлической теории фильтрации	73
2.3. Метод автомодельных движений с численным моделированием	76
2.4. Выводы по главе 2	81
3. Прогнозы подтопления и дренирования в городском строительстве	82

3.1. Технология прогнозов подтопления и дренирования	82
3.2. Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований	86
3.3. Прогнозы подтопления в городском строительстве	109
3.4. Прогнозы водоотлива, водопонижения и дренажа	157
3.5. Прогнозы испарения и инфильтрации воды с УГВ	193
3.6. Выводы по главе 3	200
4. Авторский метод моделирования в электронных таблицах	201
4.1. Обзор методов моделирования фильтрации	202
4.2. Метод автора МЭТ и автоматизация моделирования	208
4.3. Выбор и построение модельной сетки	223
4.4. Критерии устойчивости нестационарных моделей	227
4.5. Формулы моделирования	232
4.6. Разные технологические приемы моделирования	252
4.7. Выводы по главе 4	260
5. Практика моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве	261
5.1. Моделирование изменения проницаемости грунтов основа- ний	262
5.2. Прогнозное моделирование подтопления	266
5.3. Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа	275
5.4. Выводы по главе 5	289
Заключительные выводы и рекомендации	290
Список использованной литературы	294
Приложения	325
Буквенные обозначения	350

Введение

Актуальность проблемы обусловлена необходимостью совершенствования подходов к разработке защиты от подтопления городов. Городское строительство, связанное с плотной застройкой, обилием подземных коммуникаций, комплексной реконструкцией городов, освоением неудобных земель, усложняется проблемой подтопления городов подземными водами естественного и техногенного происхождения. Особенно подвержены подтоплению города со слабопроницаемыми водоносными осадочными породами четвертичного происхождения при близком залегании водоупоров с грунтовыми водами малой мощности.

Строящиеся здания и сооружения вторгаются в геологическую среду города. При этом под влиянием различных строительных конструкций и технологий может происходить образование новых техногенных горизонтов подземных вод малой мощности: верховодки и грунтовых вод. Влияние городского строительства (ГС) на подтопление и дренирование территорий имеет действие и последствие: техногенное подтопление начинается в ходе строительства и продолжается при эксплуатации городских территорий.

Влияние строительства на изменения гидрогеологии города связано не только с образованием техногенных подземных вод. Строительное освоение территорий изменяет фильтрационные свойства оснований зданий и сооружений в процессе строительства и дальнейшей эксплуатации. В грунтовых водах малой мощности техногенные изменения проницаемости оснований особенно сильно влияют на подтопление. Заглубленные сооружения, фундаменты и уплотненные грунты создают барражный эффект плотин для потоков подземных вод.

Методы и методики прогноза и моделирования подтопления и дренирования под влиянием ГС требуют разработки с учетом усложняющих техногенных факторов: малой мощности потоков грунтовых вод, измене-

ния проницаемости грунтов оснований зданий и сооружений, изменения водного баланса систем «грунтовые воды — зона аэрации — атмосфера» (испарение и инфильтрация).

Цель работы. Диссертация посвящена разработке и развитию конструктивно-технологического подхода к защите от подтопления путем создания методов и методик прогнозов и моделирования подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства.

Основная идея исследования состоит в новом конструктивно-технологическом подходе к защите от подтопления в городском строительстве, который можно представить в виде структурной схемы (рис. 1).



Рис. 1. Конструктивно-технологический подход к защите от подтопления в городском строительстве (структурная схема основной идеи исследования)

Задачи исследования:

1) анализ, уточнение и совершенствование существующих подходов, методов, методик и критериев прогнозов и моделирования подтопления и дренирования территорий под влиянием ГС;

2) постановка конструктивно-технологического подхода к защите от подтопления с классификацией разновидностей городского строительства, влияющих на подтопление и дренирование территорий;

3) разработка аналитических методов и методик фильтрационных расчетов грунтовых вод малой мощности в нелинейной гидравлической постановке, с учетом изменения проницаемости грунтов оснований и элементов водного баланса подземных вод при прогнозах подтопления и дренирования территорий в ГС;

4) разработка компьютерного метода моделирования подтопления и дренирования территорий в ГС;

5) внедрение и производственная апробация научных результатов.

Объект исследования:

подтопление и дренирование застраиваемых территорий городов.

Предмет исследования:

прогнозирование процессов фильтрации подземных вод, вызывающих подтопление и дренирование территорий под влиянием ГС.

Методы исследований:

а) новые теоретико-экспериментальные методы автора:

автомодельных движений с численным моделированием (АДЧМ), информационная технология моделирования в электронных таблицах (МЭТ);

б) классические теоретические методы:

интегральных преобразований дифференциальных уравнений фильтрации, асимптотических приближений, интегрального баланса, конформных отображений, фрагментов, фильтрационных сопротивлений и последовательной смены стационарных состояний;

в) эксперимент численный, физический, натурные обследования.

Достоверность.

Результаты теоретических исследований автора подтверждены их многократными проверками с помощью численного эксперимента, натурными обследованиями объектов защиты от подтопления и обеспечены применением математического анализа в качестве основного инструмента исследований.

Научная новизна:

— впервые разработан конструктивно-технологический подход к защите от подтопления в городском строительстве;

— впервые разработаны авторские аналитические методы и методики прогнозов подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства (ГС) с учетом усложняющих факторов: малой мощности потоков грунтовых вод, техногенных изменений проницаемости грунтов оснований, водного баланса подземных вод застройки (испарение и инфильтрация);

— впервые разработана информационная технология компьютерного моделирования в электронных таблицах (МЭТ) стационарных и нестационарных процессов фильтрации воды, воздуха, влаготеплопереноса, электроосмоса, консолидации грунтов при прогнозировании подтопления и дренирования территорий под влиянием ГС.

На защиту выносятся:

— конструктивно-технологический подход автора к защите от подтопления в городском строительстве;

— авторские методы и методики аналитических прогнозов подтопления и дренирования территорий в ГС;

— авторские методы и методики компьютерного моделирования подтопления и дренирования территорий в ГС.

Практическая значимость работы.

Конструктивно-технологический подход, методы и методики автора позволяют достоверно выполнять прогнозы и моделирование подтопления и дренирования в городском строительстве, что существенно повышает надежность разработки и реализации защиты от подтопления городов.

Практическая реализация работы.

Методы и методики автора внедрены при разработке защиты от подтопления объектов городского строительства. Результаты работы по программе ГКНТ СССР 0.85.01 задание 08.06 вошли в справочное пособие к СНиП [6] и получили всесоюзное внедрение. В 1992-1994 гг. автором проведены научно-исследовательские работы по защите от подтопления крупного народно-хозяйственного объекта строительства — Омского метрополитена и прилегающей территории. Они проведены в составе утвержденной программы инженерной защиты территории г. Омска от подтопления.

Научные разработки, методы и методики автора использованы (прил. 4):

— территориальным проектным институтом ОАО «Омскгражданпроект» при разработке технико-экономического обоснования (ТЭО) защиты от подтопления г. Омска в 1995-1996 гг.;

— трестом инженерно-строительных изысканий ОАО «ОмскТИСИЗ» при гидрогеологических изысканиях для защиты от подтопления населенных пунктов Омской области и при разработке компьютерных геоинформационных систем г. Омска;

— в учебном процессе вуза. Авторский курс [245] «Защита от подтопления в городском строительстве» внедрен в учебный процесс СибАДИ с февраля 1999 г. по специальности «Городское строительство и хозяйство (ГСХ)» факультета промышленного и гражданского строительства (ПГС);

— в региональном центре повышения квалификации РЦПК СибАДИ (послевузовское образование). С 1999 г. автор проводит ежемесячные лекционные занятия по защите от подтопления в городском строительстве для

специалистов-производственников Сибирского региона.

— в системе дистанционного образования через Internet. С мая 2000 г. авторский курс дистанционного обучения «Защита от подтопления в городском строительстве» размещен на Internet-сайте СибАДИ.

Апробация работы.

Результаты исследований докладывались и обсуждались в Москве в 1987 г. на III Всесоюзном семинаре «Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии городов и городских агломераций» при Академии Наук СССР [255]. С 1988 по 1999 гг. — на ежегодных научно-технических конференциях СибАДИ, в некоторые годы по 2-3 доклада. Доклады автора состоялись на совместной научной конференции Омского областного Совета Всероссийского общества охраны природы, Омского отдела Географического общества СССР, ОмСХИ и СибАДИ «Природа и экономика Омской области» [256], всероссийской международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири» [240], международной научно-технической конференции «Город и транспорт» [251], международной научной конференции «Роль России в развитии экологии на пороге XXI века» [253], II международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири» [257].

Личный вклад автора.

Все результаты, приведенные в диссертации, имеющие научную новизну, получены лично автором. Автор сформулировал основную цель исследования, разработал конструктивно-технологический подход, выполнил теоретические, экспериментальные и натурные исследования, внедрил результаты своих исследований в производство и учебный процесс.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 25 работ. В их числе монография [262], содержащая основные результаты работы, справочное пособие к СНиП [204] с участием автора в разделах 2—5, учебное пособие [245], ста-

ты в центральных журналах [246, 252], научных сборниках [17, 239, 241, 242, 243, 247, 248, 250, 254, 258, 261, 264], тезисы докладов на всесоюзных и международных научно-технических конференциях [240, 251, 253, 255, 256, 257], депонированные работы [244, 263].

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключительных выводов и рекомендаций, списка литературы из 352 наименований и приложений. Работа содержит 324 страницы основного текста, 7 таблиц, 81 рисунок. Приложения размещены на 28 страницах.

Благодарности.

Автор выражает признательность всем коллегам по работе и специалистам из СибАДИ, НИИ 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 качества.

Глубокую благодарность автор приносит своему незабвенному научному руководителю и консультанту Ахмету Жаляевичу Муфтахову, направлявшего автора по теории фильтрации в стенах ВНИИ ВОДГЕО, а также своим добрым родителям — Наталье Алексеевне и Ивану Ивановичу Сологаевым за постоянное внимание, помощь и поддержку в ходе кропотливой исследовательской работы.

1. Проблема и защита от подтопления в городском строительстве

1.1. Проблема подтопления городов

Подтопление в городах — это повышение уровня подземных вод (УПВ), приводящее [67; 68; 198; 204; 245] к аварийно-катастрофическому, антисанитарно-дискомфортному, экономически-убыточному состоянию зданий, сооружений, коммуникаций и других элементов городской территории (дорог, парков и т.д.).

Процесс подтопления охватил в настоящее время большинство городов мира, расположенных на равнинах [67]. Более 70 % поверхностных грунтов Земли сложено породами осадочного происхождения, главным образом четвертичного возраста [125]: песками, супесями, суглинками и глинами. Большинство городов подтоплено грунтовыми водами, приуроченными к этим породам.

В городском строительстве [280; 279] подтопление препятствует проведению земляных работ, устройству фундаментов, подземных сооружений. Оно приводит к дополнительным затратам труда и времени на борьбу с ним, удорожает строительство. 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.

По СНиП [235] 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 [235]. Таким

образом, нормы осушения по СНиП [235] являются обобщенными показателями подтопления.

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 и др.) 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 [204] рекомендует понижать УПВ не менее 0,5 метра ниже пола подвала, основания сооружения.

В технологии строительных процессов [279; 280] при проведении земляных работ, устройстве фундаментов и подземных сооружений понижение УПВ можно принимать не менее 0,5 метра ниже отметок дна котлованов и траншей [245]. В строительных нормах по устройству оснований и фундаментов [231] 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.

Подтопление городов происходит в основном при повышении уровня грунтовых вод (УГВ) вследствие разных причин [67; 68; 198; 204; 245].

УГВ подвержен сезонным колебаниям.

Четвертичные отложения обычно служат основанием зданий и сооружений [81]. Эти грунты залегают первыми от поверхности земли. Они рыхлые сравнительно с нижележащими, более древними породами. Грунты четвертичного возраста в городах часто подтоплены грунтовыми водами.

Здания и сооружения вторгаются в геологическую среду города. При этом может происходить образование новых техногенных горизонтов подземных вод: верховодки, грунтовых и даже напорных подземных вод. Многочисленные примеры изменения гидрогеологической среды городов изложены в книгах [67; 159; 160].

Техногенное подтопление начинается в ходе строительства, и продолжается при эксплуатации городских территорий [204]. Изменения гидрогеологии города связаны не только с положением уровня подземных вод. Изменяются фильтрационные свойства водовмещающих пород. Техногенные изменения геологии города происходят стихийно. Возможно и целенаправленное создание благоприятной для человека гидрогеологической среды [205], но оно пока редко реализуется.

Подтопление охватило многие города мира. Причины подтопления разные [51, 67, 68, 201, 204]. Подтоплены города европейской части России, Урала, Сибири, Украины, Казахстана, Средней Азии. Города Великобритании, стран Западной, Центральной и Восточной Европы, США, Бразилии, Индии, Китая, Саудовской Аравии также не избежали этого неблагоприятного процесса [2, 51, 67, 68, 198, 152, 160, 159, 197, 201, 213, 214, 216, 287, 325, 327, 328, 331, 334, 336, 343, 349].

Особенно подвержены подтоплению города со слабопроницаемыми водоносными породами при близком залегании водоупоров [51, 67, 68, 201, 204]. Три подробных примера таких ситуаций приведены в [262] (примеры 4, 5, 10). Анализируя эти примеры, можно заметить, что грунто-

вые воды имеют малую мощность В таком случае типовые традиционные методики фильтрационных расчетов и моделирования в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации воды [194, 195, 206] дают значительные погрешности при определении прогнозного уровня подземных вод, что подробно рассмотрено в в дальнейшем изложении нашей работы.

1.2. Причины, источники и последствия подтопления застройки

Причины и источники подтопления подразделяются на две группы [204]:

- 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 [245]:

- 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 [208]. 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 на-

воднения 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. В последние годы произошли катастрофические наводнения на реках США, Западной Европы и Восточной Сибири.

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 [208]. Погружается Голландия, 40 % её территории находится на отметках ниже уровня моря [208]. Ежесуточные землетрясения на озере Байкал приводят к опусканию его прибрежной территории и подтоплению берегов [208]. Кроме опускания земной поверхности, землетрясения, сотрясая грунт, вызывают повышение УГВ до величин порядка 1-2 метров [167].

Циклы колебаний климата на земном шаре довольно чётко установлены как 11-летние [96]. Характерно, что они совпали с циклами появления солнечных пятен. Режим грунтовых вод зависит от климата, так как грунтовые воды сообщаются с атмосферой через зону аэрации. Однако региональный климат больших территорий не имеет четко выраженного влияния на подтопление городов и населённых пунктов, процессы подтопления имеют азональный характер [198]. Применительно к Омску и Омской области это проиллюстрировано в [245] и [262] (пример 10).

Сезонные колебания УГВ, происходящие в течение года, изучены в городах довольно хорошо. На рис. 2 представлены сравнительные графики сезонных колебаний УГВ в Омске (построены по данным ОАО «ОмскТИ-СИЗ»), Санкт-Петербурге (Ленинграде) [80] и Мюнхене [320]. Нетрудно сделать общий вывод, что множество осложнений в городских хозяйствах связано с весенним повышением УГВ.

В отличие от глобального климата больших территорий микроклимат города заметно влияет на подтопление [67, с. 16]. Микроклимат застройки влияет на испарение с поверхности уровня грунтовых вод (УГВ), что в свою очередь влияет на подтопление. Отметим, что наиболее подробно влияние испарения с УГВ исследовал С.Ф. Аверьянов для целей гидромелиоративного строительства в сельском хозяйстве [6, 7]. Для условий города натурные исследования провел И.Г. Иваненко [67, с. 16].

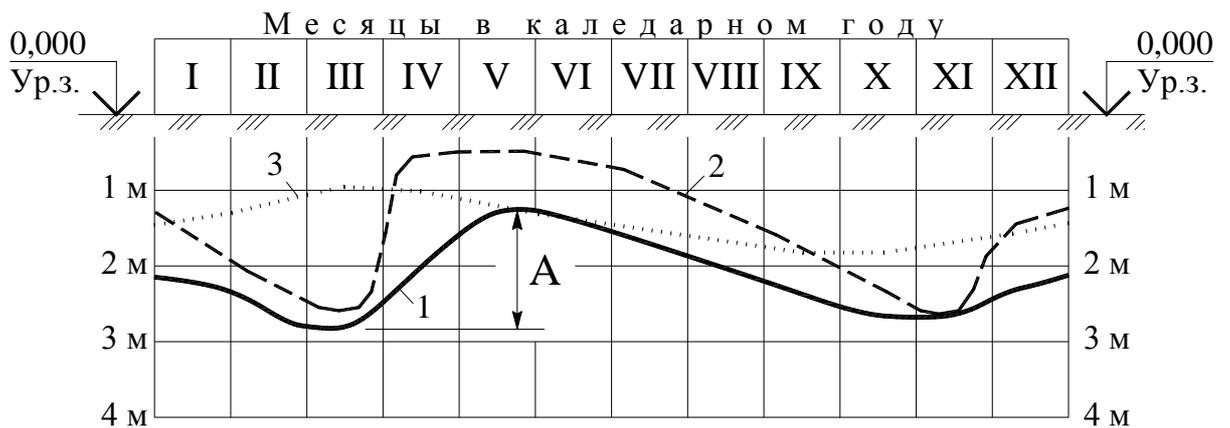


Рис. 2. Графики сезонных колебаний УГВ:
 1 — в Омске; 2 — в Санкт-Петербурге (Ленинграде); 3 — в Мюнхене (ФРГ);
 А — годовая амплитуда колебаний УГВ (в Омске $A \approx 1,2-1,5$ м)

Техногенные причины (и источники) подтопления [204]:

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

В справочном пособии к СНиП [204] 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 город-

ских территорий.

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 [45; 42; 191; 216]. 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 [98]. 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 фильтрацион-

ных потоков (источников) — см. [262] (пример 11).

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 [204]. Для этого применяют величину дополнительной инфильтрации влаги ω ($м/сут$), вызывающую техногенное повышение УГВ.

Дополнительная техногенная инфильтрация влаги интенсивностью ω ($м/сут$) — 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 ω входит почти во все расчётные формулы прогнозов подтопления [204]. Наиболее достоверно она может быть определена на основе режимных наблюдений за УГВ на застроенной территории. Если такие наблюдения отсутствуют, тогда величину ω можно определить ориентировочно методом аналогий по литературным данным [204, с. 71-74], а дифференцированно уточнить с помощью расчета испарения с УГВ ε по нашей методике, приведенной в главе 3.

Последствия подтопления застройки можно разбить на три группы:

— аварийно-катастрофические (табл. 2 в [262]);

- антисанитарно-дискомфортные;
- экономические.

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 [245].

Экономический ущерб от подтопления застройки имеет довольно сложную структуру. Существуют методики его расчёта, изложенные в изданиях [145; 304], 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. 1 [198].

Анализируя таблицу, заметим, что при глубине залегания УГВ 2-3 метра, согласно критерию СНиПа [235] «норма осушения», селитебная территория относится к неподтопленной. Однако ущерб от подтопления всё равно происходит, хотя значительно меньший, чем при УГВ на 0 и 1 метре. Пример укрупненного расчета ущерба от подтопления приведен в [262] (пример 12).

Таблица 1 [198]

Этаж- ность	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

Применим показатели табл. 1 к Омску в 1990-х годах. Согласно официальным данным [168] 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. [168]. Таким образом, ущерб от подтопления селитебной территории Омска составляет не менее трети средств на строительство жилья, что весьма существенно.

Изложенные в данном параграфе материалы являются классификационными по проблеме подтопления в городском строительстве. Влияние городского строительства на подтопление территорий относится к техногенной причине. Однако оно может происходить на фоне естественных причин подтопления. Поэтому немаловажно разделить различные причины подтопления и определить источники подтопления. Вначале это может быть сделано с помощью аналитических прогнозов подтопления. Более достоверным является моделирование, позволяющее учесть многофакторность. Компьютерное моделирование по автору, изложенное в гл. 4 и 5, обеспечивает вполне надежное решение упомянутых задач.

1.3. Методы и средства защиты от подтопления

Рассмотрим методы и средства защиты от подтопления во взаимосвязи с проблемой подтопления и городским строительством.

Класс методов и средств защиты от подтопления, рассчитанных на длительный срок эксплуатации в городах, делится на две группы [204]:

- 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 функционально переводить в группу долговременной эксплуатации [231, 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 [102, 245, 311]. Дренажи, благодаря наличию защитных фильтрующих обсыпок и слоев, имеют меньшее отрицательное побочное влияние [204].

Предупредительные мероприятия по защите от подтопления застройки подразделяются на следующие типы [245]:

- 1) вертикальная планировка;
- 2) дождевая канализация;
- 3) гидронамыв и подсыпка территорий;
- 4) гидроизоляция зданий и сооружений;
- 5) противофильтрационные 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) [245].

Вертикальная планировка — это комплексное преобразование естественного или существующего рельефа территории города для размещения

зданий, сооружений, дорожно-транспортных коммуникаций и организации поверхностного стока атмосферных вод [98]. Она является основной частью инженерной подготовки территории. Рельеф с уклонами 0,005-0,1 на необводнённых непросадочных грунтах наиболее благоприятен для городского строительства [272]. 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 [323]. Её проектируют по СНиП [233]. Мнение о том, что развитая сеть К2 «способствует понижению горизонта грунтовых вод» [65], почти верно. Однако сама по себе К2 не может понижать УГВ, если только она не совмещена с дренажем [67; 150]. 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 [204]. Например, способом гидронамыва песчаного грунта из русла Иртыша с 1960-х годов была образована Иртышская набережная г. Омска площадью более 150 га [160; 159], где теперь расположены три жилых микрорайона. 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 типа: противofiltrационная и антикоррозионная [30]. Про-

тивнофилтрационная гидроизоляция подразделяется по способу устройства, материалу и конструкции. Недостатком большинства гидроизоляций является трещинообразование как следствие подтопления [216]. Кроме того, здания и сооружения, имеющие противифилтрационную гидроизоляцию, являются абсолютно водоупорными преградами на пути естественных потоков подземных вод, что вызывает отрицательные последствия по отношению к окружающей городской территории (барражный эффект).

Противофилтрационные завесы (ПФЗ), или «стены в грунте», предназначены как для защиты от подтопления отдельных площадок, зданий и сооружений [204; 271], так и для строительства несущих и ограждающих конструкций и фундаментов [172].

Утечки в грунт из водонесущих коммуникаций (водопроводных, канализационных и теплофикационных сетей) в среднем составляют 8-9 %, а иногда достигают 15 % объёма поданной воды [100]. Подтопление от утечек носит локальный характер в виде куполов УГВ. Предупреждать утечки можно проведением организационных, эксплуатационных и конструктивно-технологических мероприятий [204], однако снижение утечек до уровня менее 5 % экономически и технически нецелесообразно [198]. Поэтому нельзя строить слишком оптимистические прогнозы на будущее об избавлении от утечек. Выход состоит в строительстве активных защитных систем.

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 [151]. Подпор подземных вод и его профилактика для метрополитенов и тоннелей рассмотрен в [262] (пример 11).

Вентиляция подземных частей зданий и сооружений — это профилактическое мероприятие не столько от подтопления, сколько от сырости зда-

ний и сооружений [228, 110]. Для зданий и сооружений на слабопроницаемых грунтах наиболее эффективным является устройство так называемого «вентиляционного дренажа» [198].

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 [204] — 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, классифицируют по следующим признакам [67]:

- 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 $k > 5 \text{ м/сут}$ [67; 204]. Локальные дренажи отдельных зданий или сооружений можно сооружать в грунтах с любой проницаемостью, но чаще при $k < 5 \text{ м/сут}$ [67; 204].

Классификация дренажей по положению дрен в пространстве:

1. По отношению к поверхности земли:

- а) подземные дренажи (на промзонах и селитебных территориях);
- б) открытые дренажные каналы (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:

1. Гравитационные системы (гравитационные дренажи) — основные! Стеkanie воды в дренаж из грунта вызывается силой тяжести [198]. Водопритоки, под влиянием разности напоров в подземных водах и дрене, происходят 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; 97].

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: $0,01 < k < 0,5$ 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 [67].

3. Вентиляционные дренажи закладываются в зоне аэрации грунта [198; 310]. Движущей силой влагопереноса служит перепад влажности. Используются для дополнительной подсушки грунта.

4. Пневмонагнетательные дренажи оттесняют в грунте УПВ посредством нагнетаемого компрессором воздуха [310]. Эти весьма энергоёмкие

системы могут применяться лишь для сезонного или периодического осушения слабопроницаемых грунтов [204].

5. Электроосмотический дренаж использует эффект электроосмоса [198]: при пропускании электрического тока через обводнённый грунт вода устремляется к отрицательно заряженной металлической дрене-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 [99; 198].

6. Биодренаж — в условиях холодных зим не реален. Всасывающая сила корней деревьев действует лишь около полугода (теплый период года в средних широтах). К тому же весной под деревьями образуются купола УГВ [198]. Таким образом, зелёные насаждения не могут понижать УГВ круглый год и для защиты от подтопления застройки не подходят. Исключение составляют страны с вечнозеленым климатом, где известны случаи положительного эффекта биодренажа [326], а также вредного влияния деревьев на иссушение грунта оснований зданий [338].

Классификация дренажей по продолжительности работы :

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

Классификация дренажей по целевому назначению:

- защитные дренажи;
- профилактические дренажи;
- дренажи для строительных мелиораций.

Общие дренажи должны обеспечивать норму осушения [235]. Дренажи для общего понижения УПВ на территории города подразделяются на систематические и перехватывающие [67; 204]. Они применяются в хорошо проницаемых грунтах ($k > 5$ м/сут). К общим дренажам можно также отнести дренирующие искусственные водоёмы и водотоки.

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 [204]. Таким образом, при локальной защите от подтопления норма осушения берётся не по СНиП [235] (в отличие от общих дренажей), а отсчитывается как понижение УПВ от низа защищаемого объекта. Локальные дренажи применяют повсеместно. Хотя критерий их выбора [67] связан с грунтами небольшой проницаемости при коэффициентах фильтрации $k < 5 \text{ м/сут}$, однако такие дренажи применяют и в хорошо проницаемых грунтах.

Сопутствующие дренажи устраивают для вытянутых сооружений [67, 199, 285] — дорог, инженерных сетей, метрополитенов и тоннелей. 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 [285], поэтому дренирование может принести существенную экономию. 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.

Строительство объекта осуществляют при наличии проекта (см. рис. 1). Проект организации строительства (ПОС) разрабатывается на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) проектировщиками, а проект производства работ (ППР) составляется по рабочим чертежам инженерами строительного-монтажных организаций [89; 236]. ПОС и ППР должны иметь специальные разделы с первоочередными мероприятиями и работами по защите от подтопления территорий [236].

Большинство строительных объектов возводят открытым способом, то есть с поверхности земли [98]. Траншеи и котлованы до глубин 6-8 метров

выполняют с естественными откосами, а более глубокие — с вертикальными стенками, закреплёнными от обрушения металлическим шпунтом [99] или «стеной в грунте». Часть объектов возводят подземным способом — глубокие коллекторы систем канализации, метрополитены — щитовыми проходками [279]. Рассмотрим защиту от подтопления для них.

Водоотлив — это откачка насосами подземных и поверхностных вод из открытых выемок в грунте и подземных выработок в период строительства (рис. 3). Его технология подробно описана в отечественном издании [271] и зарубежном [99].

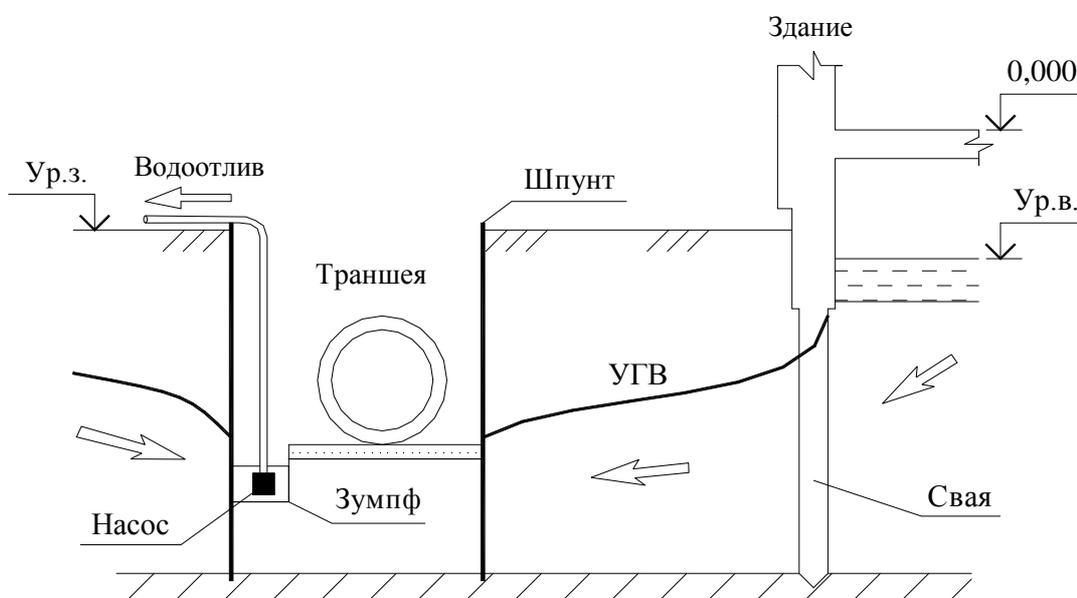


Рис. 3. Водоотлив из траншеи вблизи здания с затопленным подвалом

Из практики строительства [15; 46; 73; 99; 118; 185; 200; 219; 230; 271] 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 во-

доотлива 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. 3.

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 [118]. 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».

Строительным водопонижением называется временное, на период строительства, понижение УПВ ниже отметок дна котлованов и траншей или подземных выработок на величину не менее 0,5 метра [60] с помощью скважин различной конструкции с принудительной откачкой насосами. Осушение грунта в пределах котлована устраняет оплывание его откосов и

резко повышает производительность труда.

Выбор той или иной системы строительного водопонижения производят с учётом коэффициентов фильтрации грунта k , $м/сут$ [29; 60; 73; 99; 230]. 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 водопонижительных систем. При $k < 0,001 м/сут$ грунт считается водоупорным при проектировании строительного водопонижения [234, с. 4]. Разработки автора по вакуумным водопонижительным системам в Омске см. в [262] (пример 21).

1.4. Обзор существующих методов, методик и подходов к разработке защиты от подтопления

До середины XIX в. защиту от подтопления 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 [330]. 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

[303]. 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 [79]. Книги академика Н.Н. Павловского [182] вышли в свет в 1920-30 гг., заложив фундамент отечественной школы фильтрации и моделирования.

В период 1930-40 гг. в СССР решали преимущественно стационарные (установившиеся) фильтрационные задачи с применением метода конформных отображений. Этот метод позволял решать двухмерные задачи, напорные и безнапорные. Такие задачи называли гидродинамическими или гидромеханическими [206]. Гидромеханический метод в теории фильтрации разработал Н.Н. Павловский [183; 182], 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 дополняться 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 [195]. В этих решениях широко используется математическая аналогия теорий фильтрации, теплопроводности и диффузии. Это позволило распространять имеющиеся решения из одной дисциплины в другую. Наиболее продуктивным оказался операторный метод решения дифференциальных уравнений фильтрации [206]. 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. Шкиннис, Д.Ф. Шульгин и многие другие.

В 1940-60 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 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 [152]. В 1986 г. в СССР впервые был опубликован СНиП 2.06.15-85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления» [235]. В 1991 г. вышло справочное пособие к СНиП [204], 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 включены разделы по предупредительным мероприятиям, конструкциям дренажей и их гидравлическому расчету. С 1990-х гг. развитие научной фильтрационной школы НИИ ВОДГЕО продолжил профессор Н.П. Куранов [116].

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. [332], где дал основы гидравлической теории движения грунтовых вод [195]. Развитие этой теории получило в трудах другого французского ученого Жозефа Буссинеска (J. Boussinesq) в конце XIX — начале XX вв. [329]. 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 [297; 333]. Ученый из США М.

Маскет опубликовал в 1937 г. крупную работу по теории фильтрации, которая была переведена на русский язык в 1949 г. [137]. Ему удалось, в частности, получить точное решение для гидродинамически несовершенной скважины. Более полный обзор зарубежных работ представлен в книгах [12; 38; 183; 195; 206].

Моделирование защиты от подтопления в России и СССР началось с работы Н.Н. Павловского 1922 г. [183], предложившего метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Численный метод конечных разностей в гидрогеологии начал применять Г.Н. Каменский с 1943 г. [87]. Подробный обзор становления моделирования в нашей стране и за рубежом приведен в монографии И.К. Гавич «Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии» [49]. 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. Zienkiewich), 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) и 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 лишь для изучения частных, локальных эффектов фильтрации.

В подавляющем большинстве публикаций по численному моделированию существует проблема чрезвычайной сложности методик. Даже если текст программы приводится, от пользователя требуется, чтобы он дополнительно стал прикладным математиком и профессиональным программистом. Это сильно тормозит широкое внедрение компьютерного моделирования фильтрации. Поэтому нами разработана и представлена новая технология численного моделирования фильтрации [262]. Применен метод конечных разностей в электронных таблицах, получивший название МЭТ — моделирование в электронных таблицах (см. главы 4 и 5).

Технология моделирования фильтрации в электронных таблицах внешне 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 имеют массовое распространение и обладают встроенными языками макропрограммирования. Это позволяет исследователям эволюционно наращивать возможности по автоматизации моделирования в процессе накопления опыта, что было проблематично на аналоговых моделях. Аудитория пользователей таблиц огромна, легко налаживать информационный обмен и быстро обучать моделированию. Основные приемы МЭТ приведены достаточно полно в нашей монографии [262], где метод назван МКР-Excel.

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 [118]. В 1940-50-х гг. в нашей стране получили распространение иглофильтровый и эжекторный способ водопонижения. Методики расчета строительного водопонижения в 1950-60 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. Kezdi), И. Шульце (J. Schultze), С. Ирмей (S. Irmay), Ф. Форхгеймер (Ph. Forchheimer), Д.Н. Дитц (D.N. Dietz), В. Кнаупе (W. Кнаупе), 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, обзор которых приведен в [206]. Существующие методики фильтрационных расчетов при малой мощности грунтовых вод и в первоначально необводненных грунтах [206] охватывают не все важные случаи подтопления и дренирования. Например, неизвестно точное решение о радиальном растекании языка по водопоручку в необводненных грунтах, а также другие случаи, которые рассмотрены в нашей работе.

Новейшие публикации по верховодкам и потокам грунтовых вод малой мощности либо содержат решения в рамках линеаризованной теории фильтрации (Н.П. Куранов, А.В. Расторгуев, П.В. Кумов [117]), либо носят частный характер с идеализированными постановками о бесконечно удаленной границе влияния (D.A. Lockington, J.Y. Parlange, M.V. Parlange, J. Selker [339]), то есть с весьма приближенными решениями.

Техногенные изменения проницаемости грунтов оснований и фильтрационных неоднородностей рассматривали А.Ж. Муфтахов [201], В.К. Рудаков [147], В.П. Пилатовский [187], В.С. Спорышев [266], М.И. Швидлер [307; 309], Г. Шнейдер [345; 346; 347], Р.Г. Поуп и К.С. Хоу [344]. Однако в этих работах рассмотрены или частные случаи плановой неоднородности (А.Ж. Муфтахов, В.К. Рудаков, В.П. Пилатовский, В.С. Спорышев, Г. Шнейдер), или 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 [218], С.П. Поздняков [192]. М.И. Швидлер [308; 309] рассмотрел статистические модели неоднородностей, равномерно распределенных по грунтовому пространству. М.В. Болгов, Е.С. Дзекцер, В.Ф. Писаренко вероятностно-статистически проанализировали подтопление застраиваемых территорий [28]. Большое количество работ такого направления по теории фильтрации перечислено в [206].

С каждым годом увеличивается степень изученности инженерной толщии грунтов оснований городов. Городская гидрогеологическая среда становится всё более детерминированной техногенной системой. Поэтому в нашей работе все расчеты и моделирование, следуя И.К. Гавич [49], рассмотрены для детерминированных систем.

По учету техногенного изменения микроклимата городов при защите от подтопления публикаций очень мало. Есть частные случаи учета раз-

личных климатических факторов. В справочном пособии к СНиП по защите от подтопления [204] 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 [195].

Поэтому достаточно актуальным является совершенствование методов прогноза и моделирования подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства, предпринятое в нашей работе.

Известны несколько методологических подходов к разработке защиты от подтопления подземными водами.

1. Естественно-гидрогеологический подход. Прогнозы и моделирование связаны с общей и мелиоративной гидрогеологией. В рамках этого подхода научные работы опубликовали С.Ф. Аверьянов, В.А. Барон, Ф.М. Бочевер, Д.М. Кац, Н.Н. Лапшин, В.А. Мироненко, П.Я. Полубаринова-Кочина, Г.А. Разумов, В.К. Рудаков, В.С. Усенко, В.М. Шестаков, Ц.Н. Шкинчис, Д.Ф. Шульгин и др.

2. Техногенно-гидрогеологический подход (С.К. Абрамов, В.Е. Анпилов, В.И. Аравин, Н.Н. Веригин, Н.П. Куранов, А.Ж. Муфтахов, В.П. Недрига, С.Н. Нумеров, А.В. Романов, В.С. Саркисян, А.П. Шевчик, Б.С. Шержуков и др.).

3. Градостроительный подход (Б.М. Дегтярев, П.В. Радищев и др.).

4. Вероятностно-статистический подход (М.В. Болгов, Е.С. Дзекцер, В.Ф. Писаренко, С.П. Поздняков и др.).

Предлагаемый автором конструктивно-технологический подход к защите от подтопления территорий городов дополняет перечисленные известные подходы к защите от подтопления.

1.5. *Конструктивно-технологический подход к защите от подтопления*

Основной целью городского строительства (ГС) является комплексная застройка городов. Проблема подтопления городов подземными водами препятствует этой цели, поэтому автор предлагает, чтобы помимо основной цели само ГС попутно реализовало и защиту от подтопления.

Конструктивно-технологический подход автора в городском строительстве состоит в определении путем прогнозов и моделирования влияния ГС на подтопление и дренирование территорий с целью защиты от подтопления (см. рис. 1). При этом на основе теории фильтрации, осуществляя аналитические прогнозы, а затем компьютерное моделирование с учетом усложняющих факторов (малой мощности потоков грунтовых вод, техногенных изменений проницаемости грунтов оснований и т.д.) определяют влияние ГС, затем выбором соответствующих конструктивных решений и технологий строительства реализуют на практике защиту от подтопления подземными водами или же минимизируют воздействие на УПВ.

Разновидности ГС, влияющие на подтопление и дренирование территорий, классифицированы в табличной форме (табл. 2).

Составлению данной классификации предшествовали многолетние исследования автора [239–264] путем аналитических прогнозов, физического, аналогового и численного моделирования фильтрации подземных вод на застраиваемых территориях, проведения лабораторных опытов и экспериментов, натурных обследований многочисленных подтопленных объектов городского строительства (действие и последствие ГС).

Городское строительство имеет специфические особенности [279], связанные с плотной застройкой, обилием подземных коммуникаций, реконструкцией [311], а с XX в. — проблемой подтопления городов и населенных пунктов подземными водами [67; 68; 198; 204; 245].

**Классификация разновидностей городского строительства,
влияющих на подтопление и дренирование территорий**

Разновидность технологии строительства	Территория (степень подтопления)			
	Подтопленная		Потенциально подтопляемая	
	Подтопление	Дренирование	Подтопление	Дренирование
1	2	3	4	5
I. Цикл инженерной подготовки территорий				
Гидронамыв	Сильное	Слабое	Сильное	Слабое
Возведение дамб	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния
Устройство дренажа	Нет влияния	Сильное	Нет влияния	Сильное
Вертикальная планировка	Среднее	Слабое	Среднее	Слабое
II. Нулевой (подземный) цикл строительства зданий и сооружений				
Открытые выемки грунта	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее
Водоотлив	Слабое	Сильное	Не действует	Не действует
Водопонижение	Слабое	Сильное	Не действует	Не действует
Устройство дренажа	Нет влияния	Сильное	Нет влияния	Сильное
Щитовая проходка	Среднее	Слабое	Среднее	Слабое
Устройство свайных фундаментов	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Устройство сплошных фундаментов	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Устройство ленточных фундаментов	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Устройство отдельных фундаментов	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния
Устройство подпорных стенок	Сильное	Нет влияния	Сильное	Нет влияния
Строительство дорог	Среднее	Слабое	Среднее	Слабое
«Стены в грунте»	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Устройство шпунта	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния
Свайное крепление грунта	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния
Устройство гидроизоляции	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Уплотнение грунта	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
Обратные засыпки	Среднее	Нет влияния	Среднее	Нет влияния
III. Надземный цикл строительства зданий и сооружений				
Возведение надземных частей зданий	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния
Устройство озеленения	Слабое	Нет влияния	Слабое	Нет влияния

Примечание. Под влиянием ГС понимается изменение естественного УПВ: сильное (2–10 м); среднее (0,1–2 м); слабое (0,01–0,1 м); нет влияния (менее 0,01 м).

Базовым объектом авторских исследований выбран один из крупнейших городов Сибири — г. Омск. В этом городе интенсивно ведется строительство и реконструкция застройки в условиях подтопленных и потенциально подтопляемых территорий (последний термин принадлежит Е.С. Дзекцеру [51]). Омск подвержен подтоплению. В Омске представлены большинство факторов, усложняющих прогнозы и моделирование подтопления и дренирования: грунтовые воды малой мощности, близкие водопоры, слабопроницаемые водоносные грунты и др. Город имеет большой опыт гидронамыва, устройства свайных фундаментов и т.д. Начато строительство метро мелкого заложения.

Технологиями городского строительства по защите от подтопления являются водоотлив, водопонижение, дренаж или создание преград для их фильтрации в выемки, выработки, подземные части зданий и сооружений временно или постоянно на всех стадиях жизненного цикла объектов строительства. Это создает благоприятные условия для возведения зданий, сооружений и реконструкции городских территорий [2; 3; 68; 152; 159; 160; 175; 198; 201; 204; 216; 234; 235; 236; 262; 279; 280; 285].

Термин «конструктивно-технологический метод» встречен у В.И. Воронцова и Г.Б. Шабера [271]. Однако данные авторы придавали ему иной смысл, чем в нашем конструктивно-технологическом подходе. Они имели в виду соблюдение технологических режимов вскрытия и освоения водоносных горизонтов, правильный выбор параметров водоприемных частей дрен и скважин, а также другие мероприятия, направленные против осадкообразования и кольматажа дренажных устройств.

Показателями влияния городского строительства (ГС) на подтопление и дренирование территории является изменение уровня подземных вод (УПВ) относительно норм осушения для соответствующих функциональных зон города, регламентированных СНиП 2.06.15-85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления» [235]. Повышающийся

УПВ вызывает подтопление, понижающийся — дренирование.

Количественно эти показатели могут быть спрогнозированы аналитическими методами и моделированием на основе теории фильтрации подземных вод (см. рис. 1). Поэтому теория фильтрации является научной базой для определения влияния ГС на подтопление и дренирование территорий и для достижения практической цели — защиты от подтопления.

1.6. Выводы по главе 1

Разработанная автором классификация разновидностей городского строительства (ГС), влияющих на подтопление и дренирование территорий (см. табл. 2) позволяет сделать выводы:

1) каждая выделенная разновидность ГС вносит вполне определенный вклад в подтопление или дренирование территории;

2) наибольшее влияние на подтопление или дренирование территорий городов оказывают конструкции и технологии цикла инженерной подготовки и нулевого (подземного) цикла строительства;

3) общая тенденция влияния ГС направлена в сторону процессов подтопления, нежели дренирования, поэтому необходимо усиливать защиту от подтопления в городском строительстве мероприятиями, активно влияющими на дренирование территорий: водоотливом, водопонижением и особенно дренажем, как наиболее надежным техническим средством.

Главным результатом 1-й главы является постановка нового конструктивно-технологического подхода к защите от подтопления в городском строительстве. Доказана достаточная актуальность разработки методов и методик прогнозов и моделирования подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства, предпринятое в нашей работе. Это определило цель и постановку задач диссертационного исследования.

2. Теоретические обоснования прогнозов и моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве

Главная цель защиты от подтопления при строительстве состоит в обеспечении положения уровня подземных вод (УПВ) не менее норм осушения [235]. Для подвалов зданий пониженный УПВ должен находиться ниже отметки пола подвала не менее 0,5 метра [204]. 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 [231, п. 18.4]. Главная цель даёт чёткий ориентир для прогноза и моделирования УПВ в городском строительстве. Кроме того, определяют притоки подземных вод в системы водоотлива, водопонижения и дренажа. Дополнительно оценивают негативные последствия применения систем защиты от подтопления на территории застройки. Перечисленные цели можно обосновать лишь с помощью законов движения жидкости и газа в пористых средах [206].

Строительные процессы (в том числе при защите от подтопления) подразделяются на материальные и информационные [280]. Последние оперируют с идеальными предметами — цифрами, образами, моделями и т.п. Аналитические расчеты и математическое моделирование процессов фильтрации при защите от подтопления являются информационными процессами. Результаты этих информационных процессов служат основой реализации материальных процессов водоотлива, водопонижения и дренирования путем их технологического проектирования.

Строительной продукцией при защите от подтопления являются водоносные естественные и техногенные грунты с пониженным уровнем подземных вод, а иногда даже осушенные грунты при применении специальных средств защиты от подтопления [204]. Таким образом, необходимой

научной базой технологий защиты от подтопления в строительстве является теория фильтрации.

Основные теории, применяемые для фильтрационных расчетов [38; 195; 206] при детерминированном или стохастическом подходах:

- гидравлическая (линеаризованная и нелинеаризованная);
- гидродинамическая (профильные и трехмерные задачи).

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 [235] — 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 [198].

Ниже рассмотрены закономерности фильтрации воды, воздуха, фильтрационная консолидация грунтов, влаготеплоперенос, электроосмос. Закономерности приведены в объеме, необходимом и достаточном для разработки надежной защиты от подтопления в городском строительстве.

2.1. 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 [131].

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 расчёте осадок оснований водонасыщенные глины относят к фильтрующим [52; 81; 84; 112; 125; 138; 143; 278; 277; 294]. 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;
- водопритоков 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 [235]. Водопритоки чаще всего определяют в хорошо проницаемых грунтах типа гравийно-галечниковых или песчаных, в слабопроницаемых глинистых грунтах они малы. Основные расчёты и моделирование при защите от подтопления связаны с фильтрацией воды.

Отношение свободно вытекшей воды $V_{\text{воды}}$ к объёму всего грунта (или материала) $V_{\text{грунта}}$ называют коэффициентом водоотдачи [48; 148; 313]

$$\mu_{\text{в}} = V_{\text{воды}} / V_{\text{грунта}} \quad (1)$$

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

$$\mu_{\text{н}} = V_{\text{воды}} / V_{\text{грунта}}. \quad (2)$$

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

Величины $\mu_{\text{в}}$ и $\mu_{\text{н}}$ примерно равны между собой. Приблизённо можно считать так: сколько грунт впитает воды, столько он и отдаст её [195]. Чем крупнее частицы грунта (или материала), тем лучше его водоотдача. Пористость n всегда больше, чем $\mu_{\text{в}}$ и $\mu_{\text{н}}$.

В практических расчетах фильтрации подземных вод [204] обычно принимают, что

$$\mu_{\text{в}} = \mu_{\text{н}} = \mu. \quad (3)$$

Н.Н. Веригин назвал коэффициент μ «гидроемкость» [39]. У В.А. Мироненко коэффициент μ назван «гравитационная емкость» [148]. При допущении (3) этот коэффициент можно называть «гравитационная гидроемкость».

Вода может вытекать из сжимаемого грунта не только под влиянием силы тяжести, но и за счет выдавливания из пор. 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 несжимаемы [294]. 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 интенсивному уменьшению проницаемости грунта [206, 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 уплотненного грунта водой меньше, чем водоотдача [48, 206]. С учетом сказанного такую водоотдачу правильнее называть «упруго-пластическая водоотдача».

В механике грунтов применяют теорию фильтрационной консолидации [52; 81; 84; 112; 125; 138; 143; 277; 278; 294]. 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 несжимаема.

В книге В.А. Мироненко и В.М. Шестакова [149] отмечено о некоторой несогласованности теории фильтрации и механики грунтов в понятиях, связанных с фильтрацией воды. Например в определениях, связанных с упруго-пластическим режимом фильтрации. Достаточно сравнить работы [39; 48; 97; 195; 206; 313], чтобы убедиться в этом. Поэтому рассмотрим подробно водоотдачу грунта при упруго-пластическом режиме фильтрации (фильтрационной консолидации).

В большинстве гидрогеологических публикаций содержится предположение, что водонасыщенный пласт при упруго-пластической водоотдаче сжимается лишь в вертикальном направлении [206]. Это справедливо 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. Герсеванов [52] использовали такое же допущение. Однако

грунт под давлением фундаментов зданий и сооружений чаще всего испытывает плоские и объемные деформации. Поэтому В.А. Флорин [292; 296] рассмотрел 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 [294, с. 166] в гидрогеологических обозначениях [48; 148; 149; 313] можно записать в виде

$$\mu_{уп} = \eta_{уп} M, \quad (4)$$

$$\eta_{уп} = \frac{N \gamma a_c}{(1+e)[1+(N-1)\xi]}, \quad (5)$$

где $\eta_{уп}$ — коэффициент, аналогичный гидрогеологическому коэффициенту упругоэластичности горной породы [148], но отражающий физический смысл фильтрационной консолидации грунта, m^{-1} ; M — мощность водонасыщенного грунта, m ; γ — удельный вес воды, H/m^3 ; a_c — коэффициент сжимаемости грунта, Pa^{-1} ; ξ — 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 [294].

Коэффициент упруго-пластической водоотдачи грунта $\mu_{уп}$ при фильтрационной консолидации аналогичен по размерности коэффициенту гравитационной водоотдачи μ_v (безразмерные величины). Физический смысл $\mu_{уп}$ — это отношение объема поровой воды, отжатой из грунта под влиянием дополнительной нагрузки в процессе фильтрационной консолидации при уменьшении избыточного порового давления, к объему грунта. Пример определения коэффициента упруго-пластической водоотдачи показан

в [262] (пример 26).

Анализ производственной деятельности изыскательских организаций [237] по определению фильтрационных параметров с помощью откачек из скважин показал, что обычно определение коэффициента водоотдачи μ производится обобщенно для некоторого интервала опробования M_0 . Раз так, то в большинстве случаев нет смысла разделять этот коэффициент на водоотдачу гравитационную и упругую. Вернее, это невозможно 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 μ только к свободной поверхности УГВ приводит к схеме жесткой фильтрации воды под УГВ [148]. 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 МЭТ (см. главы 4 и 5) 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 [152].

Все фильтрационные потоки делятся на [12]:

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

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 [204] основаны на законе Дарси. Тщательные многолетние лабораторные опыты В.М. Павилонского (ВНИИ ВОДГЕО) с разнообразными глинистыми грунтами [178; 342] показали, что закон Дарси соблюдается даже в глинах, а начальный градиент напора отсутствует. Известный австралийский геолог Р.Е. Чепмен (R.E. Chapman) пришел [303], 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.).

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 [204]. Можно также называть k_w — водопроницаемость, а k_g — воздухопроницаемость. Обзор теории фазовой проницаемости изложен в [206].

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

$$k_w = k [(w - w_m) / (n - w_m)]^{3,5}. \quad (6)$$

Эта формула проверена многочисленными лабораторными и полевыми опытами отечественных и зарубежных исследователей [38; 194; 313; 315] и является достоверной.

На рис. 4 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 [262] (пример 31). Здесь k_0 — коэффициент проницаемости.

По результатам этих опытов следует вывод, затрагивающий вопросы вакуумного водопонижения с учетом прорыва воздуха в скважины, о том, что грунт становится практически непроницаемым при влажности, распределенной слоями в теле грунта. Например, в дождливый период не следует ожидать прорывов воздуха в иглофильтры и вакуумные скважины.

Разработка защиты от подтопления застройки сталкивается с проблемой достоверного определения фильтрационных характеристик (параметров) грунтов и материалов, так как в городах возникает техногенная гидрогеологическая среда [204]. Проницаемость грунтов, определенная в ходе изысканий до начала строительства, может существенно измениться при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Методика уточнения фильтрационных параметров с помощью расчетов и моделирования изложена в п. 3.4 (расчеты) и п. 5.2, 5.3 (моделирование).

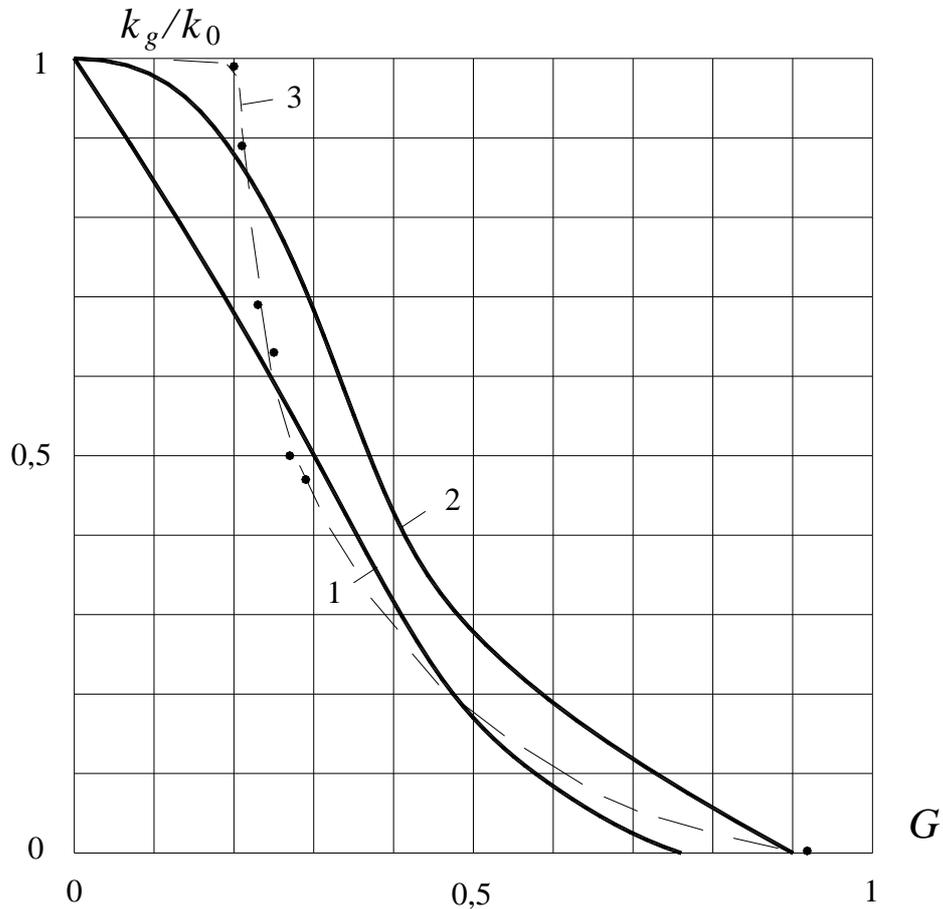


Рис. 4. Зависимость относительной фазовой проницаемости по воздуху от степени влажности: 1 — для глинистых грунтов [204]; 2 — для песчаных грунтов [12; 111]; 3 — опытная кривая с точками для неравномерно увлажненного песка (см. пример 31 в [262])

Таким образом, автор по теме исследования:

- уточнил терминологию коэффициента водоотдачи;
- предложил использовать при моделировании коэффициент водоотдачи по всему интервалу опробования водоносного пласта;
- указал, что прогнозы и моделирование фильтрационных процессов в работе рассмотрены в рамках закона Дарси;
- привел экспериментальные результаты по воздухопроницаемости, связанные с технологией водопонижения.

2.1.1. 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 [206] 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 опускают из рассмотрения не очень существенные особенности процесса фильтрации.

Классификация дифференциальных уравнений фильтрации построена с учетом основных трудов по теории фильтрации [206]. Эти уравнения в свое время классифицировали С.Ф. Аверьянов [6; 7], В.И. Аравин и С.Н. Нумеров [12], Я. Бэр и С. Ирмей [38], Н.Н. Веригин [39; 147], И.К. Гавич [48; 49], Н.П. Куранов [48; 113,], В.А. Мироненко [148], А.Ж. Муфтахов [152], Н.Н. Павловский [182; 183], П.Я. Полубаринова-Кочина [194; 195], В.С. Усенко [289], В.М. Шестаков [313].

В наиболее общем виде с физическим смыслом дифференциальные уравнения фильтрации вывел и опубликовал в 1922 г. Н.Н. Павловский [183].

Н.Н. Павловский [183], с учетом вышеизложенных представлений и обстоятельств, указал, что гидромеханический смысл модели фильтрации необходим для вывода дифференциальных уравнений движения.

Н.Н. Павловский, используя формулу М.В. Остроградского — Д. Грина, получил наиболее общее дифференциальное уравнение неразрывности для фильтрующейся сжимаемой жидкости в деформируемой пористой среде [183]:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \mathbf{V}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \mathbf{V}_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

с характеристическими уравнениями, выражающими зависимости плотности жидкости от давления

$$\rho = f(p) \quad (8)$$

и пористости среды от давления

$$n = f(p). \quad (9)$$

Здесь \mathbf{V}_x , \mathbf{V}_y , \mathbf{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.

При постоянной плотности жидкости ($\rho = \text{const}$), Н.Н. Павловский [183] получил такой вариант уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (10)$$

которое при постоянной пористости ($n = \text{const}$), то есть при несжимаемой пористой среде переходит в уравнение [183]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0, \quad (11)$$

где коэффициент фильтрации переменный и имеет общую зависимость

$$k = f(x, y, z), \quad (12)$$

Уравнение (11) можно записать короче как дивергенцию вектора скорости фильтрации в виде

$$\text{div } \bar{\mathbf{V}} = 0. \quad (13)$$

Для однородной изотропной несжимаемой пористой среды ($k = \text{const}$, $n = \text{const}$) из уравнения (22) получается уравнение Лапласа, где функцией является фильтрационный напор [183]:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0, \quad (14)$$

которое можно переписать в сокращенном виде

$$\nabla^2 H = 0, \quad (15)$$

где ∇^2 — оператор Лапласа (лапласиан) [103, с. 173; 64, с. 482].

Уравнение (11) пригодно для описания стационарной напорной и безнапорной фильтрации несжимаемой воды в недеформируемой пористой среде. Оно описывает также и нестационарную жесткую фильтрацию безнапорных 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 (11) относится к так называемой гидродинамической теории фильтрации. Термин «гидродинамическая теория фильтрации» введен П.Я. Полубариновой-Кочиной [194].

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 [39].

Обобщенное уравнение Буссинеска имеет вид [206] (рис. 5):

$$\frac{\partial(\mu H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(H - z_0) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(H - z_0) \frac{\partial H}{\partial y} \right] - \frac{k_B}{M_B} (H - H_B) + \omega, \quad (16)$$

где H — вертикальная отметка (напор) свободной поверхности УГВ от горизонтальной плоскости отсчета напоров 0-0; x, y — декартовы координаты

ты в горизонтальной плоскости; μ — гравитационная гидроемкость по (12); 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. 4); H_B — напор в напорном пласте под водоупором (см. рис. 4); ω — инфильтрационное питание грунтовых вод (может быть также с учетом испарения). Напомним, что все напоры отсчитывают от единой плоскости сравнения 0-0 (см. рис. 5).

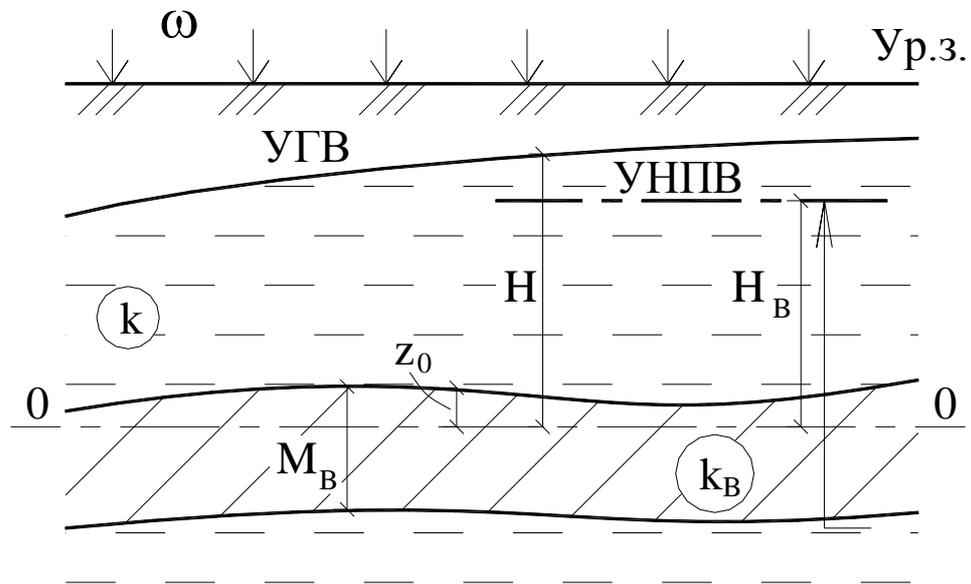


Рис. 5. К обобщенному уравнению Буссинеска (28)

Уравнение Буссинеска (16) с математической точки зрения является нелинейным, так как имеет переменные коэффициенты k и μ . Кроме того, переменными являются мощность грунтовых вод $(H - z_0)$, мощность водоупора M_B , напор в нижележащих напорных водах H_B и интенсивность инфильтрации ω . Это усугубляет нелинейность уравнения (16) поэтому его в большинстве случаев невозможно решить аналитически. Получено очень мало решений уравнения (16) для простейших одномерных задач [206]. Однако нелинейное уравнение Буссинеска (16) можно промоделировать с учетом всех переменных факторов.

Уравнение Буссинеска (16) справедливо для потоков грунтовых вод с медленно изменяющейся неустановившейся фильтрацией [165]. В работе [153] А.Ж. Муфтахов показал, что уравнение Буссинеска применимо для практических расчетов, если величина инфильтрации ω значительно меньше коэффициента фильтрации грунта k . Должно соблюдаться условие

$$\omega \ll k. \quad (17)$$

Если поверхность водоупора горизонтальная или близка к таковой (рис. 5), а водоносный грунт является однородным и изотропным, то нелинейное уравнение Буссинеска (28) можно упростить до вида [206]

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + k \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{k_B}{M_B} (h - H_B) + \omega, \quad (18)$$

где h — одновременно напор и мощность грунтовых вод при горизонтальной плоскости 0-0 отсчета напоров, совмещенной с водоупорной подошвой (см. рис. 6). Остальные обозначения те же, что к уравнению (16).

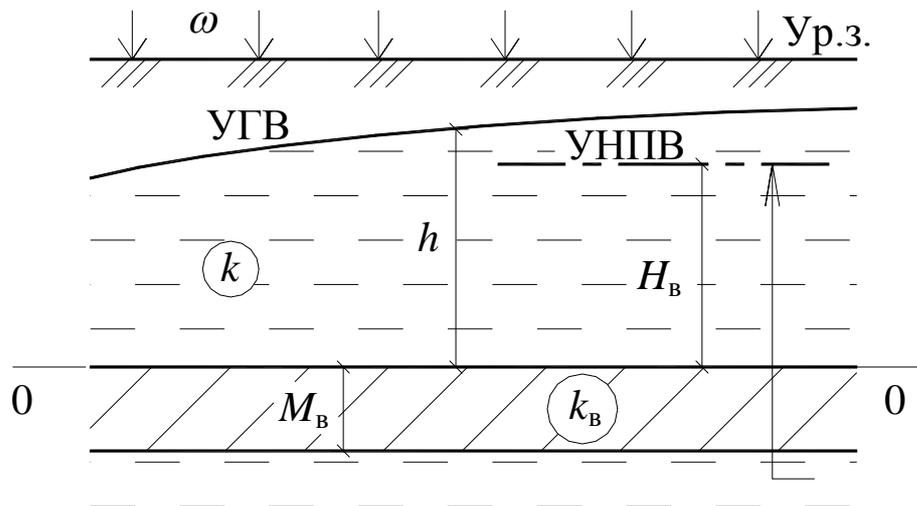


Рис. 6. К упрощенному нелинейному уравнению Буссинеска и линеаризованному уравнению по 2-му способу

Упрощенное уравнение Буссинеска (18) все равно остается нелинейным, поэтому прибегают к его линеаризации [206] с целью получения аналитических зависимостей в виде формул. Линеаризацию уравнения (18) можно применять, когда изменения поверхности УГВ Δh по отношению к

естественной мощности грунтовых вод h_e не превышают 10-25 % [6; 7; 48; 152; 313], что дополнительно исследовано в п. 3.2.

Наиболее широко в мировой практике применяют два способа линеаризации нелинейного уравнения Буссинеска (30) [206]:

- первый способ линеаризации (способ Ж. Буссинеска);
- второй способ линеаризации (по Н.А. Багрову и Н.Н. Веригину).

Рассмотрим 1-й способ линеаризации уравнения Буссинеска (способ по Буссинеску). В уравнении (16) нужно заменить переменную мощность грунтовых 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 . Однако поверхность водоупора может иметь слабый уклон (рис. 7). Водоносный грунт принимают однородным и изотропным. Тогда линеаризованное I способом уравнение Буссинеска (28) можно переписать так [206]:

$$\frac{1}{a_y} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - \frac{k_B}{kh_c M_B} (H - H_B) + \frac{\omega}{kh_c}, \quad (19)$$

где a_y — коэффициент уровнепроводности грунтовых вод, $m^2/сут$; H — напор свободной поверхности УГВ, отмеряемый от горизонтальной плоскости 0-0 (см. рис. 7). Остальные обозначения те же, что в уравнении (16).

Среднюю мощность безнапорного водоносного пласта h_c надо принимать такой, чтобы она обеспечивала наиболее достоверный расчет. Чаще всего [204] величину h_c принимают равной среднему арифметическому минимальной h_{\min} и максимальной h_{\max} мощности водоносного пласта в виде

$$h_c = (h_{\max} + h_{\min})/2. \quad (20)$$

Другие, более точные способы определения h_c изложены, например, в [6; 44; 147; 201; 204]. Следует заметить, что при небольших изменениях УГВ относительно мощности пласта (меньше 10—25 %) формула (20) да-

ет результаты в пределах инженерной точности.

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

$$a_y = k h_c / \mu. \quad (21)$$

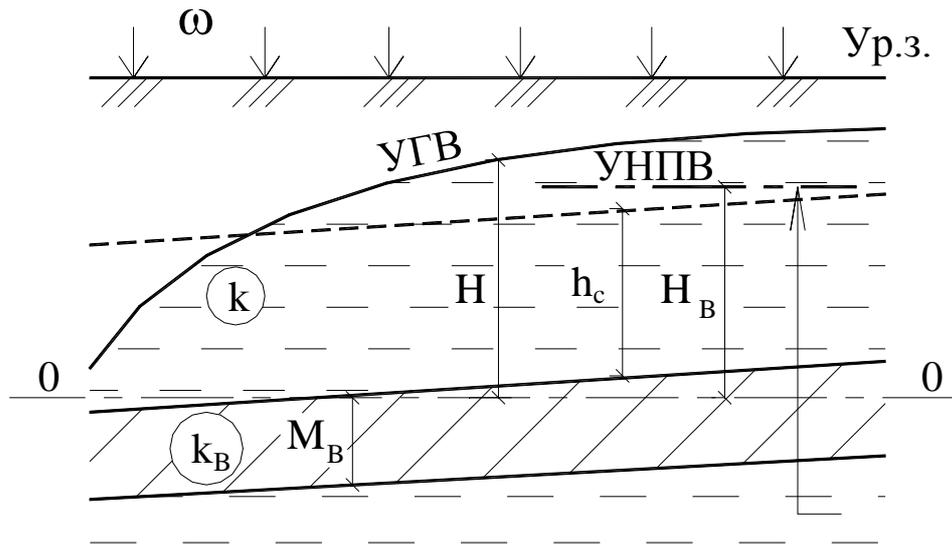


Рис. 7. Схема к линейризации по 1-му способу

Линеаризацию уравнения Буссинеска (18) по 2-му способу предложили независимо друг от друга гидрометеоролог Н.А. Багров в 1937 году и гидродинамик Н.Н. Веригин [40]. Эту линеаризацию применяют при горизонтальном водоупоре (см. рис. 6). Суть линеаризации по II способу состоит в подстановке вида

$$U = H^2/2 \text{ или } U = H^2, \quad (22)$$

что однако не избавляет от необходимости введения средней мощности пласта безнапорных вод h_c . Достоинством линеаризации по 2-му 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 [194; 195], а позднее Н.П. Куранов [114] показали, что в задачах подпора УПВ более предпочтительным является I способ линеаризации, а в задачах дренирования — II способ. В любом случае линеаризация является при-

ближенным приемом, который нужно проверять каждый раз независимым способом, например моделированием.

Гидравлическая теория фильтрации хорошо описана в книгах П.Я. Полубариновой-Кочиной [194; 195]. 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 используется в стандартных расчетах справочного пособия к СНиП [204].

В 1969-70 гг. Н.Н. Веригин [39; 147] предпринял дополнительные исследования по анализу уравнений фильтрации подземных вод. Он получил интересный результат: при гидрогеологических прогнозах на срок $t \leq 30$ лет можно без существенных погрешностей в определении напора (ошибка не более 5 %) использовать дифференциальное уравнение, аналогичное уравнению теплопроводности (уравнению Фурье):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a \nabla^2 H, \quad (23)$$

где a — коэффициент пьезопроводности или урвнепроводности 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 (23):

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

Оба условия, по времени прогноза t и коэффициенту a , практически не ограничивают область применения дифференциального уравнения (23) в

реальных пластах подземных вод. Это позволило Н.Н. Веригину с соавторами [147] получить большое количество решений дифференциального уравнения (23) при различных граничных условиях. Полученные в [147] аналитические формулы относятся к линейной теории фильтрации или гидравлической теории. Область применения этих зависимостей определена авторами коллективной монографии [147] для фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем сельского хозяйства. Следует отметить, что многие решения из [147] применимы и для городского строительства при условии, что величины изменения УГВ не превышают 10–25 % от естественной мощности грунтовых вод [6; 7; 48; 315].

А.Ж. Муфтахов получил общий класс аналитических решений для уравнений в гидродинамической постановке, в изотропных и анизотропных пластах подземных вод [152]. 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 [152]:

а) плоская в разрезе фильтрация

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad i = 1, 2; \quad \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{xi}}; \quad (24)$$

б) осесимметричная в разрезе фильтрация

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

или [201]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_i}{\partial r} \right) + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad (25)$$

в) трехмерная фильтрация

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_i}{\partial y^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; i = 1, 2; \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{\Gamma i}}; \quad (26)$$

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

Условие на свободной поверхности УПВ, находящейся в верхнем слое, было записано А.Ж. Муфтаховым в линеаризованном виде [152]

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{k_{z1}}{\mu_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial z} - \frac{\omega(\eta)}{\mu_1} = 0; z = h_1. \quad (27)$$

где η — обобщенная координата, $\eta = x$ для плоской в разрезе фильтрации, $\eta = r$ для осесимметричной; μ — коэффициент водоотдачи или недостатка насыщения верхнего слоя соответственно при понижении или повышении УГВ; ω — инфильтрационное питание водоносного пласта, зависящее от координаты η . Величину ω называют также дополнительной инфильтрацией или интенсивностью дополнительной инфильтрации [204]. 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 водоупор.

Отметим, что дифференциальные уравнения изотермической фильтрации газа [19, 206] впервые получил Л.С. Лейбензон [122]. Эти уравнения сокращенно можно записать так [19]:

$$\frac{k_0}{2\mu_{\Gamma} n_a} \nabla^2 p^2 = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (28)$$

где ∇^2 — лапласиан (оператор Лапласа); k_0 — газопроницаемость

пористой среды (m^2); μ_T — 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.

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 (метод автора МЭТ). Обычно [58; 223] дифференциальные уравнения служат отправными при получении конечно-разностных уравнений движения флюидов в пористых средах. Однако весьма полезным является обратный способ вывода, когда дифференциальные уравнения получаются предельным переходом из конечных разностей. Для этого автор широко использует интегробалансовый принцип А.А. Самарского [223]. Такая интерпретация исходных дифференциальных уравнений фильтрации придает их осмыслению весьма наглядный физический смысл, помогает в верной исходной постановке задач. Иногда уточнение исходных дифференциальных уравнений фильтрации автор получал благодаря первоначальному изучению соответствующих процессов с помощью численного моделирования (см. п. 3.3.1).

Рассмотренные дифференциальные уравнения и их классификации приведены в качестве необходимого обзора. Кроме того, в процессе изложения представлена база понятий и определений, которые используются в последующих гл. 3–5. Такие же соображения относятся и к следующим параграфам данной главы. Подробное описание понятийного аппарата потребовалось в связи с тем, что существует некоторое несоответствие терминологии в разных сферах строительства.

2.1.2. Дифференциальные уравнения фильтрационной консолидации

Уравнения фильтрации сжимающихся грунтов относятся к теории фильтрационной консолидации [351]. Искомой функцией в них является поровое давление, которое можно записывать через напор в грунтовых водах H , так как поровое давление есть избыточное давление в грунтовой воде над установившимся гидростатическим давлением в естественном состоянии грунта. Теоретическая основа фильтрационной консолидации необходима для целей прогноза и моделирования изменения проницаемости грунтов под влиянием тех или иных разновидностей строительства.

Уравнения фильтрационной консолидации для анизотропного грунта в соответствии с принципом гидроемкости Н.М. Герсеванова [52] можно представить с учетом (5) в следующих вариантах [84; 294]:

одномерная консолидация в вертикальном направлении

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)k}{\gamma a_c} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}; \quad (29)$$

двухмерная плоская (в разрезе) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+\xi)}{2\gamma a_c} \cdot \left(k_r \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (30)$$

трехмерная (пространственная) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a_c} \cdot \left(k_r \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_r \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (31)$$

осесимметричная (пространственная, профильно-радиальная) консолидация

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a_c} \cdot \left(k_r \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{k_r}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right). \quad (32)$$

Здесь H — напор в грунтовой воде; H_0 — напор от действия дополнительной нагрузки от веса возводимого здания или сооружения; e — коэффициент пористости грунта; m_c — коэффициент сжимаемости (уплотнения) грунта; ξ — коэффициент бокового давления грунта; γ — 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 несжимаема и уплотнение происходит за счет уменьшения пористости грунта.

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

$$\frac{\partial H_0}{\partial t} = 0, k_r = k_z = k. \quad (33)$$

Тогда уравнения (29), (30), (31) и (32) можно записать кратко с помощью оператора Лапласа ∇^2 [64, с. 482; 103, с. 173] в виде аналога хорошо известного в математической физике уравнения теплопроводности [294]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a \nabla^2 H, \quad (34)$$

где a — коэффициент пьезопроводности, в данном случае определяемый с учетом (5) зависимостью [294]:

$$a = \frac{k(1+e) [1+(N-1) \xi]}{N\gamma a_c} = \frac{k}{\eta_{уп}}. \quad (35)$$

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 несжимаема, 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 % [125]. Поэтому строительные нормы и правила [231] 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 (МЭТ), используя примеры из книг В.А. Флорина [294] и П.Л. Иванова [84]. См. также пример 62 в [262] и п. 5.1 настоящей работы.

Максимально возможное уплотнение водонасыщенного грунта под фундаментами вследствие фильтрационной консолидации можно найти по так называемой схеме «мгновенно» загруженного фундамента [84; 294]. Эта схема дает запас и с точки зрения механики грунтов (увеличиваются осадки фундаментов), и с точки зрения уменьшения коэффициента фильтрации грунта под фундаментом (увеличивается барражный эффект).

В случае сильносжимаемых грунтов под фундаментами, дорогами с динамическими нагрузками, в других экстремальных ситуациях уменьшение k может резко усилиться. Все это, а также случаи слоистых, анизотропных грунтов при их уплотнении можно промоделировать с помощью нашего метода МЭТ (см. главы 4 и 5).

2.1.3. Закон диффузии влаги и дифференциальные уравнения влагопереноса

Закон диффузии Фика для изотермического влагопереноса в пористой среде связывает скорость диффузии \mathbf{V}_D (м/сут) с коэффициентом диффузии пористой среды D_d (м²/сут), перепадом влажности (влагосодержания) грунта или материала ΔW (кг/кг) — при условии небольшого изменения влажности W — и длиной пути диффузии L (м) так [72, с. 86; 198, с. 51; 128, с. 432; 129, с. 56; 148, с. 253; 195, с. 508]:

$$\mathbf{V}_D = D_d \Delta W / L. \quad (36)$$

Диффузия влаги в пористой среде происходит от большей влажности W_1 к меньшей W_2 . В зависимости (36) разность влажностей (перепад)

$$\Delta W = W_1 - W_2. \quad (37)$$

Закон диффузии влаги в грунте в форме (48) был использован А.Ж. Муфтаховым, Н.П. Курановым, А.П. Шевчиком и И.М. Бывальцевым для разработки основ проектирования вентиляционного дренажа [37; 198; 158]. Разработанная методика вошла в справочное пособие к СНиП [204].

Диффузия влаги по зависимости (36) относится к концентрационной диффузии, то есть подчиняется закону Фика [128]. Другими разновидностями диффузии влаги в пористых телах являются термодиффузия (эффект Соре) [129, с. 9] и бародиффузия. Термодиффузия проявляется при значительных температурных градиентах, а бародиффузия на практике весьма мала и ее часто не учитывают [276, с. 265].

Самыми простыми являются дифференциальные уравнения изотермической диффузии влаги в пористой среде [128, с. 475]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_d \nabla^2 W, \quad (38)$$

где ∇^2 — оператор Лапласа [103, с. 173]; W — влажность (влагосодержание) пористого тела, кг/кг; D_d — коэффициент диффузии, $m^2/сут$; t — время, $сут$.

В более общем случае дифференциальные уравнения неізотермического диффузионного влаготеплопереноса в пористой среде, следуя А.В. Лыкову [128, с. 475], можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= a_{11} \nabla^2 W + a_{12} \nabla^2 T; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a_{22} \nabla^2 T + a_{21} \nabla^2 W, \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

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

Еще сложнее дифференциальные уравнения неізотермического диффузионно-фильтрационного влаготеплопереноса в пористой среде, которые по А.В. Лыкову [128, с. 479] можно записать в виде такой системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= a_{11} \nabla^2 W + a_{12} \nabla^2 T + a_{13} \nabla^2 P; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a_{21} \nabla^2 W + a_{22} \nabla^2 T + a_{23} \nabla^2 P; \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= a_{31} \nabla^2 W + a_{32} \nabla^2 T + a_{33} \nabla^2 P, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

где P — давление пара, образующегося из вскипающей влаги внутри пористого тела при температуре выше $100^{\circ}C$ [55, 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 городском строительстве при защите от подтопления такие условия практически не наблюдаются. Поэтому в качестве основных могут быть приняты уравнения (38) и (39).

Отметим, что уравнения А.В. Лыкова (39) в двухмерной постановке в вертикальной плоскости применены В.И. Федоровым [293] для решения прогнозной задачи влаготеплопереноса в грунте обратной засыпки фундаментных пазух на контакте с естественным грунтом. Выбрана декартова система координат в вертикальном разрезе. Испарение с поверхности земли принято стационарным. Градиенты температуры были осреднены по всему массиву грунта. Однако В.И. Федоров вовсе не моделировал данную задачу, а выполнил ее в виде аналитических расчетов на ЭВМ.

Мы же рекомендуем моделировать уравнения (38) и (39) с помощью нашего метода МЭТ (см. главы 4 и 5). Формулы моделирования можно получить из этих уравнений, применяя конечно-разностные аналоги дифференциальных операторов. Примеры этих аналогов можно найти в справочнике [184]. Еще лучше формулы моделирования вывести с использованием интегро-балансового принципа А.А. Самарского [222, 223], который широко использован в гл. 4 и 5 при изложении технологии МЭТ.

2.1.4. Электроосмос и его дифференциальные уравнения

Закон электроосмоса для воды связывает скорость переноса влаги $\mathbf{V}_Э$ (м/сут) с коэффициентом электроосмотической фильтрации пористой среды $k_Э$ (м²/(В·сут)), разностью потенциалов постоянного тока ΔU (В) и длиной пути фильтрации L (м) так [78; 84; 99; 124; 282]:

$$\mathbf{V}_Э = k_Э \Delta U / L. \quad (41)$$

Закон (41) является феноменологическим, так как коэффициент электроосмотической фильтрации $k_{\text{Э}}$ надежно определяется лишь опытным путем. Имеются попытки теоретического обоснования электроосмоса, которые описаны в книге [282]. Там же дана подробная библиография по электроосмосу. К.П. Тихомолова [282] 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 [78; 84; 99; 124], когда коэффициент $k_{\text{Э}}$ 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. Пиасковского, Г.М. Ломизе и Г.Н. Жинкина [78, с. 55] коэффициент электроосмотической фильтрации для различных грунтов находится в пределах $k_{\text{Э}} \approx (0,5 \dots 13,0) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (0,43 \dots 11,2) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$, чаще всего $k_{\text{Э}} \approx (3 \dots 5) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (2,6 \dots 4,3) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$. По В. Кнаупе [99] $k_{\text{Э}} \approx (3 \dots 8) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (2,6 \dots 6,9) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$. Для сравнения приводим значения $k_{\text{Э}}$ по данным ОАО «ОмскТИСИЗ» для 1 линии Омского метрополитена по четвертичному суглинку павлодарской свиты, который имеет мягко- и текучепластичную консистенцию. Данный суглинок характеризуется значениями $k_{\text{Э}} \approx (1,57 \dots 8,78) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \approx (1,36 \dots 7,59) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$, то есть не имеет аномальных отклонений.

Г.Н. Жинкин показал [78, с. 160], что теоретически глинистый грунт (глину, суглинок, супесь) можно осушить с помощью электроосмоса до остаточной влажности, соответствующей пределу раскатывания (пластичности) W_p , кг/кг (стандартная влажность по массе). Однако прак-

тически снижение влажности грунта до консистенции раскатывания требует больших затрат электроэнергии. Поэтому, по результатам опытов Г.Н. Жинкина [78], при осушении глинистого грунта с помощью электроосмоса целесообразно принимать остаточную влажность

$$W_k = (3W_p + W_T)/4, \quad (42)$$

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

$$\mu_э = W_{оe} - W_{ок}, \quad (43)$$

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

Пересчитать массовую влажность W на объемную W_o можно с помощью следующего стандартного соотношения [300]:

$$W_o = W\rho_{сух.гр.}/\rho, \quad (44)$$

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

Расчет электроосмотической водоотдачи грунта см. [262] (пример 32).

Электроосмотическое водопонижение рекомендуется совмещать с вакуумированием грунта [78; 99]. При наложении полей гравитационных напоров и постоянного электрического тока во влажном грунте происходит фильтрация с суммарной скоростью [78; 99]

$$V = V_\phi + V_э = k\Delta H/L + k_э\Delta U/L, \quad (45)$$

где V_ϕ — скорость гравитационной фильтрации по закону Дарси; $V_э$ — скорость электроосмотической фильтрации; k — коэффициент фильтрации грунта; ΔH — разность напоров; L — длина пути фильтрации; $k_э$ — коэффициент электроосмотической фильтрации; ΔU — разность

электрических потенциалов (напряжений).

Простейший случай одномерной фильтрации (в декартовой системе координат) при действии двухрядной установки электроосмотического водопонижения для траншеи проиллюстрирован на рис. 8. Со знаком минус показаны металлические скважины-катоды, из которых притекающая грунтовая вода удаляется с помощью вакуум-насосов или эжекторов. Со знаком плюс — 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 строительного-монтажных работ в траншее.

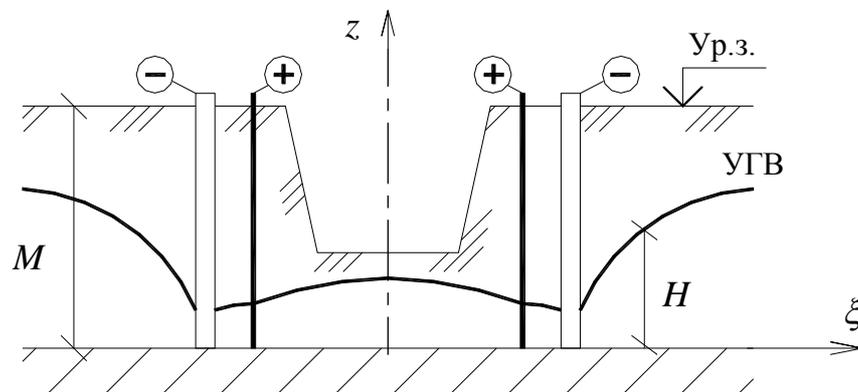


Рис. 8. Электроосмотическое водопонижение: $\xi = x$ для траншеи в декартовых координатах; $\xi = r$ для котлована в цилиндрических координатах

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. 8). По свидетельству В. Кнаупе [99, с. 323], весь период электроосмотического водопонижения значение силы тока, проходящего через грунт, соответствует закону Ома. Это означает, что с момента пуска водопонижительной установки 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 водопонизительных работ, пока включен генератор постоянного тока.

Фильтрация грунтовых вод к скважинам-катадам, наоборот, будет нестационарной. Грунт интенсивно отдает воду с водоотдачей μ_3 , увеличенной электроосмосом. Движение грунтовых вод со свободной поверхностью (УГВ) при небольшой мощности H (см. рис. 8) 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

$$\begin{aligned}\mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= k_3 M \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= k \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right),\end{aligned}\quad (46)$$

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

В случае радиальной в плане фильтрации, например к круговой контурной водопонизительной системе для котлована (см. рис. 8), вместо (46) можно записать аналогичную систему дифференциальных уравнений нестационарной одномерной (в цилиндрической системе координат) электроосмотической и нелинейной (по Буссинеску) гравитационной фильтрации так:

$$\begin{aligned}\mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{k_3 M}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right); \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r H \frac{\partial H}{\partial r} \right),\end{aligned}\quad (47)$$

где r — радиальная координата (см. рис. 8); остальные обозначения оговорены.

При плановой фильтрации грунтовых вод по аналогии с (46) можно записать систему дифференциальных уравнений нестационарной двухмерной (в горизонтальной декартовой системе координат) электроосмотической и нелинейной (по Буссинеску) гравитационной фильтрации в виде

$$\begin{aligned} \mu_3 \frac{\partial H}{\partial t} &= k_3 M \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right]; \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} &= k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right], \end{aligned} \quad (48)$$

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

Уравнения (46)–(48) сложны для получения аналитических решений, так как они нелинейные. Поэтому целесообразнее электроосмотическое водопонижение с вакуумированием грунтовых вод моделировать с помощью технологии МЭТ (см. главы 4 и 5).

2.2. Критерии линеаризации гидравлической теории фильтрации

Как уже было сказано, основные теории, применяемые для фильтрационных расчетов [38; 195; 206]:

- гидравлическая (линеаризованная и нелинеаризованная);
- гидродинамическая (профильные и трехмерные задачи).

Порядок их размещения в перечне соответствует частоте применения в существующей практике проектирования защиты от подтопления в городском строительстве. Наиболее применимой вследствие ее простоты является гидравлическая линеаризованная теория фильтрации, но по исследованиям автора она может приводить к погрешностям до нескольких сотен процентов в грунтовых водах малой мощности [262]. Поэтому для прогнозирования влияния ГС по теме исследований потребовалось критериально разграничить области применения линеаризованной и нелинеаризованной

гидравлической теории фильтрации (по Буссинеску).

Многие применяемые в настоящее время критерии схематизации для грунтовых вод со свободной поверхностью (УГВ) базируются на линеаризованной гидравлической теории фильтрации [195]. Применимость этой теории для конкретного фильтрационного расчета можно определить с помощью двух критериев: С.Ф. Аверьянова [6] и А.Ж. Муфтахова [152; 204].

По С.Ф. Аверьянову [6, с. 177] возможность применения линеаризации гидравлической теории фильтрации при расчетах грунтовых вод требует, чтобы изменение поверхности УГВ Δh (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 [48, с. 109]

$$\Delta h/h_e \leq 0,2...0,3 \quad (49)$$

или несколько жестче по В.М. Шестакову [315, с. 230]

$$\Delta h/h_e \leq 0,1...0,2. \quad (50)$$

Нами (см. [262] пример 33) проанализировано, как С.Ф. Аверьянов обосновал критерий линеаризации гидравлической теории, который затем уточнили И.К. Гавич и В.М. Шестаков. Это позволило нам, в свою очередь, уточнить данный критерий [262].

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. [262] пример 4).

Наше уточнение применения критерия С.Ф. Аверьянова по линеаризации уравнения Буссинеска для грунтовых вод (см. [262] пример 33) имеет

следующие два положения:

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:

$$\Delta h/h_e \leq 0,1; \quad (51)$$

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

$$\Delta h/h_e \leq 0,25. \quad (52)$$

Критерий А.Ж. Муфтахова [152; 204]

$$h_c / \xi \leq 0,1 \quad (53)$$

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

Если критерий (53) соблюден, то можно использовать гидравлические решения уравнения Буссинеска для грунтовых вод и линеаризованные, и нелинеаризованные (см. пример 34 в [262]).

Наши дополнительные исследования с помощью численного моделирования фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью (п. 4.2 и пример 58 в [262]) позволили найти еще один критерий:

$$h_e / \xi \leq 0,01, \quad (54)$$

согласно которому нелинейное уравнение Буссинеска можно линеаризовать при любых соотношениях $\Delta h/h_e$.

2.3. Метод автомодельных движений с численным моделированием

Подпор УПВ от водоемов проработан в технической литературе достаточно подробно. Прогноз подпора УГВ из водохранилищ и каналов рассматривали В.И. Аравин (1940), Б.К. Ризенкамф (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 подчеркнuto, 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; 48; 315].

Особой задачей является прогноз подпертой фильтрации из очага подтопления в сухой грунт на водоупоре, когда отсутствует первоначальная мощность грунтовых вод. Впервые такую задачу поставил Н.Н. Веригин в 1951 г. [41] с особым условием на фронте языка подтопления, приравняв скорость фильтрации по закону Дарси скорости движения фронта, умноженному на недостаток (дефицит) насыщения грунта μ . 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. [227, с. 178-179].

Точное решение этой задачи при нелинейной плоскопараллельной одномерной фильтрации со свободной поверхностью получено П.Я. Полубариновой-Кочиной в 1952 г. [193] для длины языка подтопления (рис. 9)

$$L_{\text{яз}} = 1,616 (kH_0t/\mu)^{1/2}, \quad (55)$$

где k — коэффициент фильтрации грунта; H_0 — постоянный напор в источнике подтопления; t — время; μ — недостаток (дефицит) насыщения грунта.

Решение аналогичной задачи при радиальной фильтрации со свободной поверхностью неизвестно. Поэтому разработаем эффективный метод автомодельных движений с численным моделированием — метод АДЧМ. В целях обоснования его достоверности получим классическую формулу П.Я. Полубариновой-Кочиной (55) для плоскопараллельной фильтрации. Начальные выкладки заимствуем из [193; 194; 195].

Исходное нелинейное гидравлическое (по Буссинеску) дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при плоскопараллельном движении воды (см. рис. 9) в частных производных имеет вид

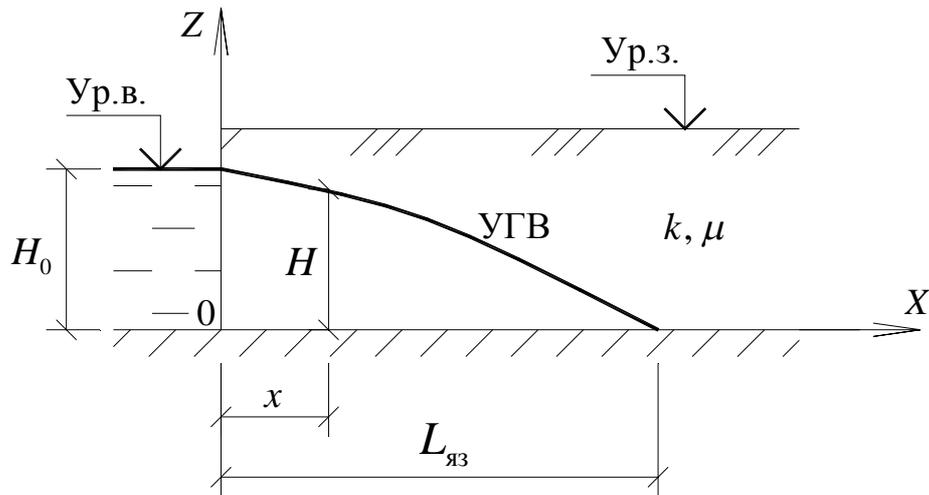


Рис. 9. Язык подтопления (плоскопараллельная фильтрация)

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (56)$$

Граничное условие слева при $x = 0$ (см. рис. 9) выражает постоянство напора в вытянутом источнике подтопления:

$$H(0, t) = H_0. \quad (57)$$

Другое граничное условие с постоянным нулевым напором ставим на движущемся фронте языка подтопления справа при $x = L_{\text{яз}}$ (см. рис. 9) в виде

$$H(L_{\text{яз}}, t) = 0. \quad (58)$$

Первоначально грунт не обводнен. Начальное условие при любом $x > 0$ имеет вид

$$H(x, 0) = 0. \quad (59)$$

Введем две подстановки (безразмерные переменные):

$$U = H/H_0; \quad (60)$$

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{2kH_0t/\mu}}. \quad (61)$$

Тогда уравнение (56) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2U^2}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dU}{d\xi} = 0. \quad (62)$$

Уравнение (62) можно переписать в развернутом виде

$$UU'' + (U')^2 + \xi U' = 0, \quad (63)$$

где штрихом и двумя штрихами обозначены для краткости письма соответственно первая и вторая производные U по ξ .

Если в (63) 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. 10), то есть $U = 0$, $U' = -C$.

Далее П.Я. Полубаринова-Кочина нашла решение (63) в виде ряда, разложив U по степеням разности $\xi - C$, откуда определила $C = 1,143$.

Из (61) при $x = L_{\text{яз}}$ и $\xi = C$ П.Я. Полубаринова-Кочина вывела длину языка подтопления в виде (55).

Найдем по-своему C численным моделированием языка грунтовых вод при плоскопараллельной фильтрации, для чего перепишем (62) в конечных разностях (рис. 11), пользуясь [184, с. 37 и 40]:

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta\xi)^2} + \frac{2\xi_i (U_{i+1} - U_{i-1})}{2\Delta\xi} = 0.$$

Из этого уравнения получим формулу автомодельного безразмерного моделирования в виде

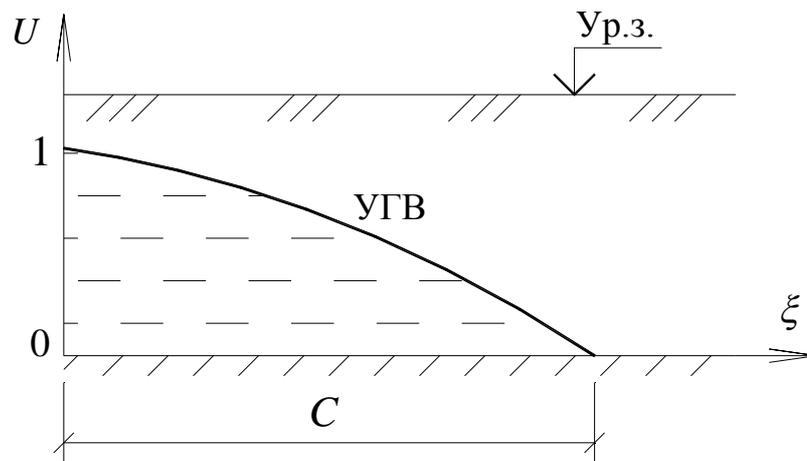


Рис. 10. Линейный язык подтопления в безразмерных координатах

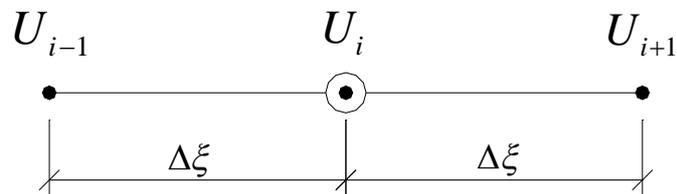


Рис. 11. Безразмерная МКР-сетка в декартовых координатах

$$U_i = \left[\left(U_{i+1}^2 + U_{i-1}^2 \right) / 2 + \xi_i \Delta \xi (U_{i+1} - U_{i-1}) / 2 \right]^{1/2}. \quad (64)$$

Эту формулу применим на МЭТ-модели [262], 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 то же условие I рода $U = 1$. Собрав одномерную модель по нашему методу МЭТ (см. гл. 4 и 5) с помощью формулы (64), 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. При каком-то значении C счет на модели становится неустойчивым 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 [193; 194; 195].

Далее коэффициент C подставляется в формулу (61), откуда вытекает формула точно такая же как и (55). Тем самым доказана достоверность метода автора АДЧМ.

Эффективность нового метода АДЧМ для прогнозов подтопления и дренирования в городском строительстве продемонстрирована в главе 3. Оказалось, что метод подходит и для не совсем автомодельных задач, где традиционными аналитическими преобразованиями не удастся избавиться от временной зависимости. Это свидетельствует о довольно широкой области применения метода АДЧМ в теории фильтрации при решении прикладных инженерных задач.

2.4. Выводы по главе 2

Рассмотренный обзор закономерностей фильтрации воды, воздуха, фильтрационной консолидации грунтов, влаготеплопереноса, электроосмоса, их дифференциальных уравнений движения, классификации разновидностей теорий фильтрации, критериальные исследования автора, разработка эффективного аналитического метода для решения нелинейных гидравлических задач движения верховодок и грунтовых вод с малой мощностью потоков, свойственных большинству подтапливаемых городов, позволяет сформулировать следующие выводы:

- проанализирована теоретическая основа прогнозов и моделирования подтопления и дренирования территорий в городском строительстве (ГС), которой является теория фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью в водоносных пластах с малой мощностью потоков, с необходимостью четкого разграничения прогнозов подтопления и дренирования в линеаризованной и нелинейной гидравлических постановках.
- автором уточнены существующие критерии линеаризации нелинейного уравнения движения грунтовых вод с наперед заданной погрешностью расчета 5 % и 10 %, а также получен новый критерий линеаризации (54), при соблюдении которого прогнозы подтопления и дренирования территорий в ГС всегда можно выполнять с помощью линеаризованной гидравлической теории фильтрации.
- автором разработан новый прикладной математический метод автоматизированных движений с численным моделированием (АДЧМ), позволяющий получать точные гидравлические решения нелинейного дифференциального уравнения Буссинеска фильтрации грунтовых вод с потоками малой мощности, что актуально для прогнозирования по теме исследования.

3. Прогнозы подтопления и дренирования в городском строительстве

Строительное освоение территорий осложняется процессами подтопления. 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. Прогнозирование эффективности защиты от подтопления наиболее достоверно реализуется с помощью компьютерного моделирования (см. гл. 4–5). Однако первоначальные оценки лучше производить аналитическими прогнозами (см. рис. 1).

Аналитические прогнозы при защите от подтопления в городском строительстве можно подразделить так [204]:

- 1) схематизационные расчеты и обратные задачи;
- 2) прогнозы подтопления;
- 3) фильтрационные расчеты защитных мероприятий.

В таком порядке рассмотрены аналитические прогнозы в данной главе. В соответствии с принятой в России строительной нормативно-справочной терминологией по защите от подтопления [204, с. 9], методы прогноза и моделирования трактуются как разные методы.

3.1. Технология прогнозов подтопления и дренирования

Прогнозы подтопления и дренирования в городском строительстве проводят последовательными приближениями. Технологическая блок-схема прогноза подтопления изображена на рис. 12, а прогноза дренирования (фильтрационного расчёта защиты от подтопления) — на рис. 13.



Рис. 12. Технология прогноза подтопления

Если прогноз подтопления показал, что объект не будет подтоплен, то принимается решение о профилактических мероприятиях, например о выборе системы водоотлива из котлована для отвода поверхностных атмосферных вод, если прогноз составлен для строящегося объекта. При прогнозе подтопления на период эксплуатации или реконструкции участка или района застроенной территории, показавшим, что объект не будет подтоплен, также предусматриваются какие-либо профилактические меры, например устройство окрасочной противокapиллярной гидроизоляции для подземных конструкций зданий и сооружений. Вывод о том, что данный участок застройки не будет подтоплен, следует принимать с большой осторожностью, перебрав возможные неблагоприятные варианты.



Рис. 13. Технология прогноза дренирования (фильтрационного расчёта защиты от подтопления)

Если же объект будет подтоплен, то переходят к разработке защитных мероприятий, например рассчитывают водоотлив, водопонижение или дренаж (см. рис. 13). Обычно водоотлив и водопонижение предусматривают на период строительства, а дренаж — на период эксплуатации объекта. Возможны исключения из этого правила, особенно при аварийном подтоплении. Основной акцент в технологических блок-схемах прогнозов и расчетов, изображенных на рис. 12 и рис. 13 сделан на определение положения уровня подземных вод (УПВ), так как главная цель защиты от подтопления в городском строительстве состоит в обеспечении положения УПВ в

расчетный период не менее норм осушения [248].

Прогноз подтопления (см. рис. 12) начинают с исследования объекта возможной защиты от подтопления: территории застройки, здания или сооружения. Изучают проектные решения объекта и гидрогеологическую ситуацию. На этом этапе выбирают вид прогноза подтопления. Основные разновидности прогнозов подтопления следующие [204]:

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

Мы считаем целесообразным, для городского строительства перед вышеперечисленными прогнозами, проводить дополнительный прогноз изменения проницаемости грунтов оснований по нашей методике, изложенной в п. 3.2 и 5.1. Далее в данной главе изложены теоретические исследования автора по вышеперечисленным разновидностям прогнозов подтопления. Особый акцент сделан на техногенные изменения гидрогеологии города, проявляющиеся во влиянии конструкций, фундаментов зданий и сооружений на водоносные грунты оснований. Восполнены некоторые пробелы в методике прогнозирования влияния техногенного подтопления, возникающего в период строительства, в случае грунтовых вод малой мощности и в первоначально необводненных грунтах.

Выбор метода прогноза должен производиться по конкретной ситуации. Для территорий застройки первоначальные прогнозы обычно проводят методом аналогий [51]. Для этого находят аналогичные объекты со сходными природными и техногенными условиями. Вычисляют равномерный подъем УГВ. Год подтопления территории застройки определяют по достижению УГВ нормы осушения [235]. Технологию выбора метода расчета нагляднее показать на примерах, что рассмотрено в следующих параграфах.

3.2. Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований

Под влиянием городского строительства 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 и их нужно решать на стадии схематизации области фильтрации.

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 необратимы [52; 81; 84; 112; 125; 138; 143; 277; 278; 294]. 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 (НИИ ВОДГЕО) [50; 190].

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 [131] имеют ограниченный характер [85]. Известны случаи увеличения проницаемости грунтов при инфильтрации в грунт химических стоков [51]. В.И. Федоров [291] натурными обследованиями застроенных территорий дальневосточных городов России выяснил, что глинистые грунты нарушенной структуры в обратных засыпках фундаментов и подземных частей зданий и сооружений приобре-

тают 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 [291]. 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. [202; 203].

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.

3.2.1. 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 [77; 81; 84; 198; 294].

Коэффициент фильтрации глинистого грунта, уплотненного статической нагрузкой (например зданием), можно определить по формуле В.Н. Жиленкова [77]:

$$k = k_0 \exp[\beta_S(e - e_0)], \quad (65)$$

где k_0 — начальный коэффициент фильтрации грунта в естественном залегании; e_0 и e — коэффициенты пористости грунта соответственно в естественном залегании и после уплотнения; β_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. Зависимость, аналогичную (65), привел Ю.К. Зарецкий [81], но без конкретизации коэффициента уплотнения грунта.

Более точно по В.Н. Жиленкову [77] коэффициент

$$\beta_S = 0,2/(W_L - 0,1), \quad (66)$$

где W_L — граница текучести грунта (верхний предел пластичности). Формула (66) записана нами проще, чем в [77], что практически не влияет на ее результат.

Коэффициент фильтрации глинистого грунта, уплотнённого динамической нагрузкой (например под дорогой), можно определить по формуле Г.И. Черного [305]:

$$k = k_0 \exp\left[\frac{\beta_D(e - e_0)}{e_0(e + 1)}\right], \quad (67)$$

где β_D — коэффициент уплотнения грунта динамической нагрузкой. Для любых глинистых грунтов $\beta_D \approx 19$ [305].

Формулы (65) и (67) дали неплохое совпадение (по нашим расчетам) с независимыми экспериментальными данными В.М. Павилонского [176; 177] для глинистых грунтов, уплотненными соответственно статическими и динамическими нагрузками.

Расчёты по формуле В.Н. Жиленкова (65) показали, что в зоне уплот-

нения под ленточными фундаментами (рис. 14) 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.

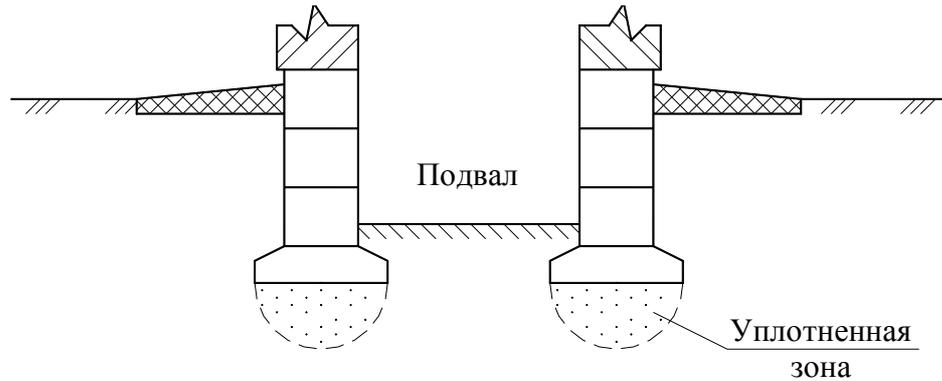


Рис. 14. Уплотнение грунта под ленточными фундаментами

Коэффициент фильтрации уплотнённого песчаного грунта можно определить по теоретической формуле И. Козени [337]:

$$k = k_0[(1+e_0)/(1+e)](e/e_0)^3, \quad (68)$$

или же по эмпирическим формулам: А. Казагранде [105; 278]

$$k = k_0(e/e_0)^2 \quad (69)$$

или К. Терцаги [105]

$$k = k_0 \left(\frac{n-0,13}{n_0-0,13} \right)^2 \left(\frac{1-n_0}{1-n} \right)^{1/3}, \quad (70)$$

где n_0 и n — коэффициенты пористости грунта соответственно в естественном залегании 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 (69).

Проницаемость песчаных грунтов вследствие уплотнения под ленточными фундаментами уменьшается максимум в 1,5-2 раза (см. пример 40 в [262]), что в сравнении с глинистыми грунтами значительно меньше, одна-

ко для вычисления положения УГВ может быть учтено в фильтрационных расчётах.

3.2.2. Определение изменения проницаемости грунта под сплошными фундаментами

В грунте оснований при устройстве фундаментов 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 [351] для определения изменения проницаемости грунта под сплошными фундаментами.

Самым простым случаем является одномерное уплотнение грунта. Оно возможно под центральной частью широких сплошных фундаментов при близком залегании кровли слабосжимаемого грунта (рис. 15) и оговорено в строительных нормах [231, с. 8 и 31]. В таком случае максимальный конечный коэффициент пористости сжимаемого грунта e_k толщиной Z_c под фундаментом можно найти по весьма простой формуле [52; 84; 138; 294]:

$$e_k = e_0 - a_c p_\phi, \quad (71)$$

где e_0 — начальный коэффициент пористости; a_c — коэффициент сжимаемости (уплотнения) грунта; p_ϕ — давление от фундамента, соответствующее начальному поровому давлению p_0 в теории фильтрационной консолидации. Отметим, что рассмотренный случай является предельным, так как соответствует известной схеме [294] 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 (65) или Г.И. Черного (67), соответственно для случая статических или динамических нагрузок, действующих на фундамент.

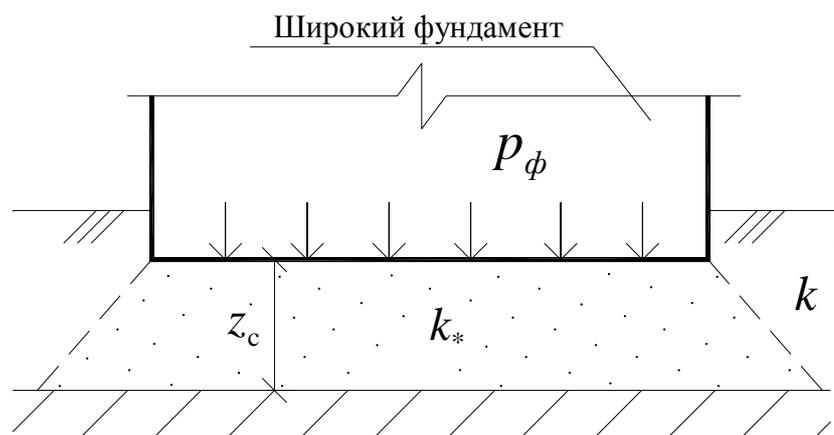


Рис. 15. Уплотнение грунта под широким фундаментом

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. Герсеванов [52], В.А. Флорин [294] 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. 16) можно определить так [52; 294]:

$$p_0 = \frac{P_{\text{нагр}}}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{x_0 + a}{z_0} - \operatorname{arctg} \frac{x_0 - a}{z_0} \right), \quad (72)$$

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.

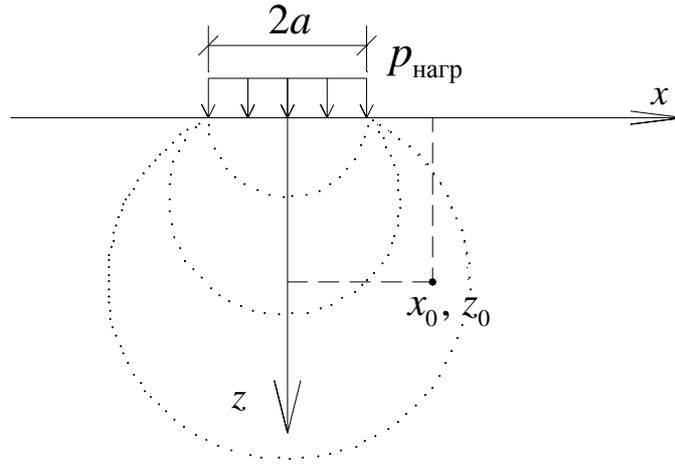


Рис. 16. Уплотнение грунта под ленточным фундаментом или дорогой

Коэффициент фильтрации уплотненного грунта в точке с координатами x_0 и z_0 при найденном по (72) поровом давлении можно найти по формуле (71), 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. 17) можно определить по формуле:

$$p_0 = \frac{p_{\text{нагр}} z_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r \partial r \partial \varphi}{[r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \varphi + z_0^2]^{3/2}}, \quad (73)$$

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 φ — переменные интегрирования.

Начальное поровое давление p_0 в грунтовой воде под прямоугольным в плане фундаментом с помощью интеграла Пуассона [14] для полупространства (рис. 18) можно определить так:

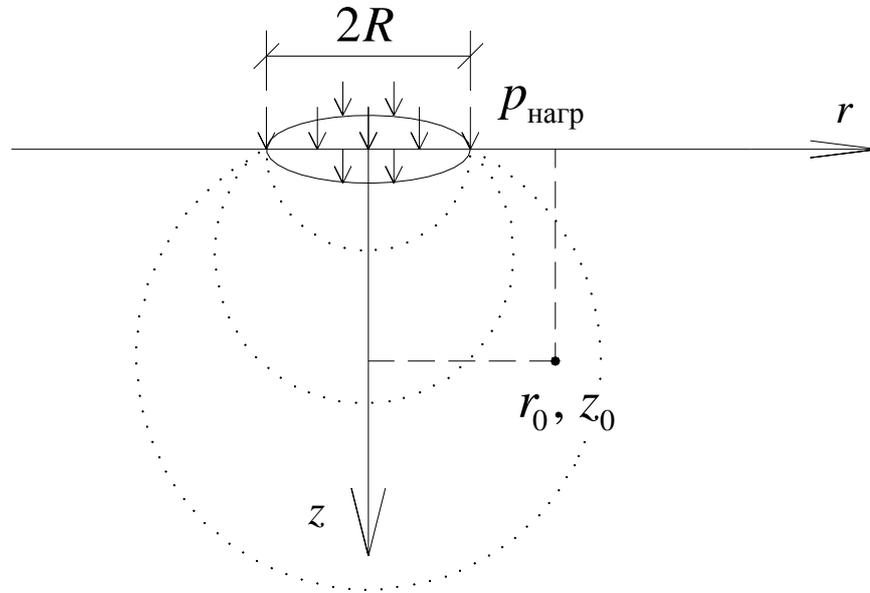


Рис. 17. Уплотнение грунта под круглым в плане фундаментом

$$p_0 = \frac{P_{\text{нагр}} z_0}{2\pi} \int_{-b}^{+b} \int_{-a}^{+a} \frac{\partial x \partial y}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2 \right]^{3/2}}, \quad (74)$$

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.

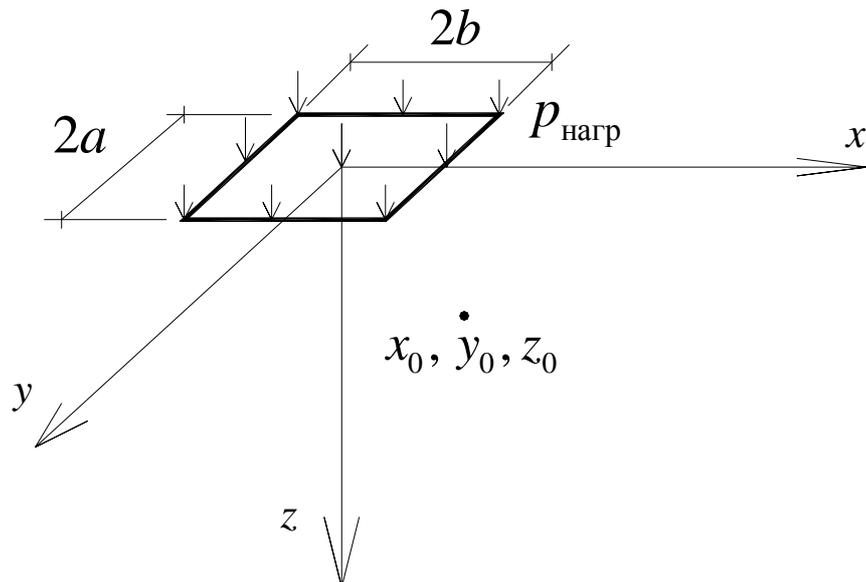


Рис. 18. Уплотнение грунта под прямоугольным в плане фундаментом

Расчет интегралов в формулах (73) и (74) легко реализуется в компьютерной системе MathCAD [220]. Найденные поровые давления p_0 в конкретных точках грунта нужно использовать в формуле (71), принимая в ней вместо $p_{\text{ф}}$ величину p_0 . Таким образом, можно найти коэффициенты пористости и затем для указанных случаев можно определить предельные значения коэффициентов фильтрации уплотненного грунта в основаниях зданий и сооружений, как было сказано выше, по формулам В.Н. Жиленкова (65) или Г.И. Черного (67).

В более сложных случаях грунтовых оснований и конфигураций фундаментов раньше обычно прибегали к определению начального распределения поровых давлений p_0 с помощью метода ЭГДА [293; 294; 295]. Однако в настоящее время начальное распределение p_0 в грунтовой воде под фундаментами можно гораздо проще и точнее найти с помощью метода автора МЭТ (см. п. 5.1). 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.

3.2.3. 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 [259; 260]. Результаты, значительно дополненные, в том числе в [246; 252], 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, используя нашу методику [246].

Речь идет об использовании связи порового давления в грунтовой воде и несущей способности сваи 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 сваи 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, 161].

Несущую способность сваи в период ее «отдыха» после забивки можно выразить в виде

$$P_t = P_0 + \Delta P_t, \quad (75)$$

где P_0 — начальная несущая способность сваи сразу после забивки; ΔP_t — приращение несущей способности в момент времени t после забивки. По

окончании «отдыха» величина ΔP_t увеличивается до некоторого конечного приращения несущей способности сваи ΔP_k , а несущая способность сваи P_t — до полной несущей способности P_n .

При забивке свая оттесняет в стороны грунт и вокруг нее формируется зона максимально уплотненного грунта радиусом [59]

$$r_c = \sqrt{2} R_{бр} \quad (76)$$

где $R_{бр}$ — 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 [277] сопротивление сваи по ее боковой поверхности после забивки можно записать как

$$f_t = (\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r \quad (77)$$

где σ_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); φ_r — угол внутреннего трения грунта; C_r — сцепление грунта.

Приращение сопротивления сваи по боковой поверхности с учетом формулы (77) запишем так:

$$\Delta f_t = [(\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r] - [(\sigma_r - p_0) \operatorname{tg} \varphi_r + C_r] = (\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r, \quad (78)$$

где p_0 — величина избыточного порового давления сразу после забивки сваи в грунте, примыкающем к боковой поверхности сваи.

С учетом (78), вместо (75) получим

$$P_t = P_0 + ul \Delta f_t = P_0 + ul(\sigma_r - p_t) \operatorname{tg} \varphi_r, \quad (79)$$

где u — периметр сваи; l — мощность водонасыщенного слоя грунта,

примыкающего к боковой поверхности сваи (рис. 19).

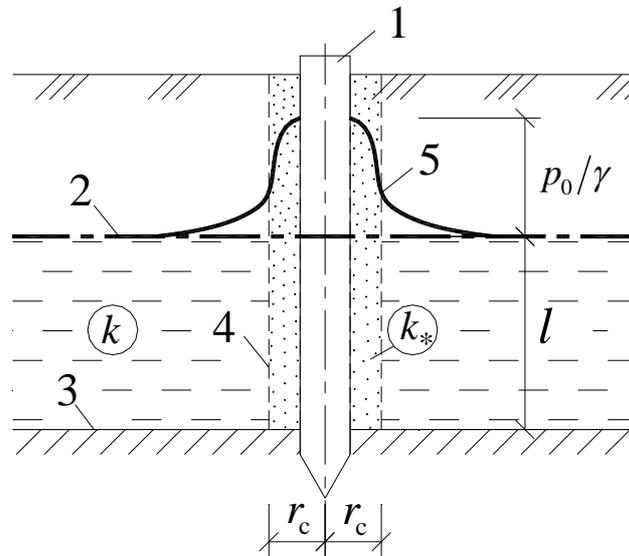


Рис. 19. Повышение порового давления при забивке сваи в водонасыщенный грунт: 1 — свая; 2 — естественный УГВ; 3 — водоупор; 4 — максимально уплотненная зона грунта; 5 — пьезометрическая поверхность избыточных поровых давлений

Наблюдения [161] 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 сваи. Эти обстоятельства позволяют схематизировать начальное распределение избыточных поровых давлений у сваи в виде купола, прямоугольного в разрезе, с пьезометрической высотой p_0/γ (γ — удельный вес воды), в плано-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. 19). 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 при-свайном грунте можно воспользоваться зависимостью для растекания вытянутого в плане купола грунтовых вод в плано-неоднородном пласте [260]. Отождествляя опускание центра купола с уменьшением избыточного

порового давления на боковой поверхности сваи в процессе ее «отдыха», формулу (20) из [260] можно записать для давлений так (с допущением, что коэффициент водоотдачи $\mu \approx \text{const}$):

$$p_t = p_0 \left[1 - \frac{2}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1 + 2n}{\sqrt{\eta\tau}} \right];$$

$$\tau = 4a_y t / L^2; \eta = k_*/k; \alpha = (\sqrt{\eta} - 1) / (\sqrt{\eta} + 1); \quad (80)$$

где a_y — уровнепроводность водоносного пласта; η — относительная проницаемость присвайной зоны; $L = r_c$ — полуширина купола, равная по величине радиусу сваи с максимально уплотненным грунтом.

С учетом (80), формула (79) после преобразований принимает вид

$$P_t = P_0 + n_1 \Delta P_k + \frac{2n_2 \Delta P_k}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1 + 2n}{\sqrt{\eta\tau}}, \quad (81)$$

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

$$P(\tau, \eta) = (P_t - P_0 + n_1 \Delta P_k) / (n_2 \Delta P_k) \quad (82)$$

формула (81) переписывается в виде

$$P(\tau, \eta) = \frac{2}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1 + 2n}{\sqrt{\eta\tau}}. \quad (83)$$

В табл. 3 представлены некоторые значения $P(\tau, \eta)$, вычисленные для разных относительных проницаемостей грунта присвайной зоны η , и на рис. 18 построено семейство кривых зависимости (83).

**Относительное увеличение несущей способности
свай $P(\tau, \eta)$ 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

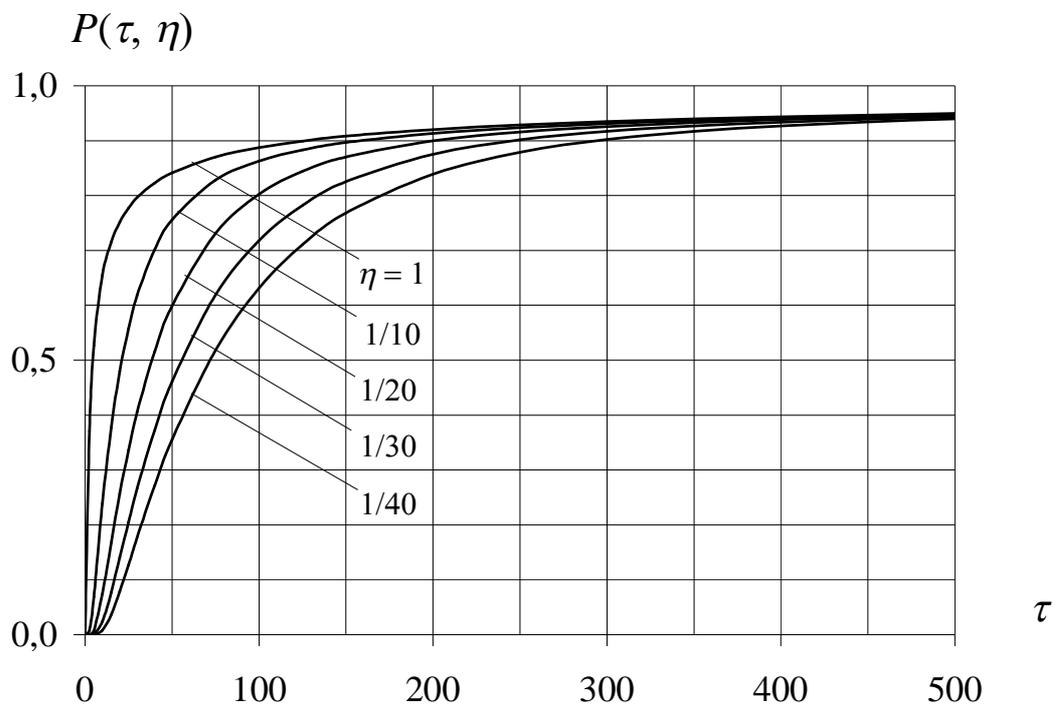


Рис. 20. Зависимость относительной проницаемости
максимально уплотненной присвайной зоны грунта при увеличении
несущей способности свай в водонасыщенных грунтах с течением времени

Пользуясь результатами динамических испытаний свай на несущую способность и графиком на рис. 20, можно приблизительно оценить относительную проницаемость η максимально уплотненной присвайной зоны грунта. Для этого, зная из испытаний P_0 , P_b , ΔP_k , находят $P(\tau, \eta)$ по (82). Далее эта точка наносится на график на рис. 18. При попадании точки в интервал $1 < \eta < 1/40$, значение η определяют интерполяцией. Если точка

выпала ниже кривой $\eta = 1/40$ или на ней, то в соответствии с критерием (7) из [260] при расчетах барражного эффекта 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. 20.

Проанализируем этот процесс изменения проницаемости присвайного глинистого грунта, опираясь на теории упругости и пластичности.

В рамках теории упругости уплотнение грунта забивной сваей было рассмотрено М.И. Горбуновым-Посадовым [59]. 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

$$R_1 = 4R_{\text{ср}}/3. \quad (84)$$

Если бы вытесненный грунт не уплотнился, то он бы занял объем с внешним радиусом по (76), несколько большим R_1 .

Таким образом, вытесненный сваей грунт, перемятый и уплотненный, согласно решению (84), уменьшился в объеме ($R_1 < r_c$). Естественно считать, что это уплотнение идет за счет уменьшения пористости грунта, а это в свою очередь снижает его проницаемость. Автор работы [59] ограничился определением перемещений двух точек вытесняемого грунта. Первая — первоначально расположенная вдоль оси забиваемой сваи. Вторая — в плоскости боковой поверхности сваи. Учитывая факт интенсивного пере-

мятия и сдвига вытесняемого грунта, можно попытаться определить усредненное значение снижения его проницаемости η .

Объемную деформацию грунта в предположении несжимаемости его минеральных частиц можно записать в виде

$$\Theta = 1 - n_*/n, \quad (85)$$

где n — начальная пористость; n_* — пористость уплотненного грунта.

При допущении равномерного уплотнения грунта, вытесненного сваей, отношение n_*/n можно приравнять отношению площадей колец деформированного и недеформированного грунта, окружающего сваю с радиусами по (84) и (76). Тогда в пределах радиуса R_1 объемная деформация грунта

$$\Theta = 1 - \frac{\pi(R_1^2 - R_{\text{бр}}^2)}{\pi(r_c^2 - R_{\text{бр}}^2)} = 0,222. \quad (86)$$

Снижение проницаемости уплотненного грунта η определим для случая водонасыщенных глинистых грунтов. Эмпирическую зависимость для этих грунтов, уплотняющихся при динамических воздействиях получил Г.И. Черный [305]:

$$\eta = \exp(-19\Theta). \quad (87)$$

При $\Theta = 0,222$ имеем по (87) $\eta = 1/68$ (проницаемость снижается в 68 раз). Учитывая наш критерий $\eta = 1/40$ [260], зону радиусом R_1 по (84) можно считать условно водонепроницаемой в задачах, связанных с барражным эффектом свайных фундаментов. К такому выводу приходим, используя решение М.И. Горбунова-Посадова [59] об уплотнении грунта в рамках теории упругости. Но в [59] было отмечено, что вытесняемый сваей грунт испытывает и пластические деформации.

Обратимся теперь к теории пластичности и в ее рамках оценим рассматриваемое явление. Поскольку мы разбираем плоскую осесимметричную задачу, то в допущениях теории пластичности аналогичным процессом является расширение кругового отверстия в бесконечной пластинке.

Воспользуемся решением В.В. Соколовского [238], применив его для свай в грунте.

Согласно этому решению, радиус уплотненной зоны грунта

$$R_{\pi} = 2,07R_{\text{бр}} \approx 2R_{\text{бр}}. \quad (88)$$

В этой зоне в решении для пластинки [238] 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 [238]. 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

$$h_0/h = n_*/n. \quad (89)$$

Используя зависимость (87) Г.И. Черного [305] и данные табл. 1 из книги В.В. Соколовского [238, с. 521], составим табл. 4, в которой r — радиус в полярной системе координат.

Таблица 4

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
Θ	0,723	0,387	0,288	0,241	0,186	0,133	0,055	0
η	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. 4 можно заметить резкое уменьшение проницаемости по направле-

нию к свае.

Таким образом, наши результаты [252] анализа изменения проницаемости присвайного глинистого грунта в рамках обеих теорий (упругости и пластичности) показали, что проницаемость грунта в пределах радиуса r_c по (76) 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, то есть изменение проницаемости происходит вследствие внедрения свай в грунт.

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 [259; 260].

В плане сваи размещают в виде свайных рядов, кустов и сплошных свайных полей (рис. 21 а, б, в соответственно).

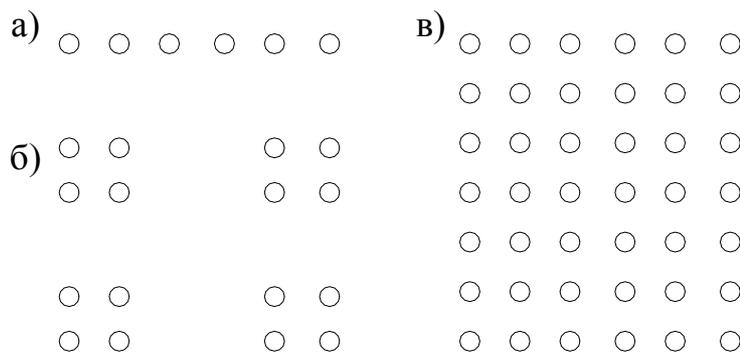


Рис. 21. Схемы расположения свай в плане

Из всего числа применяемых в России свай 90-95 % приходится на забивные железобетонные сваи квадратного сечения [172]. 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. 22) в зоне радиусом r_c , который можно найти по формуле (76).

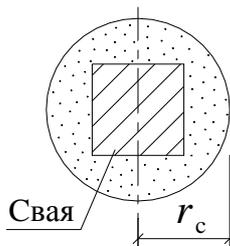


Рис. 22. Свая с зоной максимально уплотненного грунта

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 [252].

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. 23), 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 [259; 260]:

$$k_{yz} = k \left(1 + \frac{a}{\pi r_c} \operatorname{sh}^2 \frac{\pi r_c}{a} \right)^{-1}, \quad (90)$$

где a — шаг свай в ряду (см. рис. 23); k — коэффициент фильтрации грунта в естественном залегании; r_c — по формуле (76).

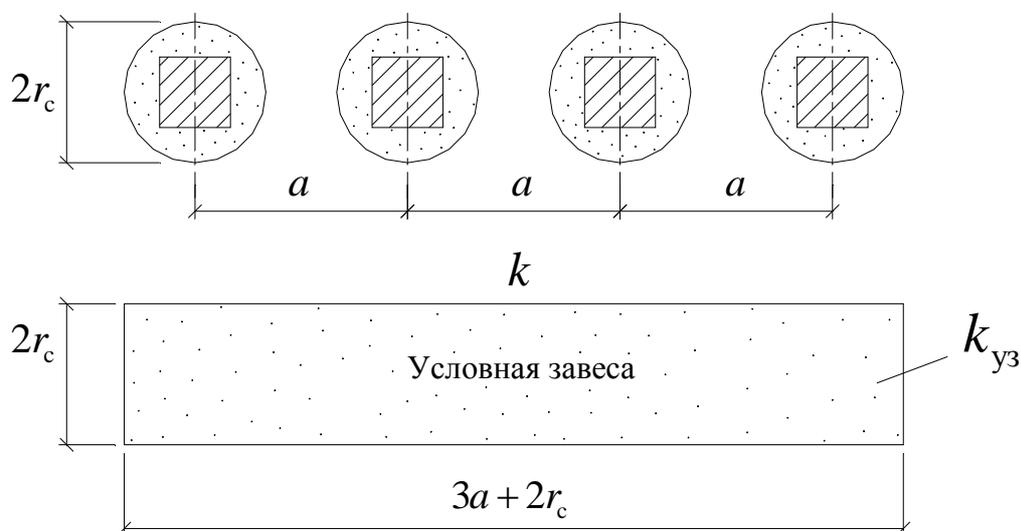


Рис. 23. К определению коэффициента фильтрации условной завесы $k_{уз}$ в глинистом грунте

В песчаных грунтах (рис. 24) 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 [259; 260]:

$$n = (n_0 - N_c F_c / F) / (1 - N_c F_c / F), \quad (91)$$

где N_c — число свай в ряду; F_c — площадь поперечного сечения сваи; F — площадь полосы уплотнения грунта шириной a (см. рис. 24).

Коэффициент фильтрации уплотнённого песчаного грунта k_y в полосе шириной a (см. рис. 24) можно определить по формуле И. Козени (68), А. Казагранде (69) или К. Терцаги (70) по значениям пористостей n_0 и найденной n .

Кроме того, свайный ряд в песчаных грунтах нужно заменить условной завесой (см. рис. 24) с уменьшенным коэффициентом фильтрации $k_{уз}$, учитывающим обтекание свай квадратного сечения [259; 260]:

$$k_{уз} = k_y \left[(1 - d/a)^{-1} - \frac{2a}{\pi d} \ln \sin \frac{\pi}{2} (1 - d/a) \right]^{-1}, \quad (92)$$

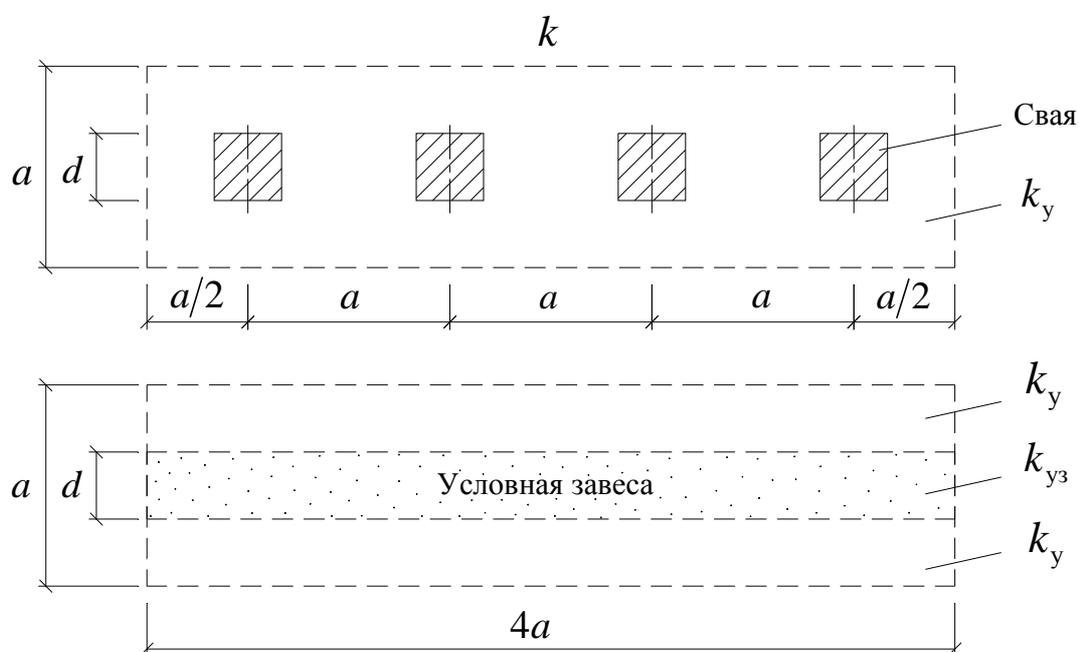


Рис. 24. К определению коэффициентов фильтрации условной завесы k_y и $k_{yз}$ в песчаном грунте

где d — размер поперечного сечения сваи (см. рис. 24).

Таким образом, сваи в глинистых и песчаных грунтах можно свести к условным завесам с некоторыми коэффициентами фильтрации $k_{yз}$ и k_y , меньшими естественного k . Затем провести расчёт с такой завесой или далее осреднить проницаемости, например найти коэффициент фильтрации всего свайного поля (см. рис. 21). При этом не следует забывать, что чем больше мы осредняем (схематизируем) свойства объекта, тем существеннее огрубляем расчёт УГВ. Моделирование требует меньшей схематизации.

Все зависимости, приведенные в данном пункте, 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, что рассмотрено далее. Учет этого актуален при реконструкции подтопленной застройки.

3.2.4. Определение изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий

Дополнительно к уплотнению присвайного грунта в процессе строительства (по причине забивки сваи) 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. 25 [278].

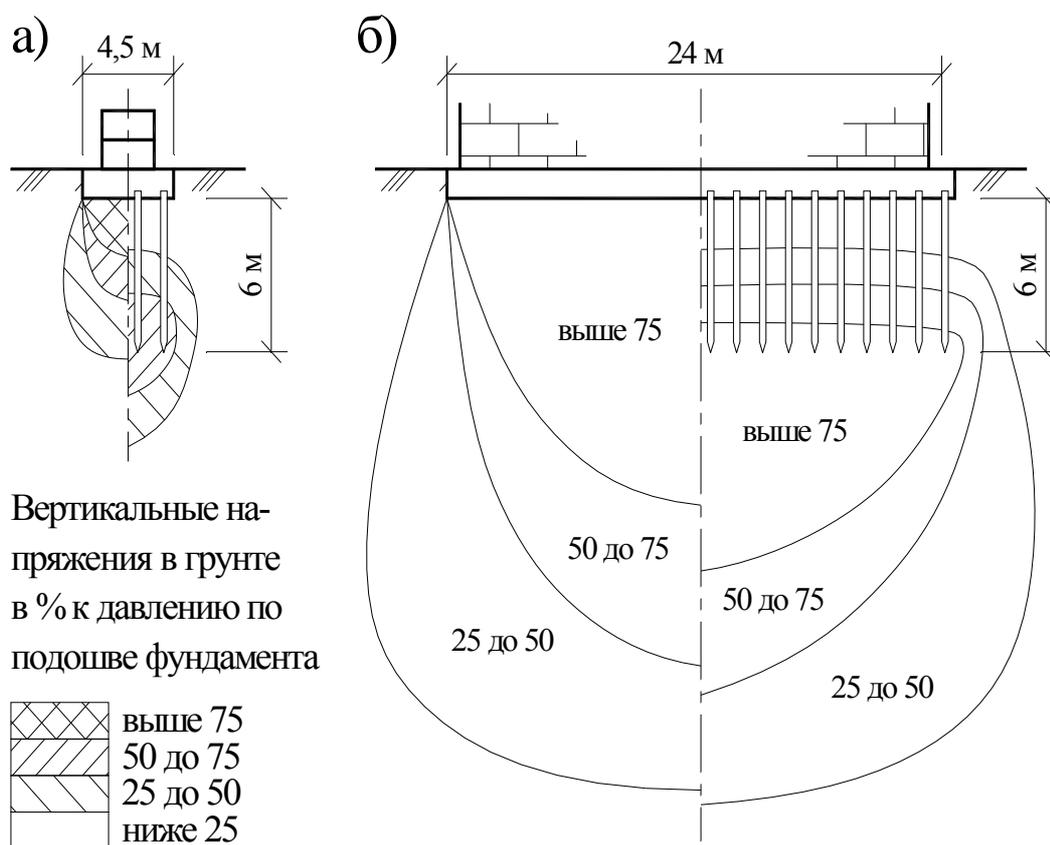


Рис. 25. Вертикальное давление в грунте под фундаментами на висячих сваях по К. Терцаги [278]: а — при небольшой ширине фундамента по сравнению с длиной сваи; б — при большой ширине фундамента

Распределение вертикальных напряжений под фундаментами, изображенное на рис. 25а,б, свидетельствует о том, что следует ожидать уплотнение грунта, которое уменьшит его проницаемость. Отметим, что в п. 6.1 СНиПа «Свайные фундаменты» [232], 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 [278]. 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...» [278]. По данным Терцаги, такой прием хорошо подтвердился на практике, особенно для широких свайных полей (см. рис. 25б). 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 давления) [277], 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. 25) для прямоугольного или круглого в плане свайного поля.

Таким образом, для определения изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий можно использовать формулы (72)–(74). Более сложные случаи неоднородных грунтов под зданиями, для сложной плановой конфигурации зданий и т.д. следует моделировать.

3.3. Прогнозы подтопления в городском строительстве

Основные разновидности прогнозов подтопления перечислены в п. 3.1. 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 [79]. Он выражается в отдельном 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; 48; 315], средняя мощность — 10 % длины области фильтрации по горизонтали [152; 204] и др.

Уровень грунтовых вод (УГВ) в некоторых случаях может почти равномерно подниматься на территории застройки под влиянием дополнительной инфильтрации влаги в грунт вследствие нарушения при строительстве естественного водного баланса грунтов [204].

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 [196].

Величина дополнительной инфильтрации влаги ω , поступающей на поверхность УГВ, надежно может быть определена на основе режимных наблюдений на территории застройки путем последующего решения обратных задач [204] или имитационного моделирования фильтрации. Методика определения ω аналитическим способом приведена в [204]. Имитационное моделирование по определению ω может быть проведено с помощью МКР-Excel (МЭТ). Отметим, что И.С. Пашковский [315] для орошаемых территорий разработал методику определения ω с помощью геофильтрационных моделей системы «зона аэрации — грунтовые воды», а развил ее С.П. Поздняков со стохастическими моделями фильтрации [192].

В случае отсутствия режимных наблюдений величину ω можно определить методом аналогий. Обобщение многочисленных опубликованных натуральных обследований показало, что на городских территориях величина ω обычно находится в пределах от 10^{-2} до 10^{-5} м/сут [204].

3.3.1. Прогнозы верховодки

Урбанизация территорий приводит к изменению геологической среды. Возникают новые техногенные напластования, и происходят специфические инженерно-гидрогеологические процессы.

Исследуем процесс подтопления при образовании куполов верховодки на вытянутых геологических или техногенных линзах. Рассмотрим прогноз верховодки аналитическим методом.

А.Ж. Муфтахов в 1984 г. и вслед за ним Н.П. Куранов [115] 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. [254] более точные. После гидромеханического моделирования верховодки по методу автора выяснилось, что решение можно улучшить.

На рис. 26 показана расчётная схема образования купола техногенной верховодки на вытянутой линзе вследствие действия инфильтрации влаги интенсивностью ω (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. 26 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 (см. рис. 26), 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 технологии автора МЭТ (см. гл. 4 и 5). Линии равных напоров изображены на рис. 26 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:

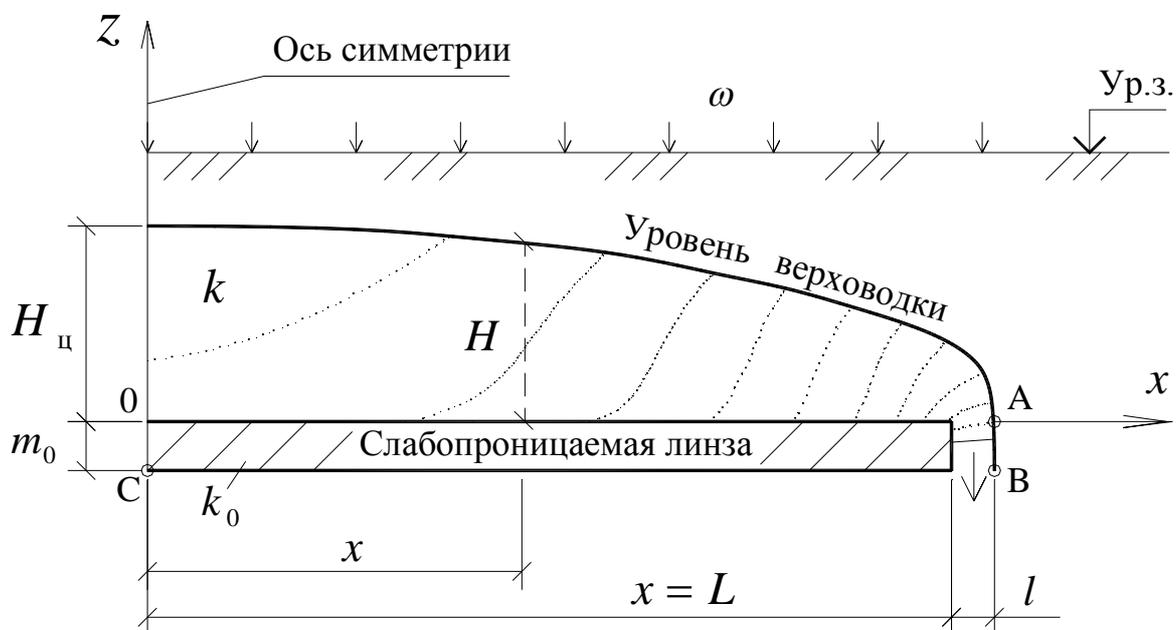


Рис. 26. К прогнозу техногенной верховодки под влиянием технологии гидронамыва (пунктиром показаны линии равных напоров, полученные на двухмерной гидромеханической модели верховодки со свободной поверхностью по методу автора МЭТ)

$$k_0 < \omega < k. \quad (93)$$

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. 26. В качестве исходных предпосылок фильтрации принимаем выполнимость закона Дарси и гипотезу Буссинеска [329] о зависимости мощности (напора) H верховодки лишь от горизонтальной координаты x (см. рис. 26). В отличие от работы [115], граничное условие на краю линзы поставим с учетом гидромеханических исследований Н.Н. Павловского [182], предпринятых в 1933 г. Так же, как Н.П. Куранов [115] и С.А. Пильдыш [188], считаем, что грунт линзы водонасыщен в любом случае, даже если сверху нет питания и нет слоя верхо-

водки. В таком случае перетекание через линзу будет происходить лишь под влиянием напора (разностей напоров) H (см. рис. 24). 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. 26) 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 [147, с. 159] и И.С. Пашковского [315, с. 155]. Этот факт был проверен нами моделированием в МКР-Excel (метод автора МЭТ).

Уравнение баланса в дифференциальной форме для верховодки на слабопроницаемой линзе при наличии инфильтрационного питания интенсивностью ω запишем в виде

$$kH \frac{dH}{dx} + \omega dx - \frac{k_0}{m_0} H dx = 0, \quad (94)$$

причем в 1-м члене уравнения (94) учтен баланс входящей и выходящей по горизонтали влаги через сечение на расстоянии x от оси Z (см. рис. 26).

Продифференцируем (94) по x и получим исходное нелинейное уравнение Буссинеска фильтрации влаги (частный случай):

$$\frac{d}{dx} \left(H \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\omega}{k} - \frac{k_0}{km_0} H = 0. \quad (95)$$

Линеаризуем (95) по II способу Н.А. Багрова и Н.Н. Веригина, применив подстановку:

$$U = H^2. \quad (96)$$

Тогда (95) изменится до вида

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{2k_0}{km_0 h_c} \left(\frac{\omega m_0 h_c}{k_0} - U \right) = 0, \quad (97)$$

где h_c — средняя мощность верховодки, которую определим позднее.

Физический смысл h_c заключается в следующем. Часть 3-го члена уравнения (95) $k_0 H/m_0$ 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. 26. Но мы ищем гидравлическое решение, поэтому, обозначив $H=U/h_c$, с учетом подстановки (96) получается уравнение (97).

Введем обозначения:

$$\lambda^2 = 2k_0 / (km_0 h_c); \quad (98)$$

$$y = \omega m_0 h_c / k_0 - U. \quad (99)$$

Тогда (97), после несложных выкладок с еще одной заменой переменной, переписется проще:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \lambda^2 y = 0.$$

Решение последнего уравнения в общем виде хорошо известно [88, с. 365]:

$$y = C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) + C_2 \operatorname{sh}(\lambda x),$$

откуда с учетом (99) получим решение в общем виде:

$$U = \omega m_0 h_c / k_0 - C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) - C_2 \operatorname{sh}(\lambda x), \quad (100)$$

где C_1 и C_2 — константы интегрирования, которые можно определить из граничных условий задачи.

Зададим граничные условия. При $x=0$ (см. рис. 26) градиент напора по горизонтали равен нулю, здесь ставим граничное условие II рода:

$$dH(0)/dx = 0 \text{ и } dU(0)/dx = 0. \quad (101)$$

Другое граничное условие поставим на краю линзы, где кривая депрессии (уровень верховодки) огибает край линзы с образованием зоны стока

шириной l (см. рис. 26). Очевиден факт, что свободная поверхность верховодки в зоне стока так же, как и над линзой, улавливает инфильтрационный дождь интенсивностью ω , падающий сверху. Эта задача с инфильтрацией в гидромеханической постановке (двухмерной в разрезе) не решена никем. Близкую задачу о притоке воды к горизонтальным фильтрам рассматривал Н.Н. Павловский в 1933 г. [182]. А.Ж. Муфтахов (1984 г.) и Н.П. Куранов [115] использовали приближенную аналогию между стоком верховодки с края линзы и фильтрацией через дамбу обвалования в сухой грунт. Поставим граничное условие I рода — нулевой напор — там, где кривая депрессии (уровень верховодки) пересекает ось x в точке А (см. рис. 26):

$$x = L + l, \quad H = 0, \quad U = 0. \quad (102)$$

Продифференцируем (100) по x и получим

$$dU/dx = -\lambda C_1 \operatorname{sh}(\lambda x) - \lambda C_2 \operatorname{ch}(\lambda x). \quad (103)$$

Из (100) и (103) с помощью граничных условий (101) и (102) найдем константы C_1 и C_2 , которые подставим в (100). Затем, с учетом обратной подстановки (96), получим решение для напоров (уровней) верховодки на слабопроницаемой вытянутой в плане линзе для любого $0 \leq x \leq L+l$ в виде

$$H(x) = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[1 - \frac{\operatorname{ch}(\lambda x)}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right] \right\}^{1/2}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0 h_c}}. \quad (104)$$

В частном случае при $x = 0$ в центре линзы (см. рис. 26) напор

$$H_{\text{ц}} = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right] \right\}^{1/2}. \quad (105)$$

Величину средней мощности верховодки h_c определим как среднеинтегральное значение напора H на длине $L+l$:

$$h_c = \frac{1}{L+l} \int_0^{L+l} H dx, \quad (106)$$

где H — напор по (104). Таким образом, для нахождения h_c в (106) под знак интеграла надо подставить выражение (104) и проинтегрировать численно. Это легко реализуется в известном компьютерном пакете MathCAD с помощью функций Given ... Find [220]. Значение h_c находится посредством рекурсии (вычисляя величину через саму себя).

Таким образом, формула (104) 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. 26) 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 двумерного моделирования со свободной поверхностью, реализованного с помощью МКР-Excel (МЭТ). При этом получается незначительное занижение уровня, не более 5 %.

Общий расход воды, стекающей и просачивающейся через вытянутую линзу, можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{общ}} = 2\omega (L + l). \quad (107)$$

Расход воды, просачивающейся через вытянутую линзу:

$$Q_{\text{л}} = 2k_0 h_c L / m_0. \quad (108)$$

Коэффициент стока верховодки с края вытянутой линзы

$$\alpha_{\text{ст}} = (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{л}}) / Q_{\text{общ}}. \quad (109)$$

Ширина зоны стока с края вытянутой линзы (см. рис. 24):

$$l = \alpha_{\text{ст}} \omega (L + l) / k. \quad (110)$$

Формулу (110) для зоны стока можно выразить по-другому:

$$l = \alpha_{\text{ст}} \omega L / (k - \alpha_{\text{ст}} \omega). \quad (111)$$

Расчет по формулам (107)–(111) надо производить последовательными приближениями. Автоматизировать расчет можно в таблицах Microsoft Excel с помощью функции ЕСЛИ(), задавая начальное приближение и за-

пустив циклические итерации через меню

СЕРВИС / ПАРАМЕТРЫ... / ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Решение для напоров (уровней) верховодки на абсолютно водоупорной вытянутой линзе можно получить из нелинейного уравнения (95), так как в нем исчезает последний член при $k_0 = 0$. Исходное дифференциальное уравнение в этом случае выглядит как

$$\frac{d}{dx} \left(H \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\omega}{k} = 0. \quad (112)$$

Проинтегрируем (112) и получим выражение

$$H \frac{dH}{dx} = -\frac{\omega}{k} x + C_1,$$

которое тоже проинтегрируем. Тогда получим:

$$\frac{H^2}{2} = -\frac{\omega x^2}{2k} + C_1 x + C_2. \quad (113)$$

Найдем в последних двух выражениях константы интегрирования C_1 и C_2 , используя граничные условия (101) и (102). Подставив эти константы в (113), получим формулу для напоров (уровней) верховодки на абсолютно водоупорной вытянутой линзе в виде

$$H = \sqrt{\frac{\omega}{k} \left[(L+l)^2 - x^2 \right]}, \quad (114)$$

а в частном случае при $x = 0$ в центре линзы (см. рис. 24) напор

$$H_{\text{ц}} = (L+l) \sqrt{\omega/k}, \quad (115)$$

где ширина зоны стока с линзы

$$l = \omega L / (k - \omega). \quad (116)$$

Подставив (116) в (115), получим

$$H_{\text{ц}} = L \left[1 + \frac{\omega}{(k - \omega)} \right] \sqrt{\omega/k}. \quad (117)$$

Проверим, переходит ли формула (105) в (115) при $k_0 \rightarrow 0$. Для этого к (105) применим правило Лопиталья [189, с. 136], записав так:

$$\lim_{k_0 \rightarrow 0} \left\{ \frac{\omega m_0 h_c \{ \operatorname{ch} [\lambda (L+l)] - 1 \}}{k_0 \operatorname{ch} [\lambda (L+l)]} \right\}^{1/2}.$$

Дифференцируя числитель и знаменатель в последнем выражении, получаем в пределе формулу (115), что и требовалось доказать.

Проделана независимая проверка полученных аналитических зависимостей для верховодки на вытянутых линзах с помощью компьютерного моделирования расчётной схемы верховодки (см. рис. 26) методом конечных разностей (МКР). Моделирование проведено по нашей методике [258] с помощью пакета Microsoft Excel. Результаты проверки в [262] (пример 43) показали погрешность (104)–(117) менее 5 %.

Отметим, что ранее Н.П. Куранов [115] в рамках гипотезы Буссинеска с линеаризацией по II способу получил аналогичные зависимости для прогноза верховодки, которые мы проанализировали в [254] и обнаружили погрешность до 26 %. Наши решения (104)–(117) точнее и рекомендуются 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 [204].

Найдём зависимости для прогноза максимального уровня верховодки при установившейся фильтрации на круглой в плане линзе. Типовая расчётная схема изображена на рис. 27.

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

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(H \frac{dH}{dr} \right) + \frac{\omega}{k} - \frac{k_0}{k m_0} H = 0, \quad (118)$$

где r — радиальная координата (см. рис. 27); остальные обозначения прежние, как для верховодки на вытянутой линзе.

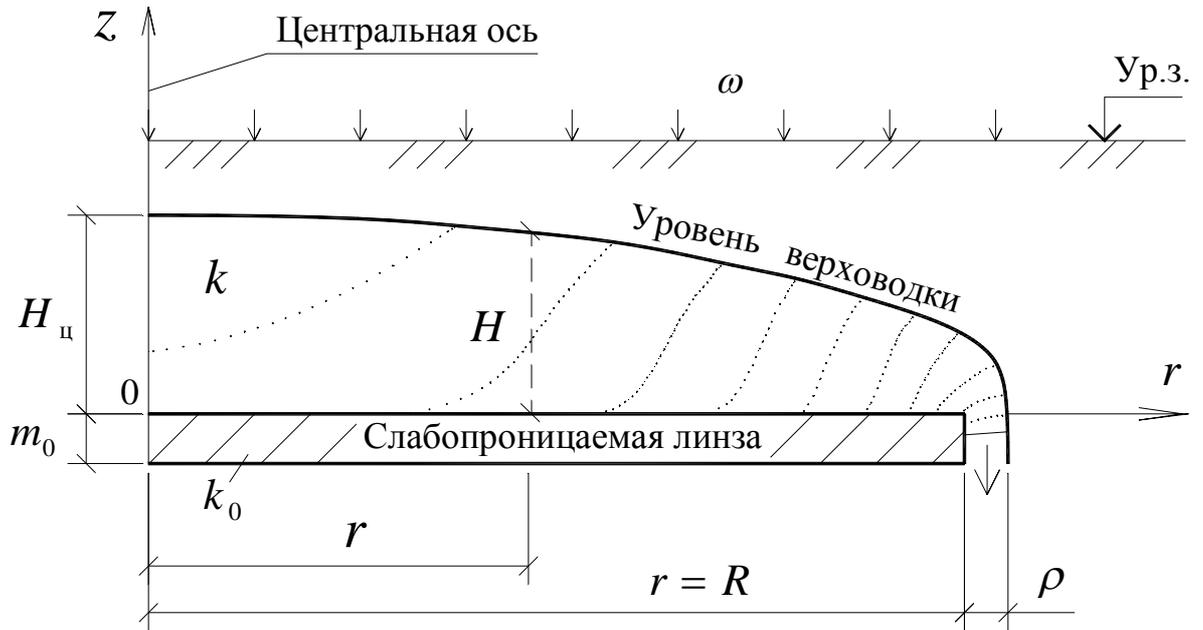


Рис. 27. Схема верховодки на слабопроницаемой круглой в плане линзе

Граничные условия:

$$r = 0, \quad dH/dr = 0; \quad (119)$$

$$r = R + \rho, \quad H = 0, \quad (120)$$

где R — радиус линзы; ρ — зона стока с краев линзы (см. рис. 27).

Решаем (118) при условиях (119) и (120). В результате получим выражение для напоров (уровней) верховодки на слабопроницаемой круглой в плане линзе для любого $0 \leq r \leq R + \rho$ в виде

$$H(r) = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0[\lambda(R + \rho)]} \right] \right\}^{1/2}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{k m_0 h_c}}, \quad (121)$$

где $I_0(z)$ — цилиндрическая модифицированная функция Бесселя от мнимого аргумента нулевого порядка 1-го рода [226; 273; 324].

В частном случае при $r = 0$ напор в центре линзы

$$H_{\text{ц}} = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[1 - \frac{1}{I_0[\lambda(R + \rho)]} \right] \right\}^{1/2}. \quad (122)$$

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 (121). Окончательно

$$h_c = \frac{2}{(R + \rho)^2} \int_0^{R+\rho} r H dr. \quad (123)$$

Последняя формула легко рассчитывается в математическом пакете MathCAD [220] с помощью функций Given...Find («Дано...Найти»).

Общий расход воды, стекающей и просачивающейся через круглую в плане линзу, можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{общ}} = \pi \omega (R + \rho)^2. \quad (124)$$

Расход воды, просачивающейся через круглую линзу:

$$Q_{\text{л}} = \pi k_0 h_c R^2 / m_0. \quad (125)$$

Коэффициент стока с края линзы можно определить по формуле (109), принимая в ней $Q_{\text{общ}}$ и $Q_{\text{л}}$ соответственно по (124) и (125).

Ширина зоны стока с края круглой линзы (см. рис. 27):

$$\rho = \left[R^2 + (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{л}}) / (\pi k) \right]^{1/2} - R \quad (126)$$

или с учетом (124) в виде

$$\rho = \left[R^2 + \alpha_{\text{ст}} \omega (R + \rho)^2 / k \right]^{1/2} - R. \quad (127)$$

Расчет величины ρ проводят последовательными приближениями.

Напоры (уровни) верховодки на абсолютно водоупорной круглой в плане линзе выражаются как частный случай формулы (121) при $k_0 = 0$ в виде

$$H(r) = \left\{ \frac{\omega}{2k} \left[(R + \rho)^2 - r^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (128)$$

Напор в центре круглой линзы при $r = 0$:

$$H_{\text{ц}} = (R + \rho) \sqrt{\frac{\omega}{2k}}. \quad (129)$$

Зона стока с круглой линзы

$$\rho = \left[R^2 + \omega (R + \rho)^2 / k \right]^{1/2} - R. \quad (130)$$

Проверка формул для верховодки на круглой линзе приведена в [262] (пример 44). Их погрешность оказалась менее 5 %.

Методика прогноза верховодки на абсолютно водоупорных вытянутых и круглых в плане линзах, разработанная А.Ж. Муфтаховым, изложена в [204]. 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 целесообразнее моделировать с помощью МКР-Excel (МЭТ) — см. главы 4 и 5.

3.3.2. 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) — это явление называют подпором [45].

Найдем с помощью метода АДЧМ (см. п. 2.3 главы 2) радиус языка подтопления $R_{\text{яз}}$, то есть получим точное решение задачи, аналогичной предыдущей, при нелинейной радиальной одномерной фильтрации воды со свободной поверхностью (рис. 28). Такие задачи актуальны для прогно-

за 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. 28) в виде

$$R_{\text{яз}} = r_0 + C_R \sqrt{2kH_0 t / \mu}, \quad (131)$$

где C_R — коэффициент, который определим с помощью показанного комбинированного метода; остальные обозначения прежние.

Исходное нелинейное гидравлическое дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при радиальном в плане движении воды (см. рис. 28) в частных производных имеет вид

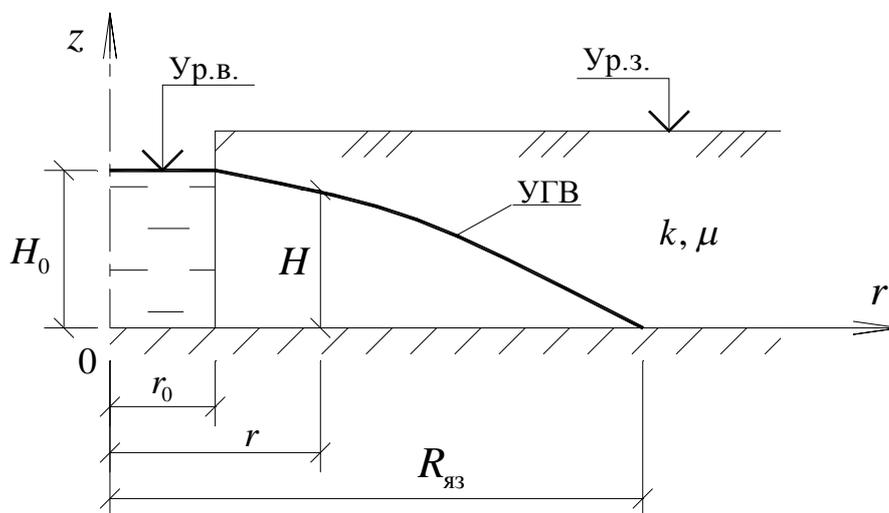


Рис. 28. Язык подтопления (радиальная в плане фильтрация)

$$\frac{k}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rH \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (132)$$

где r — горизонтальная радиальная координата; остальные обозначения прежние.

Для получения автомодельного решения применим безразмерные подстановки: (60) и

$$\eta = \frac{r}{\sqrt{2kH_0 t / \mu}}. \quad (133)$$

Тогда из (132) 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. 29):

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta\eta)^2} + \frac{U_{i+1}^2 - U_{i-1}^2}{2\eta_i \Delta\eta} + \frac{2\eta_i (U_{i+1} - U_{i-1})}{2\Delta\eta} = 0.$$

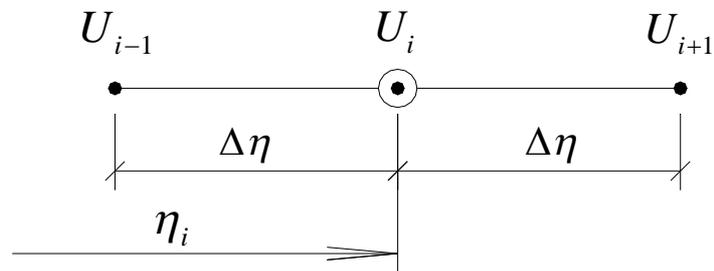


Рис. 29. Безразмерная МКР-сетка в радиальных координатах

Из последнего уравнения получим формулу автомодельного безразмерного моделирования в МКР-Excel в виде

$$U_i = \left[\left((U_{i+1}^2 + U_{i-1}^2) / 2 + \eta_i \Delta\eta (U_{i+1} - U_{i-1}) / 2 + \Delta\eta (U_{i+1}^2 - U_{i-1}^2) / (4\eta_i) \right)^{1/2} \right]. \quad (134)$$

В процессе моделирования по формуле (134) обнаружено, что в радиальной задаче коэффициент C_R не является величиной постоянной, а зависит от продолжительности процесса подтопления. Замечено, что с течением времени 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)

$$\tau = at/r_0^2; a = kH_0/\mu. \quad (135)$$

Безразмерные пространственные координаты

$$\bar{r} = r/r_0; \bar{R}_{яз} = R_{яз}/r_0. \quad (136)$$

Тогда из (131) можно выразить

$$C_R \sqrt{2} = (\bar{R}_{яз} - 1)/\sqrt{\tau}. \quad (137)$$

Численным моделированием с помощью МКР-Excel на основе формул (134) и (137) получена табл. 5.

Данные этой таблицы обработаны с помощью средства «Мастер диаграмм» Microsoft Excel. В результате найдена эмпирическая формула

Таблица 5

τ	$\bar{R}_{яз}$	$C_R \sqrt{2}$	τ	$\bar{R}_{яз}$	$C_R \sqrt{2}$
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

$$C_R \sqrt{2} = 1,5114 - 0,0461 \ln \tau, \quad (138)$$

обладающая высоким коэффициентом корреляции 0,9997.

На основе (131) и (138) получено точное решение для радиуса круглого в плане языка подтопления

$$R_{яз} = r_0 [1 + (1,5114 - 0,0461 \ln \tau) \sqrt{\tau}]; \quad \tau = kH_0 t / (\mu r_0^2). \quad (139)$$

Кривые депрессии УГВ при растекании языков подтопления в первоначально необводненных грунтах удобнее и проще моделировать с помощью МКР-Excel (МЭТ), так как данный процесс подтопления нелинейный.

Ситуация с математическим описанием физически реального языка подтопления резко меняется при наличии на водоупоре грунтовых вод малой мощности H_e (рис. 30).

В этом случае условие Н.Н. Веригина [41] на фронте языка подтопления при подпертой фильтрации не соблюдается и градиент напора по горизонтали стремится к нулю. Расчет подпертой фильтрации при малой мощности грунтовых вод актуален, например, при прогнозах подтопления от затопленных вытянутых выемок, траншей, водонесущих коммуникаций.

Методики таких прогнозов отсутствуют. Применяя так называемый метод интегрального баланса [23], получим несколько приближенных решений нелинейной одномерной фильтрации со свободной поверхностью для случая постоянного напора H_0 в источнике подтопления (см. рис. 30).

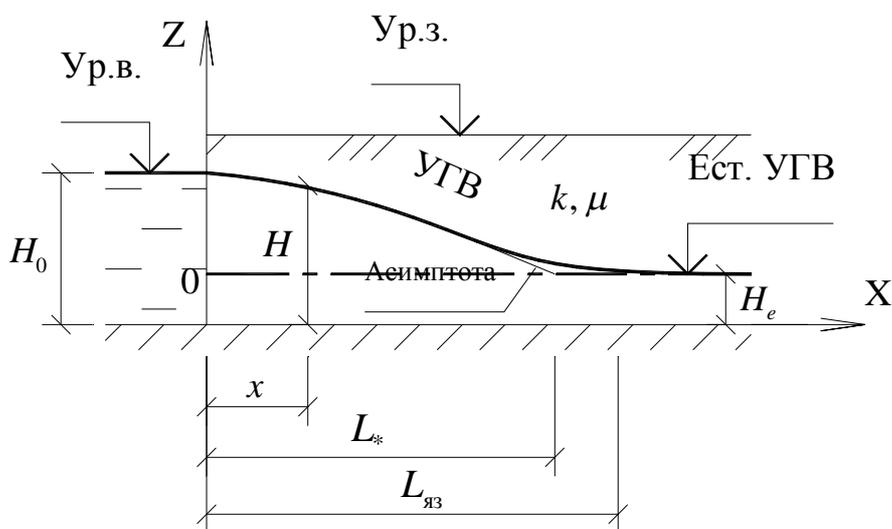


Рис. 30. Плоский язык подтопления на маломощных грунтовых водах

Рассмотрим случай вытянутого в плане источника подтопления. Исходное нелинейное дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации языка подтопления при плоскопараллельном движении воды и наличии маломощных грунтовых вод (см. рис. 30) аналогично (56) и имеет вид

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (140)$$

Граничные условия на фронте языка при $x = L_{\text{яз}}$ можно записать так:

$$H(L_{\text{яз}}, t) = H_e; \quad (141)$$

$$\frac{\partial H(L_{\text{яз}}, t)}{\partial x} = 0, \quad (142)$$

где $L_{\text{яз}}$ — действительная длина языка подтопления в первом приближении (см. рис. 30).

Граничное условие I рода слева при $x = 0$ на контакте грунта с источником подтопления

$$H(0, t) = H_0. \quad (143)$$

Начальное условие

$$H(x, 0) = H_e. \quad (144)$$

Умножим (140) на ∂x и проинтегрируем от 0 до L_t . Тогда получим

$$\frac{\partial}{\partial t} [\Theta - H_e L_{\text{яз}}] = \frac{k}{\mu} \left[H(L_{\text{яз}}, t) \frac{\partial H(L_{\text{яз}}, t)}{\partial x} - H(0, t) \frac{\partial H(0, t)}{\partial x} \right], \quad (145)$$

где

$$\Theta = \int_0^{L_t} H(x, t) dx.$$

Решение ищем в виде многочлена

$$H(x, t) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (146)$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты, зависящие от времени.

Подставим (146) в граничные условия (141)–(143):

$$a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0^2 = H_0;$$

$$a_0 + a_1 L_{\text{яз}} + a_2 L_{\text{яз}}^2 = H_e;$$

$$a_1 + 2a_2 L_{\text{яз}} = 0,$$

откуда найдем коэффициенты

$$a_0 = H_0; a_1 = -2(H_0 - H_e)/L_{\text{яз}}; a_2 = (H_0 - H_e)/L_{\text{яз}}^2,$$

затем решение (146) перепишем в виде

$$H(x, t) = H_0 - 2(H_0 - H_e)x/L_{\text{яз}} + (H_0 - H_e)(x/L_{\text{яз}})^2. \quad (147)$$

Используем (147) в (145), откуда получим формулу для определения действительной длины языка подтопления:

$$L_{\text{яз}} = \left\{ 6kH_0^2 t / \left[\mu (H_0 - 3H_e) \right] \right\}^{1/2}, \quad (148)$$

которую (по данным нелинейного моделирования с помощью МКР-Excel) следует применять при соблюдении условия:

$$H_e / H_0 \leq 0,3. \quad (149)$$

Вблизи фронта языка кривую подпора УГВ можно аппроксимировать асимптотой (см. рис. 30). Найдем приведенную зону подпора там, где асимптота пересекается с естественным УГВ. Величину H_e в (147) считаем достаточно малой и отбросим ее. Тогда запишем (147) приближенно так:

$$H(x, t) \approx H_0 \left[1 - 2x/L_{\text{яз}} + (x/L_{\text{яз}})^2 \right].$$

Подставим сюда $H(x, t) = H_e$ и $x = L_*$, откуда найдем приведенную зону подпора в виде

$$L_* = L_{\text{яз}} \left(1 - \sqrt{H_e / H_0} \right). \quad (150)$$

Заменяем в (147) $L_{\text{яз}}$ на L_* . Тогда кривую подпора при $0 \leq x \leq L_*$ можно рассчитать по формуле:

$$H(x, t) = H_0 - 2(H_0 - H_e)x/L_* + (H_0 - H_e)(x/L_*)^2. \quad (151)$$

Если условие (149) 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 [147] 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. 31). 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. 31) аналогично (132) и имеет вид

$$\frac{k}{\mu r} \frac{\partial}{\partial x} \left(rH \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (152)$$

Граничные условия:

$$H(R_{\text{яз}}, t) = H_e; \quad \partial H(R_{\text{яз}}, t) / \partial r = 0; \quad H(r_0, t) = H_0. \quad (153)$$

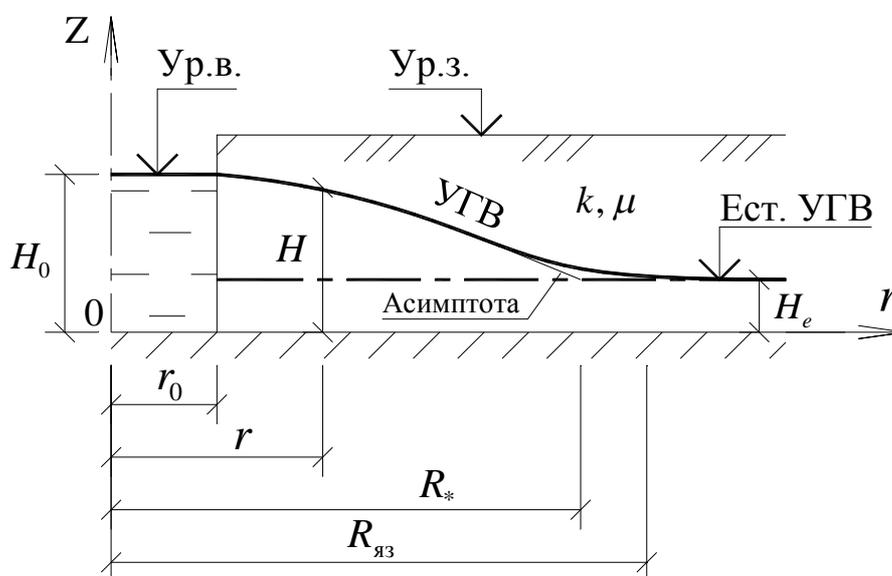


Рис. 31. Круглый в плане язык подтопления на маломощных грунтовых водах

Начальное условие:

$$H(r, 0) = H_e. \quad (154)$$

Здесь $R_{\text{яз}}$ — действительный радиус фронта языка подтопления; остальные обозначения см. на рис. 31.

Эту нелинейную задачу решим, как и предыдущую, приближенным методом интегрального баланса [23]. Умножим (152) на $2\pi r \partial r$ и про-

интегрируем от 0 до $R_{\text{яз}}$. Тогда получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[2\pi\Theta - H_e 2\pi R_{\text{яз}}^2 \right] = \frac{2\pi k}{\mu} \left[R_{\text{яз}} H(R_{\text{яз}}, t) \frac{\partial H(R_{\text{яз}}, t)}{\partial r} - r_0 H(r_0, t) \frac{\partial H(r_0, t)}{\partial r} \right], \quad (155)$$

где

$$\Theta = \int_0^{R_{\text{яз}}} r H(r, t) dr.$$

Решение уравнения (152) ищем в виде

$$H(r, t) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2, \quad (156)$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты, зависящие от времени.

Подставим (156) в граничные условия (153):

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 r_0 + a_2 r_0^2 &= H_0; \\ a_0 + a_1 R_{\text{яз}} + a_2 R_{\text{яз}}^2 &= H_e; \\ a_1 + 2a_2 R_{\text{яз}} &= 0, \end{aligned}$$

откуда найдем коэффициенты

$$a_0 = H_e + \frac{R_{\text{яз}}^2 (H_0 - H_e)}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2}; \quad a_1 = -\frac{2R_{\text{яз}} (H_0 - H_e)}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2}; \quad a_2 = \frac{H_0 - H_e}{(R_{\text{яз}} - r_0)^2},$$

которые подставим в (156) и получим

$$H(r, t) = H_e + (H_0 - H_e) \left(\frac{R_{\text{яз}} - r}{R_{\text{яз}} - r_0} \right)^2. \quad (157)$$

Подставим (157) в (155) и после выкладок получим формулу для нахождения в неявном виде действительного радиуса языка подтопления $R_{\text{яз}}$ (зоны кругового подпора):

$$t = \frac{\mu}{12r_0 k H_0} \left[\frac{R_{\text{яз}}^3}{3} - \frac{7r_0^3}{3} + r_0 R_{\text{яз}}^2 + \frac{r_0^4}{R_{\text{яз}}} - 2r_0^3 \ln \left(\frac{R_{\text{яз}}}{r_0} \right) \right]. \quad (158)$$

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 метода автора показало, что кривая подпора в радиальной задаче близка к прямой линии. Поэтому вместо (157) для расчета кривой подпора УГВ от круглого источника подтопления лучше применять следующую формулу:

$$H(r, t) = H_e + (H_0 - H_e) \left[\frac{(R_* - r)}{(R_* - r_0)} \right], \quad (159)$$

где приведенный радиус языка подтопления (по асимптоте) можно определить так:

$$R_* = R_{\text{яз}} \left(1 - H_e / H_0 \right), \quad (160)$$

причем величину $R_{\text{яз}}$ надо определять из (158).

Таким образом, в формулах (159)–(160) первоначально полученная параболическая зависимость была заменена на линейную с учетом наилучшего совпадения с кривой подпора, полученной нелинейным моделированием методом МЭТ (см. гл. 4–5). В ходе моделирования отмечена интересная особенность конечной длины языка подтопления при малой мощности грунтовых вод, когда $H_e / H_0 \leq 0,3$. Моделированием выявлено, что погрешность формул (158)–(160) не превышает 5–10 %.

3.3.3. 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. [259]. После этого автор провел дополнительные исследования, которые приведены в монографии [262]. Для цельности изложения приводятся все исходные постановки.

При строительстве 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 пределах здания и вне его являются различными.

Начальную форму купола в 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 п. 3.2.

Динамика растекания вытянутых и круглых в плане куполов различна [68; 194; 195; 201; 213]. 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. 32) рассмотрено в рамках линейной гидравлической теории [259], то есть в предположения независимости горизонтальных составляющих скорости фильтрации от вертикальной координаты. Для решения таких задач прогноза уровня грунтовых вод по рекомендациям Н.П. Куранова [114] предпочтительно применять дифферен-

циальные уравнения фильтрации с линеаризацией по I способу. Эту задачу мы перерешали заново с учетом новых компьютерных средств.

Исходная система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{a\eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; & |x| \leq L; & \quad \eta = \eta_0/\bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_*/\mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; & |x| \geq L; & \quad a = kh_c/\mu; \quad \eta_0 = k_*/k. \end{aligned} \quad (161)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) &= H_e; \quad H_2(x, 0) = H_e; \quad \partial H_1(0, t)/\partial x = 0; \\ \eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial x} &= \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial x}; \quad H_1(L, t) = H_2(L, t); \quad H_2(\infty, t) = H_e. \end{aligned} \quad (162)$$

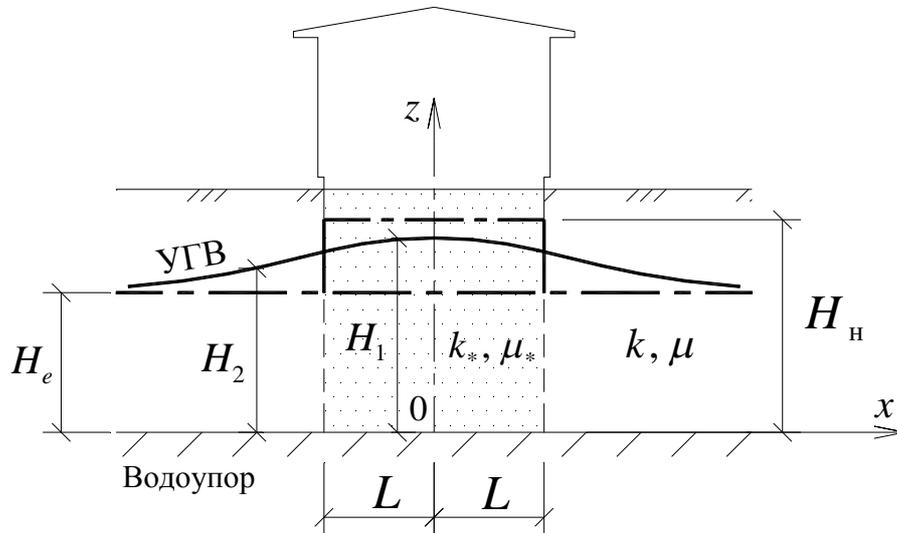


Рис. 32. Растекание вытянутого в плане купола грунтовых вод в основании здания или сооружения

Здесь k и μ — коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта в естественном залегании; k_* и μ_* — коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта, суммарно учитывающие непроницаемые включения и уплотнение грунта под зданием или сооружением; a — коэффициент уровнепроводности; h_c — средняя мощность водоносного пласта; остальные обозначения см. на рис. 32.

Применив к системе уравнений (161) и краевым условиям (162) пря-

мое и обратное преобразования Лапласа по времени [70; 71; 94], получим решения в виде [259]

$$H_1 = H_H - \frac{(H_H - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L-x}{2\sqrt{\eta at}} + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L+x}{2\sqrt{\eta at}} \right]; \quad (163)$$

$$H_2 = H_e + \frac{\bar{\mu}\sqrt{\eta}(H_H - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2nL}{2\sqrt{\eta at}} - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2L(n+1)}{2\sqrt{\eta at}} \right]. \quad (164)$$

где

$$\alpha = -\left(1 - \bar{\mu}\sqrt{\eta}\right) / \left(1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}\right).$$

В формулы (163)–(164) входит $\operatorname{erfc}(z)$ — дополнительный интеграл вероятности — специальная функция [273].

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

$$\tau = at/L^2. \quad (165)$$

В начальный период времени растекания для вытянутого купола грунтовых вод при $\tau \leq 3,1$ в неоднородном пласте с погрешностью менее 5 % можно применять асимптотическое решение для центра купола ($x = 0$):

$$H_1 = H_H - \frac{2(H_H - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\eta\tau}}. \quad (166)$$

Опускание центра вытянутого купола ($x = 0$) в неоднородном пласте для любого момента времени можно рассчитать с погрешностью менее 4 %

по другому асимптотическому решению:

$$H_1 = H_n - \frac{2(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{n=3} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{2n+1}{2\sqrt{\eta\tau}}. \quad (167)$$

Опускание центра вытянутого купола ($x = 0$) в однородном пласте ($\eta = 1$) для любого момента времени можно рассчитать по формуле [195]:

$$H_1 = H_e + (H_n - H_e) \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\tau}}, \quad (168)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ — интеграл вероятности (или функция ошибок), который связан с дополнительным интегралом вероятности так [273]:

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z).$$

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 формула (166) переходит в (168) в случае однородного пласта. Сводка формул по расчету растекания полосообразных (вытянутых в плане) куполов грунтовых вод в плано-однородных пластах приведена в [204]. В книге [147] даны формулы В.К. Рудакова по расчету растекания куполов в плано-неоднородных пластах, охватывающие случаи, свойственные гидромелиоративным системам. Они могут быть полезны для прогнозов подтопления в городском строительстве. Эти формулы получены в рамках линейной гидравлической теории фильтрации.

На рис. 33 над сплошной кривой расположена 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 %. 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 грун-

товых вод, под которым произошло уплотнение грунта. Если точка η попала под кривую (ниже кривой), то необходимо учитывать изменение фильтрационных характеристик под зданием или сооружением и рассчитывать УГВ по формулам (163)–(167).

Следует помнить, что пренебрежение процессами снижения проницаемости грунтов в городах приводит к занижению прогнозного УГВ, то есть идет не в запас надежности прогнозов подтопления. График на рис. 33 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 τ порядка единицы.

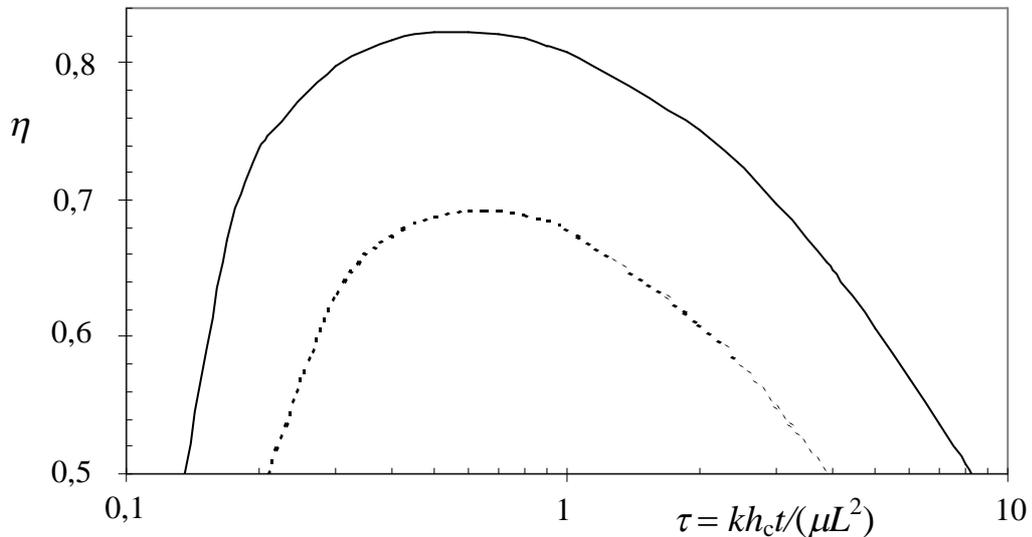


Рис. 33. Область учета снижения проницаемости при растекании вытянутого в плане купола грунтовых вод

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. 34) рассмотрим при условии выполнения линейной гидравлической теории фильтрации [6].

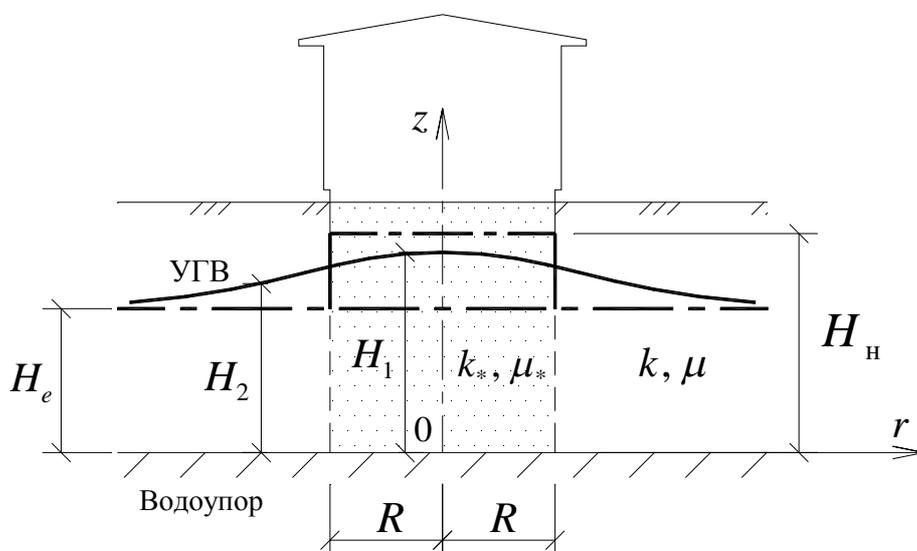


Рис. 34. Растекание круглого в плане купола грунтовых вод в основании здания или сооружения

Процесс растекания круглого купола можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r} = \frac{1}{a\eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad r \leq R; \quad \eta = \eta_0/\bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_*/\mu;$$

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad r \geq R; \quad a = kh_c/\mu; \quad \eta_0 = k_*/k.$$

(169)

Краевые условия:

$$H_1(r, 0) = H_H; H_2(r, 0) = H_e; \partial H_1(0, t)/\partial r = 0;$$

$$\eta_0 \frac{\partial H_1(R, t)}{\partial r} = \frac{\partial H_2(R, t)}{\partial r}; H_1(R, t) = H_2(R, t); H_2(\infty, t) = H_e.$$

(170)

Применив к системе уравнений (169) и краевым условиям (170) прямое и обратное преобразования Лапласа по времени [70; 71; 94], получим решения в виде [259]

$$H_1 = H_e + \frac{4(H_H - H_e)\bar{\mu}\sqrt{\eta a}}{\pi^2 R} F_{H1}; \quad (171)$$

$$H_2 = H_e + \frac{2(H_H - H_e)\bar{\mu}\sqrt{\eta}}{\pi} F_{H2}, \quad (172)$$

где несобственные интегралы

$$F_{H1} = \int_0^{\infty} \frac{J_0(vr/\sqrt{\eta a}) J_1(vR/\sqrt{\eta a}) \exp(-v^2 t)}{v^2 [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv;$$

$$F_{H2} = \int_0^{\infty} \frac{J_1(vR/\sqrt{\eta a}) \left[Y_0(vr/\sqrt{a}) \psi(v) - J_0(vr/\sqrt{a}) \varphi(v) \right] \exp(-v^2 t)}{v [\varphi^2(v) + \psi^2(v)]} dv,$$

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 [273]. Эти функции встроены в электронные таблицы Microsoft Excel. Несобственные интегралы лучше вычислять в специализированных математических пакетах, например в MathCAD [220].

Отметим, что аналогичные в математическом отношении решения получены в теории теплопроводности твердых тел [93].

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

$$\tau = at/R^2. \quad (173)$$

В начальный период растекания круглого купола при $\tau \leq 0,9$ с погрешностью не грубее 5 % можно применять асимптотическое решение для центра купола ($r = 0$):

$$H_1 = H_n - \frac{2(H_n - H_e)}{1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta}} \exp\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right). \quad (174)$$

При $\tau > 0,9$ (конечная стадия растекания купола) опускание центра купола ($r = 0$) можно рассчитать по формуле:

$$H_1 = H_e + (H_n - H_e) F_{\text{ц}}(\tau, \eta), \quad (175)$$

где $F_{\text{ц}}(\tau, \eta)$ — функция, определяемая по графику на рис. 35.

Для однородного пласта формула (174) переходит в известную формулу А.Ж. Муфтахова [213] по расчету опускания центра круглого купола грунтовых вод ($r = 0$) для любых времен:

$$H_1 = H_n - (H_n - H_e) \exp\left(-\frac{1}{4\tau}\right). \quad (176)$$

Другие зависимости для круглых в плане куполов в плано-однородных пластах (одно- и двухслойных в разрезе) приведены в справочном пособии к СНиП [204].

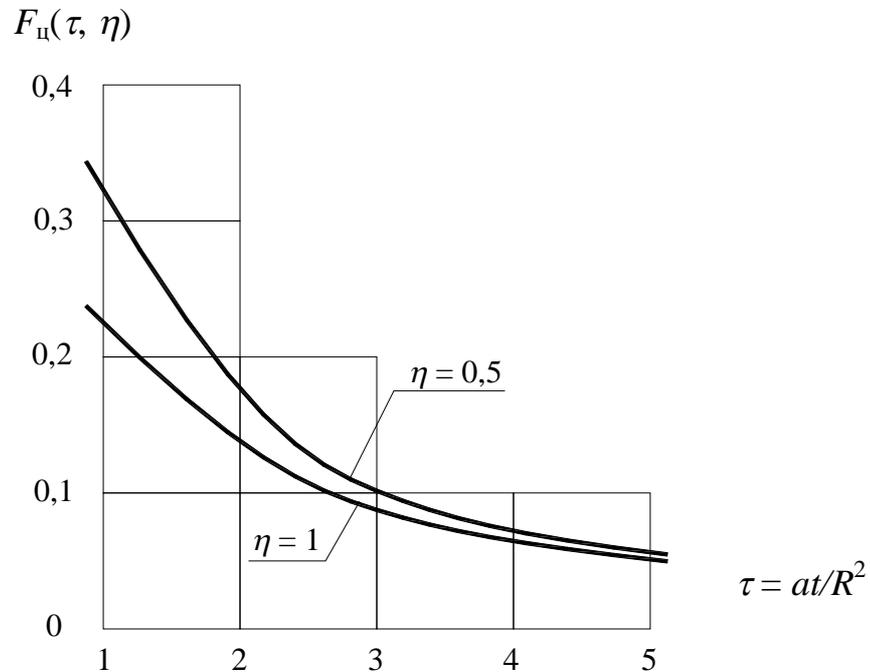


Рис. 35. К расчету опускания центра круглого купола

В коллективной монографии [147] опубликованы формулы В.К. Рудакова по расчету растекания куполов других плановых форм: прямоугольник, полуполоса и др. Формулы получены в рамках линейной гидравлической теории фильтрации.

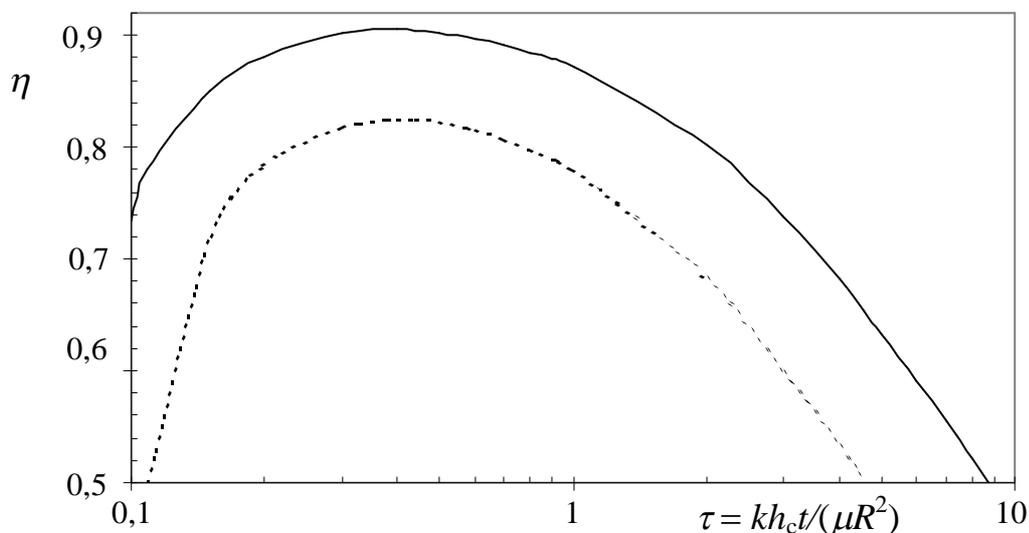


Рис. 36. Область учета снижения проницаемости при растекании круглого в плане купола грунтовых вод

На рис. 36 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 погрешности 10 %.

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 ω (м/сут) в виде полосы шириной $2L$ (рис. 37). Такие же задачи могут возникнуть при прогнозе подтопления дорог, если их покрытия старые и имеют трещины, через которые могут проникать инфильтрационные воды. Например, по данным А.Я. Тулаева [285] инфильтрация атмосферной влаги через старые растрескавшиеся покрытия может достигать значений $\omega = 2 \cdot 10^{-3}$ м/сут, что соизмеримо с величинами инфильтрации влаги на территории городской застройки [204].

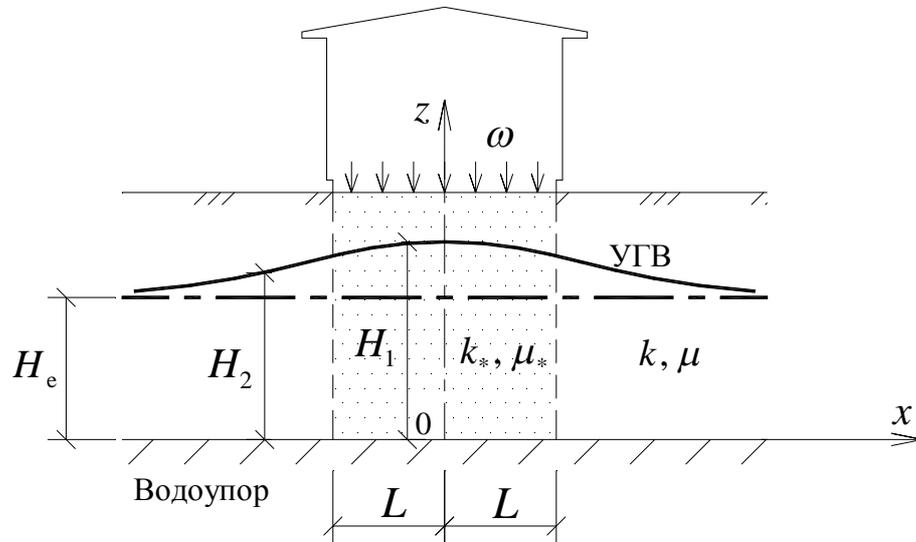


Рис. 37. Подъем УГВ под влиянием полосообразного очага техногенной инфильтрации воды в пределах здания

При достаточно глубоком водоносном горизонте задача в плано-неоднородном пласте может быть рассмотрена в гидравлической постановке. Исходную систему дифференциальных уравнений плоскопараллельной фильтрации воды можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} + \frac{\omega}{\eta k h_c} &= \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad |x| \leq L; \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad |x| \geq L; \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k. \end{aligned} \quad (177)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) = H_2(x, 0) = H_2(\infty, t) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial x = 0; \\ \eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial x} = \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial x}; \quad H_1(L, t) = H_2(L, t). \end{aligned} \quad (178)$$

Применив к системе уравнений (177) и краевым условиям (178) прямое и обратное преобразования Лапласа по времени [70; 71; 94], получим решения в виде [259]

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} + \frac{4 \omega t}{\mu (1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta})} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L-x}{2\sqrt{\eta a t}} + \right.$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)L+x}{2\sqrt{\eta at}} \Big]; \quad (179)$$

$$H_2 = H_e + \frac{4\omega t \bar{\mu} \sqrt{\eta}}{\mu(1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta})} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2nL}{2\sqrt{\eta at}} - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n i^2 \operatorname{erfc} \frac{(x-L)\sqrt{\eta} + 2L(n+1)}{2\sqrt{\eta at}} \right]. \quad (180)$$

Здесь $i^2 \operatorname{erfc}(z)$ — специальная табулированная функция (кратный интеграл вероятности), значения которой приведены, например, в [273, 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 α см. пояснение к формулам (163)–(164).

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 (165).

В начальный период подъема центра купола под полосой техногенной инфильтрации (см. рис. 37) напор грунтовых вод при $x = 0$ можно найти при соблюдении условия $\tau \leq 6,8$ так:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left(1 - \frac{8}{1 + \bar{\mu} \sqrt{\eta}} i^2 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\eta \tau}} \right). \quad (181)$$

При больших временах ($\tau > 6,8$) расчет подъема центра купола следует производить по другой формуле:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu \tau} \left[2\sqrt{\tau/\pi} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi \tau}} \right) \left(\frac{1}{2\eta} - 1 \right) \right]. \quad (182)$$

Таким образом, формулы (181) и (182) охватывают весь период подъема центра вытянутого в плане купола и в использовании сложной формулы (179) для расчета точки $x = 0$ нет необходимости. Погрешность формул меньше 5 %. Отметим также, что зависимости (179)–(180) в случае однородного в плане пласта грунтовых вод переходят в известные формулы С.Ф. Аверьянова [6].

Другие зависимости по подъему вытянутых в плане куполов под влиянием полосообразной инфильтрации в планово-однородных пластах (одно- и двухслойных в разрезе) приведены в [204]. В [147] даны формулы по расчету подъема куполов других плановых форм (прямоугольник, полуполоса и др.), в том числе в планово-неоднородных пластах.

На рис. 38 над сплошной кривой расположена 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 %.

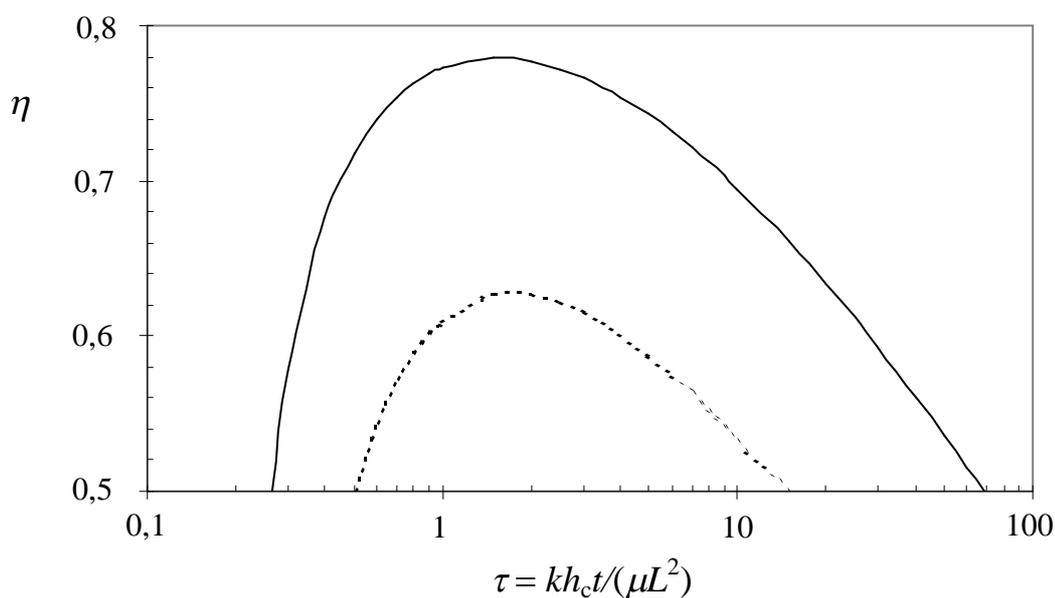


Рис. 38. Область учета снижения проницаемости под полосообразным очагом инфильтрации

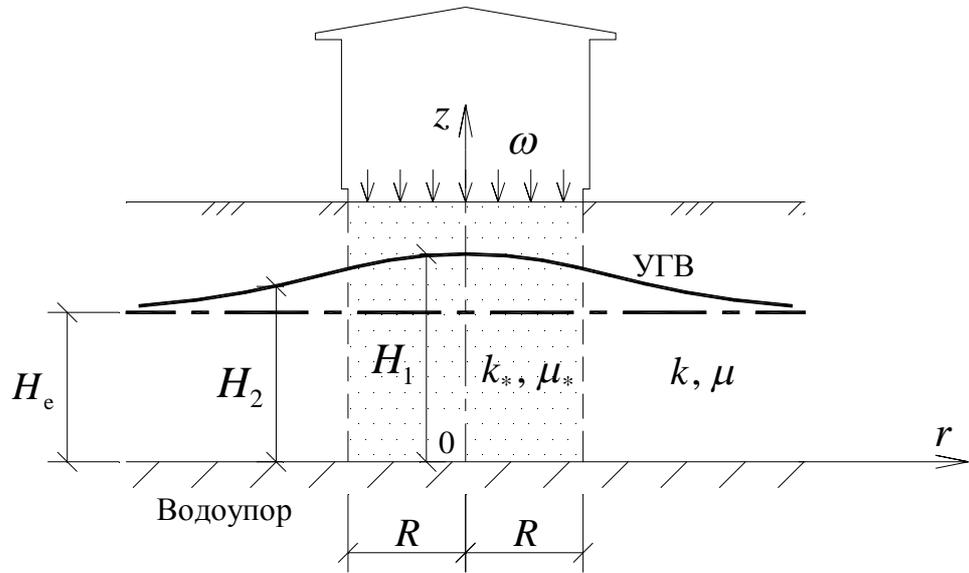


Рис. 39. Подъем УГВ под влиянием круглого в плане очага техногенной инфильтрации воды в пределах здания

Динамика подъема УГВ под круглым в плане зданием или сооружением при действии техногенного инфильтрационного питания ω (м/сут) в виде круга радиусом R (рис. 39) при достаточно глубоких грунтовых водах может быть описана линейной гидравлической теорией фильтрации.

Исходные дифференциальные уравнения радиальной фильтрации воды для данной задачи имеют вид

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r} + \frac{\omega}{\eta k h_c} = \frac{1}{a \eta} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad r \leq R; \quad \eta = \eta_0 / \bar{\mu}; \quad \bar{\mu} = \mu_* / \mu;$$

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad r \geq R; \quad a = k h_c / \mu; \quad \eta_0 = k_* / k.$$

(183)

Краевые условия:

$$H_1(r, 0) = H_2(r, 0) = H_2(\infty, t) = H_e; \quad \partial H_1(0, t) / \partial r = 0;$$

$$\eta_0 \frac{\partial H_1(L, t)}{\partial r} = \frac{\partial H_2(L, t)}{\partial r}; \quad H_1(R, t) = H_2(R, t).$$

(184)

После применения к системе (183) и краевым условиям (184) прямого и обратного преобразования Лапласа по времени [70; 71; 94], получим решения в виде [259]

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} - \frac{4\omega\bar{\mu}\sqrt{\eta a}}{\pi^2 R\mu} F_{H1}; \quad (185)$$

$$H_2 = H_e + \frac{2\omega\bar{\mu}\sqrt{\eta}}{\pi\mu} F_{H2}, \quad (186)$$

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

$$\varphi(v) = J_0(vR/\sqrt{\eta a})Y_1(vR/\sqrt{a}) - \bar{\mu}\sqrt{\eta}J_1(vR/\sqrt{\eta a})Y_0(vR/\sqrt{a});$$

$$\psi(v) = J_0(vR/\sqrt{\eta a})J_1(vR/\sqrt{a}) - \bar{\mu}\sqrt{\eta}J_1(vR/\sqrt{\eta a})J_0(vR/\sqrt{a}).$$

$J_0(z)$, $J_1(z)$, $Y_0(z)$, $Y_1(z)$ — функции Бесселя действительного аргумента [273]. Они встроены в электронные таблицы Microsoft Excel. Интегралы легко вычисляются, например в MathCAD [220].

Аналогичные в математическом отношении решения получены в теории теплопроводности твердых тел [93].

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 (173).

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. 39):

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left\{ 1 - \frac{2}{1 + \bar{\mu}\sqrt{\eta}} \left[\exp\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right) + \frac{1}{4\eta\tau} \text{Ei}\left(-\frac{1}{4\eta\tau}\right) \right] \right\}, \quad (187)$$

которое в случае плано-однородного пласта переходит в решение А.Ж. Муфтахова для любых времен ($r = 0$):

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{\mu} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{4\tau}\right) + \frac{1}{4\tau} \text{Ei}\left(-\frac{1}{4\tau}\right) \right\}. \quad (188)$$

Здесь $\text{Ei}(z)$ — интегральная показательная функция [103, 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. 39) можно рассчитать в плано-неоднородном пласте по следующей асимптотической формуле:

$$H_1 = H_e + \frac{\omega t}{4\mu\tau} \left(\ln \frac{4\tau}{C} + \frac{1}{\eta} \right), \quad (189)$$

где $C \approx 1,781$ — константа Эйлера [103; 324].

Таким образом, формулы (188) и (189) охватывают весь период подъема центра круглого в плане купола под влиянием техногенной инфильтрации. Погрешность этих формул меньше 5 %.

На рис. 40 над сплошной кривой расположена 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 соответствуют погрешности 10 %. Вначале вычисляют безразмерный параметр времени τ для радиальной в плане фильтрации по формуле (173). Затем находят относительное изменение проницаемости η с учетом коэффициентов фильтрации и водоотдачи под зданием или сооружением — см. (183). При этом коэффициент фильтрации под зданием или сооружением можно найти прогнозом по методике автора, изложенной в параграфе 3.2. По двум найденным координатам и на рис. 40 находят точку, которая позволяет использовать критериально график рис. 40.

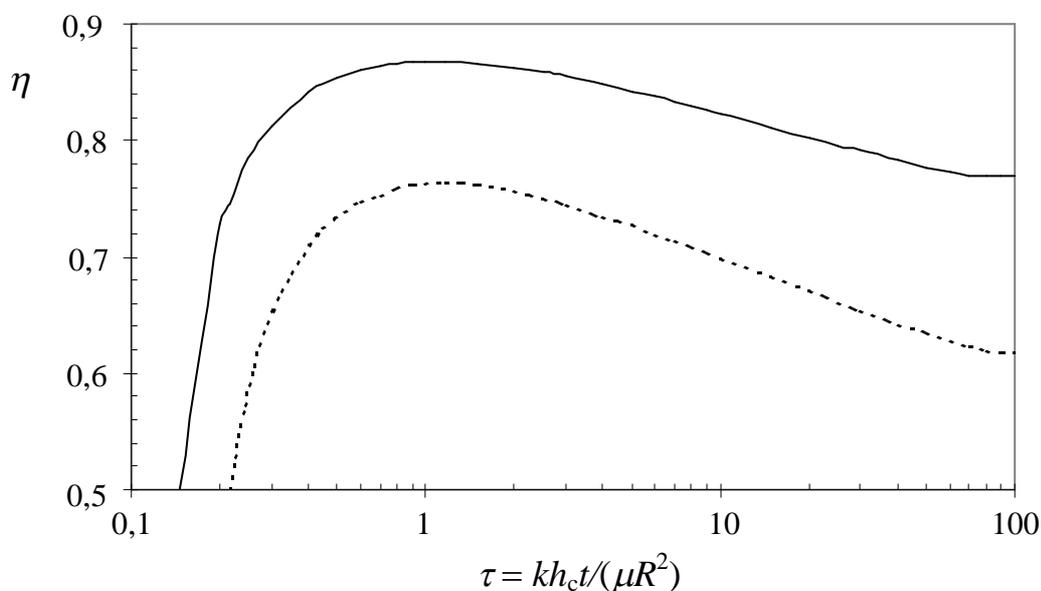


Рис. 40. Область учета снижения проницаемости под круглым в плане очагом инфильтрации

Приведенные 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. 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. Автор рекомендует использовать для этой цели разработанную методику МКР-Excel (метод автора МЭТ).

Пользуясь вышеприведенными формулами для куполов, можно произвести приближенные расчеты подтопления с учетом влияния технологии городского строительства. Например, при забивке свай повышение уровня грунтовых вод (УГВ) для каждого свайного ряда можно найти так (рис. 41 и 42):

$$\Delta h_t = \Delta h_0 \left[1 - \frac{2}{1 + \sqrt{\eta}} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{1 + 2n}{\sqrt{\eta\tau}} \right];$$

$$\tau = 4a_y t / r_c^2; \quad \eta = k_* / k; \quad \alpha = (\sqrt{\eta} - 1) / (\sqrt{\eta} + 1), \quad (190)$$

где k — коэффициент фильтрации грунта; k_* — коэффициент фильтрации грунта в уплотненной зоне радиусом r_c [246, 252], который можно определить по результатам динамических испытаний свай на несущую способность [246]; t — время после забивки свай; a_y — уровнепроводность.

Величину начальной высоты купола грунтовых вод вдоль забиваемого свайного ряда можно найти по следующей формуле

$$\Delta h_0 = \Delta P_k / (u \gamma \operatorname{tg} \varphi_r),$$

где ΔP_k — конечное приращение несущей способности сваи после ее «отдыха» в водонасыщенном грунте; u — периметр сваи; l — мощность водонасыщенного слоя грунта, примыкающего к боковой поверхности сваи; γ — удельный вес грунтовой воды; φ_r — угол внутреннего трения грунта. При превышении величиной Δh_0 поверхности земли ее следует ограничить глубиной залегания естественного УГВ.

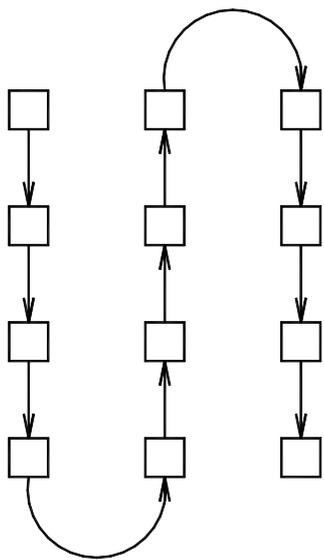


Рис. 41. Схема забивки свай (вид в плане)

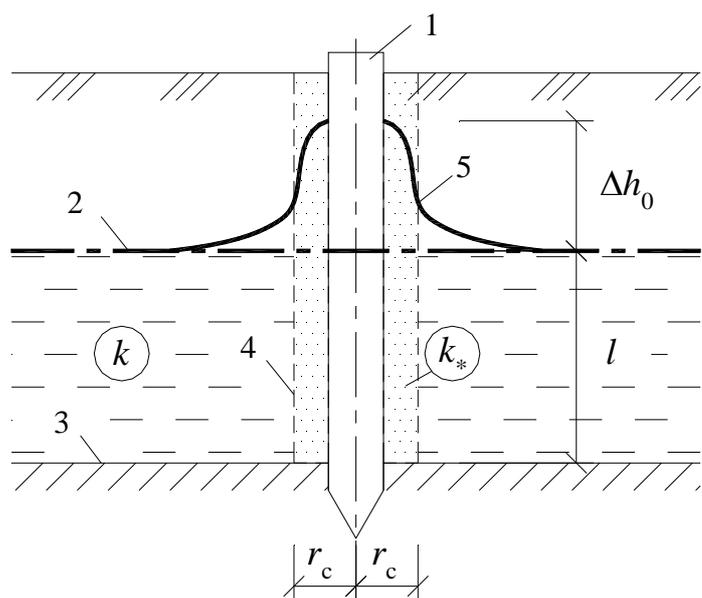


Рис. 42. Повышение уровня грунтовых вод (УГВ) при забивке свайного ряда: 1 — сваи; 2 — естественный УГВ; 3 — водоупор; 4 — зона максимально уплотненного грунта; 5 — нарушенный УГВ

3.3.4. Расчет барражного эффекта зданий и сооружений

Строящиеся здания и сооружения своими непроницаемыми или слабопроницаемыми подземными частями и фундаментами могут перекрыть фильтрационные потоки подземных вод (см. пример 11 в [262]). 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. 43). 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. 44).

В нашей кандидатской диссертации [259] 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 метода автора. 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 потоков подземных вод за счет барражного эффекта здания или сооружения 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. Полубаириновой-Кочиной [194; 195] и Н.П. Курановым [114] как наилучшее приближение к нелинейному решению.

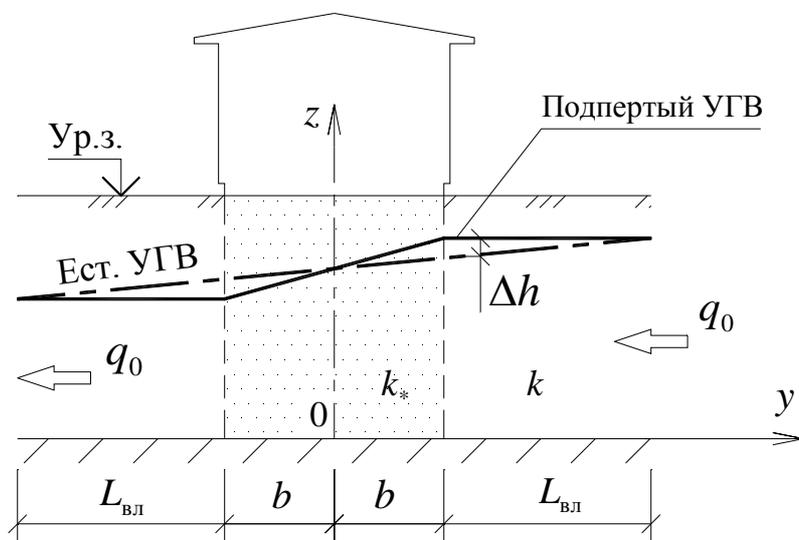


Рис. 43. Барражный эффект здания (разрез)

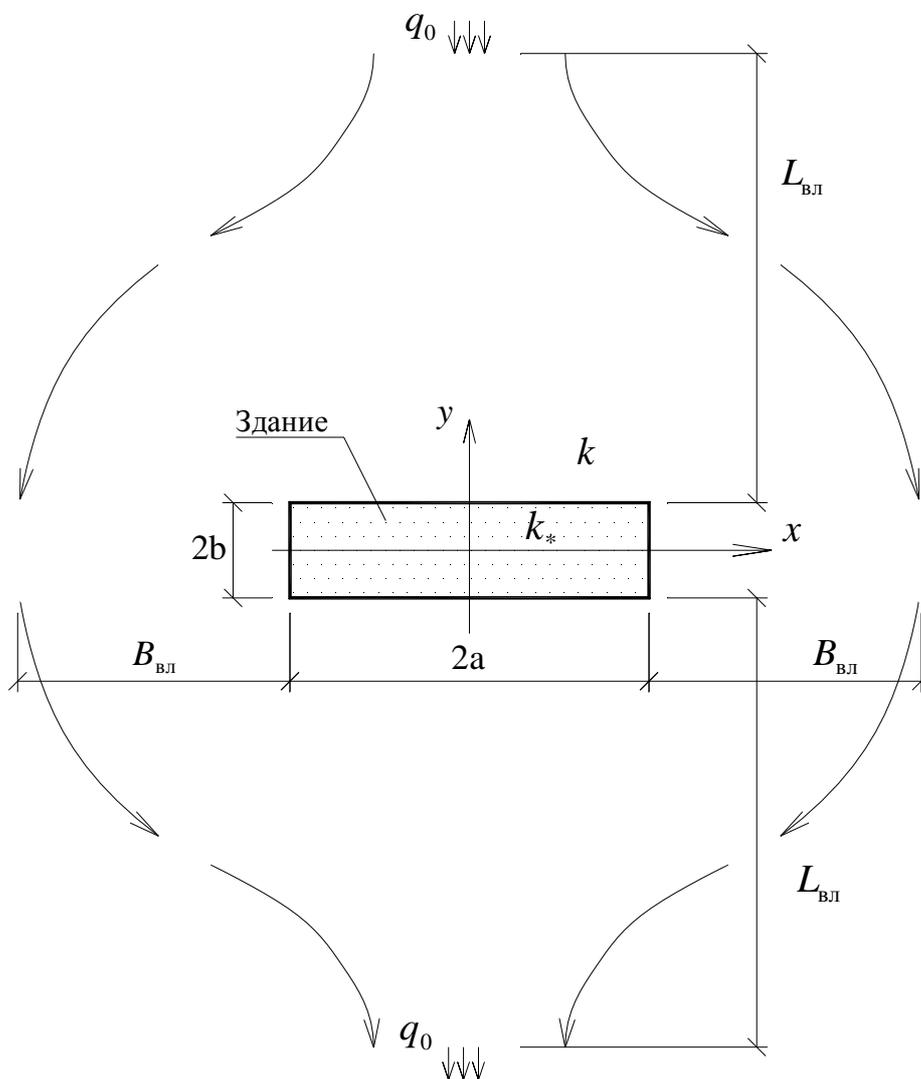


Рис. 44. Барражный эффект здания (вид в плане)

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 дополнительного изменения УПВ (см. рис. 43 и 44)

$$\Delta h = \frac{q_0 \sigma \gamma a}{k h_c (\xi^2 + \gamma^2)};$$

$$\sigma = (1-\eta)/(1+\eta); \quad \eta = k_*/k; \quad \xi = (x \pm a)/(a+b); \quad \gamma = (y \pm \beta)/(a+b);$$

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{(x^2 - y^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2 y^2} + x^2 - y^2 - a^2 + b^2 \right] \right\}^{0,5};$$

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{(x^2 - y^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2 y^2} - x^2 + y^2 + a^2 - b^2 \right] \right\}^{0,5}, \quad (191)$$

где q_0 — удельный расход естественного потока подземных вод; h_c — средняя мощность грунтовых вод; ξ, γ — относительные координаты эллиптического цилиндра; при определении ξ брать знак плюс «+» для точек $x > 0$ и знак минус «-» для $x < 0$; аналогично для γ — знак плюс «+» для точек $y > 0$ и знак минус «-» для $y < 0$; остальные обозначения показаны на рис. 43 и 44. В случае напорных подземных вод в данной формуле вместо h_c принять M — мощность водоносного пласта.

Формула (191) модернизирована. Первоначально она была получена нами методом конформного отображения внешности эллипса на внешность круга [259]. Теперь в ней использован принцип миделевого сечения, принятый в промышленной гидроаэромеханике и кораблестроении [30]. Этот прием оказался существенно точнее. Расхождение дополнительных подпор Δh , подсчитанных по (191) со значениями тестовой модели МКР-Excel с количеством узлов 22500 не превысило 3-4 %, что достаточно надежно.

Дополнительный подпор УПВ Δh_y вдоль оси y можно выразить из формулы (191) в более простом виде

$$\Delta h_y = \frac{q_0 \sigma (a + b) a}{k h_c \left[y + \sqrt{y^2 + a^2 - b^2} \right]}. \quad (192)$$

Зона фронтального влияния (см. рис. 43 и 44) с погрешностью определения УПВ 10 % или 5 % может быть определена соответственно как

$$L_{\text{вл}} = (2,5 \dots 3)a, \quad (193)$$

причем формула (193) 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. 43 и 44).

Зона бокового влияния (см. рис. 44) с погрешностью определения УПВ 10 % или 5 % может быть найдена соответственно так:

$$B_{\text{вл}} = (1,5 \dots 2)a. \quad (194)$$

Эта формула также основана на модельных экспериментах. Величина $B_{\text{вл}}$ отсчитывается от кромки здания или сооружения (см. рис. 44).

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 (метода автора МЭТ).

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. 45 – рис. 46 и отражено в вышеприведенной формуле (191). Сравнивая оба рисунка, нетрудно заметить их сходство.

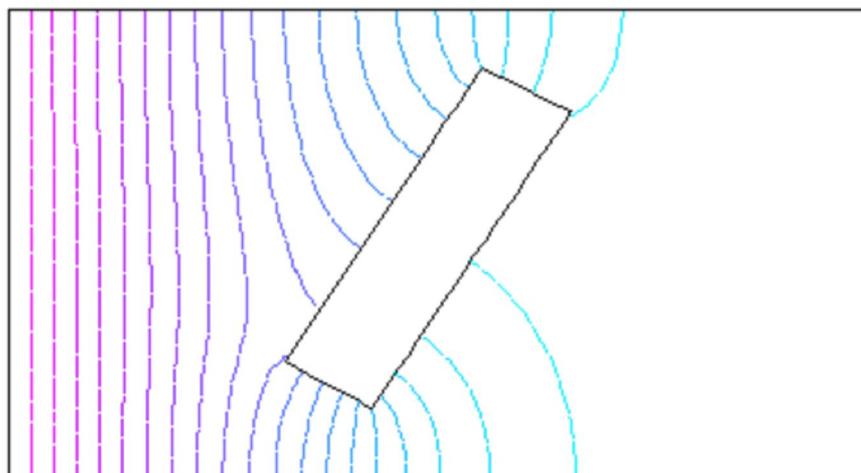


Рис. 45. Нестационарное обтекание здания потоком подземных вод (в плане)

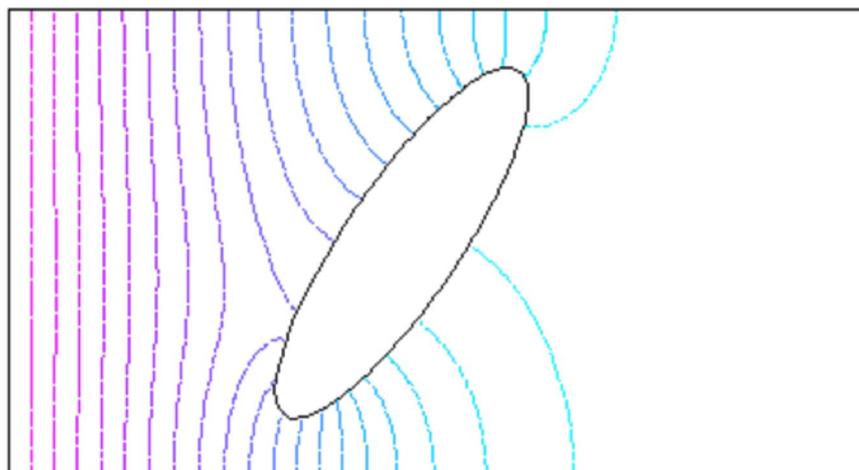


Рис. 46. Нестационарное обтекание эллиптического включения потоком подземных вод (в плане)

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 может быть просчитан на нелинейных моделях МКР-Excel. Попутно отметим, что пакет PDETOOL системы MatLab 5/6 фирмы MathWorks (США) не способен решать такие задачи.

Расчет подпора станцией метро грунтовых вод проиллюстрирован в [262] (пример 45).

Барражный эффект можно рассчитать, комбинируя известные методы фильтрационных сопротивлений, фрагментов и конформных отображений [13; 148; 182]. 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. 47а). Выделим полосу по ходу движения потока в контуре точек А, В, С, D (рис. 47б).

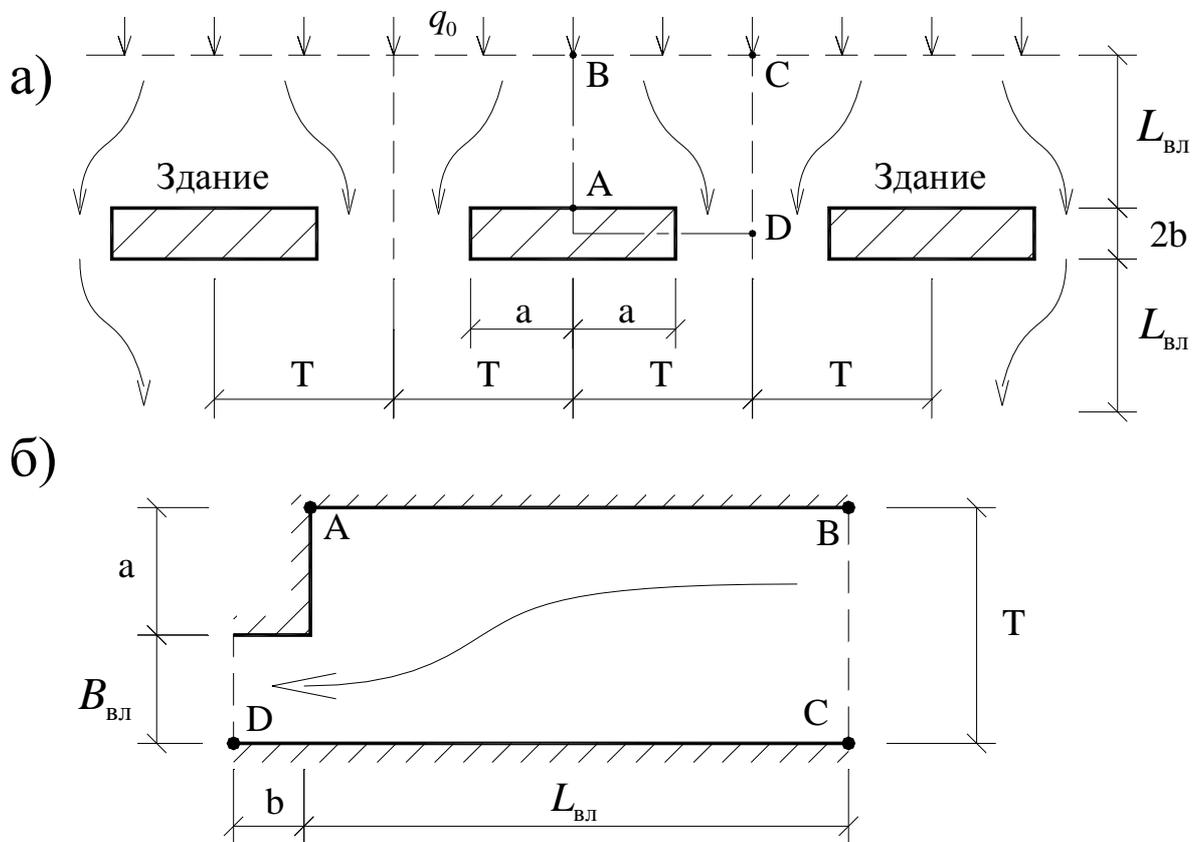


Рис. 47. Барражный эффект группы вытянутых зданий: а — план зданий; б — расчетная схема обтекания прямоугольной преграды в полосе

Запишем формулу для вычисления максимального дополнительного подпора Δh_{\max} от барражного эффекта в центральной точке А перед зданием, расположенной со стороны набегающего потока подземных вод (см.

рис. 47а). Находим в [13, с. 221] модуль формы, соответствующий схеме преграды в полосе, показанной на рис. 47б. Модуль формы дан по Н.Н. Павловскому для абсолютно непроницаемой преграды. Расширим задачу введением параметра σ из формулы (191) 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

$$\Delta h_{\max} = \frac{2q_0 \sigma L_{\text{вл}}}{\pi k h_c} \ln \left\{ \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{a}{T} \right) \right] \right\}, \quad (195)$$

которая действительна при соотношениях размеров зданий в плане

$$b/a \leq 0,1,$$

что проверено моделированием. Погрешность менее 2–3 % (см. пример 46 в [262]).

При неполном перекрытии конструкциями потока подземных вод возникает плоско-вертикальное обтекание преграды. Например, на рис. 48 показана станция метро со «стенами в грунте», частично перекрывшая 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 потоке на эквивалентную завесу шириной $2b$ с пониженным коэффициентом фильтрации k_* , отличным от коэффициента фильтрации пласта k . Тогда величину дополнительного подпора НПВ ΔH над естественным пьезометрическим уровнем (см. рис. 48) можно найти от влияния эквивалентной завесы.

Величину ΔH запишем с использованием понятия виртуальных длин потока по Н.Н. Павловскому [182] и с учетом результатов нашей научно-исследовательской работы [202] в виде

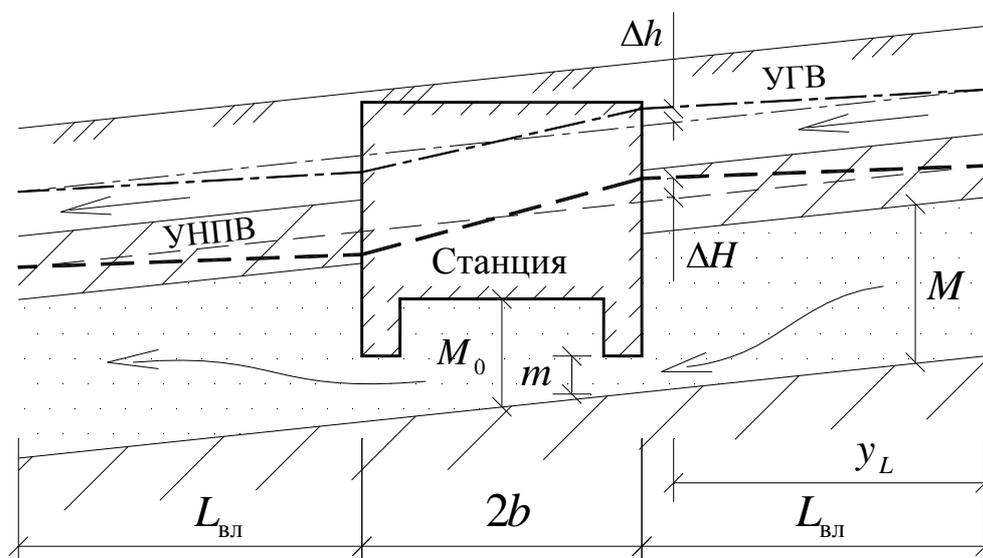


Рис. 48. Барражный эффект потоков подземных вод станцией метро

$$\Delta H = y_L I_H \left[1 - \frac{L_{\text{ВЛ}} + b}{L_{\text{ВЛ}} + b(k/k_*)} \right] \cos \varphi_H, \quad (196)$$

где y_L — координата сечения напорного пласта, где определяют дополнительный подпор ΔH , которую нужно отсчитывать от границы зоны влияния барража $L_{\text{ВЛ}}$ по направлению к преграде (см. рис. 48); $\cos \varphi_H$ — косинус угла набегания потока НПВ в плане, который имеет уклон гидроизопьез I_H .

Найдем k_* эквивалентной завесы. Имеем напорный поток, состоящий из четырех фрагментов длиной $L_{\text{ВЛ}}$, b , b и $L_{\text{ВЛ}}$ (см. рис. 48). На всей длине потока действует некоторая общая разность напоров $\Delta H_{\text{общ}}$.

С одной стороны, фильтрационный расход на единицу ширины фронта потока

$$q = \frac{\Delta H_{\text{общ}}}{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4},$$

где ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_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

$$\xi_1 = \xi_4 = \frac{1}{k} \left(\frac{L_{\text{вл}}}{M} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M} \right);$$

$$\xi_2 = \xi_3 = \frac{1}{k} \left(\frac{b}{M_{\text{д}}} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M_{\text{д}}} \right),$$

где обозначения см. рис. 48.

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 ξ_5, ξ_6, ξ_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:

$$\xi_5 = \xi_7 = \frac{L_{\text{вл}}}{kM}; \quad \xi_6 = \frac{2b}{k_*M}.$$

Приравнивая выражения расходов, после выкладок получим формулу для вычисления коэффициента фильтрации эквивалентной завесы k_* , заменяющей конструкцию преграды в напорном потоке в виде

$$k_* = \frac{kb}{M} \left\{ \frac{b}{M_{\text{д}}} - \frac{2}{\pi} \ln \left[\left(\sin \frac{\pi m}{2M} \right) \left(\sin \frac{\pi m}{2M_{\text{д}}} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (197)$$

Пример 45 в [262] иллюстрирует применение полученных формул.

Резюмируя результаты данного параграфа, можно отметить, что разработана методика приближенных аналитических расчетов по прогнозам подтопления в условиях городского строительства, позволяющая оценивать барражный эффект.

3.4. Прогнозы 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 любом случае. Поэтому она рассмотрена в первую очередь. При наличии естественной гидрогеологической неоднородности по вертикали (в разрезе) и в горизонтальном направлении (плановая неоднородность) фильтрационные расчеты могут быть выполнены, но они усложняются. Более достоверным способом в этом случае является моделирование (см. п. 5.3). 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 уточнить моделированием.

В городском строительстве применяют водоотлив, водопонижение и дренаж как активные методы борьбы с подтоплением. Водоотлив из котло-

ванов 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 изменение проницаемости грунтов оснований в период строительства и эксплуатации объектов (см. п. 3.2 и 5.1).

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 городской застройки, то фильтрационные расчеты становятся слишком сложными и проектирование водоотлива лучше моделировать (см. 5.3).

В некоторых производственных и учебных изданиях [73, 279, 280] 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 городского строительства и гидрогеологии городов и потому не надежны.

Из достаточно проработанных аналитических методов по расчету водоотлива следует отметить книги [225] и [265]. В работе А.Б. Сотникова [265] рассмотрены гидрогеологические прогнозы при строительстве в суровых климатических условиях главным образом Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМа). Аналитические зависимости позволяют сделать приближенный прогноз водоотлива, в том числе с учетом барражного эффекта при частичном перемерзании фильтрационного потока. Книга Б.Г. Самсонова [225] 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 [194; 195] со всеми свойственными ей приближениями.

При проектировании водоотлива необходимо составить прогноз водопритоков, понижения УПВ и оценить возможные последствия применения водоотлива на разрабатываемые грунты и окружающую территорию застройки. В простых случаях или в первом приближении это может быть рассчитано приближенно по аналитическим зависимостям. В более сложных — лучше уточнить 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 водоприток в пластовые и ленточные дренажи почти идентичны.

Существующие методики фильтрационного расчета водоотлива используют линеаризованную гидравлическую теорию фильтрации [194; 195]. Ниже приведены решения автора без линеаризации гидравлической теории, то есть без введения средней мощности пласта грунтовых вод.

Водоприток грунтовых вод в гидродинамически несовершенную траншею в однородном однослойном пласте (рис. 49) можно рассчитать по формуле Дюпюи, уточненной по методу фильтрационных сопротивлений С.Н. Нумерова [11] — Ю.П. Борисова [31]. При постоянном напоре в траншее h_T односторонний водоприток

$$q = \frac{k(h_e^2 - h_T^2)}{2L_t(1 + \zeta)}, \quad (198)$$

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 $L_{вл}$ [313]; h_e — напор грунтовых вод в естественном залегании (или в условиях техногенного подтопления); h_T — напор в траншее; ζ — дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенной траншеи, которое возникает вследствие искривления линий тока фильтрационного потока, притекающего из грунта в траншею (см. рис. 49).

Наше моделирование МКР-Excel (МЭТ) профильных задач фильтрации грунтовых вод при водоотливе из траншей в гидромеханической постановке позволило критически оценить и выбрать наиболее точные существующие методики для определения ζ .

рительных инструментов [211]. Вышеназванным комбинированным методом автора АДЧМ найдена зона влияния водоотлива из гидродинамически совершенной траншеи в виде

$$L_{\text{вл}} = (4,5 - 0,625 h_{\text{T}}/h_{\text{e}}) \sqrt{at}; a = kh_{\text{e}}/\mu. \quad (201)$$

Траншею считают совершенной, если ее дно доходит до водоупора [12; 148; 313]. Напротив, траншея является гидродинамически несовершенной, если вскрывает водоносный пласт не на всю мощность, как показано на рис. 49.

Влияние гидродинамического несовершенства траншеи в (200) и (201) можно учесть с помощью задания эквивалентного напора в траншее [147], который легко находится из приравнивания водопритоков совершенной и несовершенной траншей

$$\frac{k(h_{\text{e}}^2 - h_{\text{T}^*}^2)}{2L_{\text{t}}} = \frac{k(h_{\text{e}}^2 - h_{\text{T}}^2)}{2L_{\text{t}}(1 + \zeta)}$$

в виде

$$h_{\text{T}^*} = \left[h_{\text{e}}^2 - (h_{\text{e}}^2 - h_{\text{T}}^2)/(1 + \zeta) \right]^{1/2}, \quad (202)$$

а вычисленное по (202) значение h_{T^*} надо подставить в (200) и (201) вместо h_{T} .

Длина области питания L_{t} и зона влияния водоотлива $L_{\text{вл}}$ получены для диапазона нелинейной постановки уравнения Буссинеска для грунтовых вод при $0 \leq h_{\text{T}}/h_{\text{e}} \leq 0,8$ (см. рис. 49). При небольшом понижении уровня воды в траншее, когда перепад уровней воды S не превышает 10-25 % мощности грунтовых вод h_{e} (см. рис. 49), фильтрация удовлетворительно описывается гидравлической теорией с линеаризованными постановками исходного дифференциального уравнения Буссинеска [6; 7; 48; 152; 315]. Тогда величина L_{t} по (200) переходит в известную формулу К.Э. Лембке [195, с. 608]:

$$L_{\text{t}} = 1,73 \sqrt{at}. \quad (203)$$

Ординаты кривой депрессии УГВ с учетом участка высачивания $h_{\text{выс}}$ можно рассчитать по формулам, в которые входят значения L_t по (200) и $L_{\text{вл}}$ по (201).

Исследования на нелинейных нестационарных моделях с помощью МКР-Excel (МЭТ) показали, что кривая депрессии УГВ почти не совпадает с параболой Дюпюи. Кроме того, вблизи траншеи на свободную поверхность УГВ влияет участок высачивания высотой $h_{\text{выс}}$ (см. рис. 49).

При прогнозе водоотлива из траншеи расчетную кривую депрессии УГВ надо условно разбить на три зоны (рис. 50).

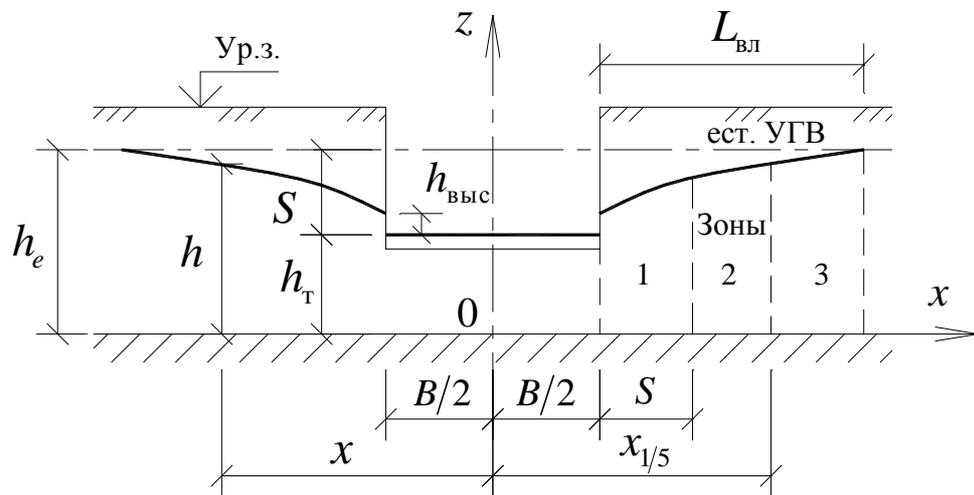


Рис. 50. К построению кривой депрессии УГВ при водоотливе из траншеи

В 1-й зоне около траншеи ($B/2 \leq x \leq B/2 + S$) на положение УГВ влияет участок высачивания $h_{\text{выс}}$, величину которого можно определить по формулам и графикам П.Я. Полубариновой-Кочиной [194; 195]. Например, при совершенной траншее и отсутствии воды на дне траншеи при $h_0 = 0$ м (см. рис. 49) участок высачивания [195, с. 275]

$$h_{\text{выс}} = 0,742q/k. \quad (204)$$

В этой зоне ординаты кривой депрессии можно определить по модифицированной формуле А.Ж. Муфтахова [3, с. 80-81] так:

$$h = h_T + h_{\text{выс}} \left[\frac{(B/2 + S - x)}{S} \right]^2 + \sqrt{2q(x - B/2)/k}, \quad (205)$$

где q – односторонний водоприток по формуле (198); x — горизонтальная координата в интервале $B/2 \leq x \leq B/2 + S$; остальные обозначения показаны на рис. 50.

2-я зона кривой депрессии находится в интервале $B/2 + S \leq x \leq x_{1/5}$, где $x_{1/5} = B/2 + L_{\text{вл}}/5$. Ординаты кривой депрессии на этом участке можно найти с помощью параболы Дюпюи в виде

$$h = h_{\text{т}} + \sqrt{2q(x - B/2)/k}. \quad (206)$$

В 3-й зоне кривой депрессии при $x_{1/5} \leq x \leq B/2 + L_{\text{вл}}$ ординаты

$$h = h_{1/5} + (h_e - h_{1/5}) \sqrt{\frac{\ln(x/x_{1/5})}{\ln\left(\frac{L_{\text{вл}} + B/2}{x_{1/5}}\right)}}, \quad (207)$$

где промежуточное значение напора $h_{1/5}$ при $x_{1/5}$ можно найти так:

$$h_{1/5} = h_{\text{т}} + \sqrt{2qL_{\text{вл}}/(5k)}.$$

Формула (207) для последней зоны содержит логарифмы, что не совсем обычно для зависимостей при плоскопараллельной фильтрации. Это обусловлено тем, что формула найдена эмпирически по результатам моделирования как имеющая наилучшее приближение для нестационарной кривой депрессии УГВ при водоотливе из траншеи.

Погрешность определения уровня грунтовых вод по приведенным формулам (205)–(207) в сравнении с данными нелинейного моделирования МКР-Excel имеет значения менее 5-6 %.

Водоприток грунтовых вод в гидродинамически несовершенный круглый в плане котлован в однородном однослойном пласте (рис. 51) можно рассчитать по формуле Дюпюи, уточненной по методу фильтрационных сопротивлений С.Н. Нумерова [11] — Ю.П. Борисова [31]. При постоянном напоре в котловане $h_{\text{к}}$ полный водоприток

$$Q = \frac{\pi k (h_e^2 - h_k^2)}{\ln(R_t/r_0) + \zeta_{пл}}, \quad (208)$$

где R_t — расчетный радиус области питания котлована; $\zeta_{пл}$ — дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенного котлована (пластового дренажа); остальные обозначения см. на рис. 51, которые аналогичны обозначениям для траншеи, показанным на рис. 49. Отличие состоит в том, что к котловану фильтрационный поток движется радиально (осесимметрично), то есть грунтовая вода притекает горизонтально со всех сторон.

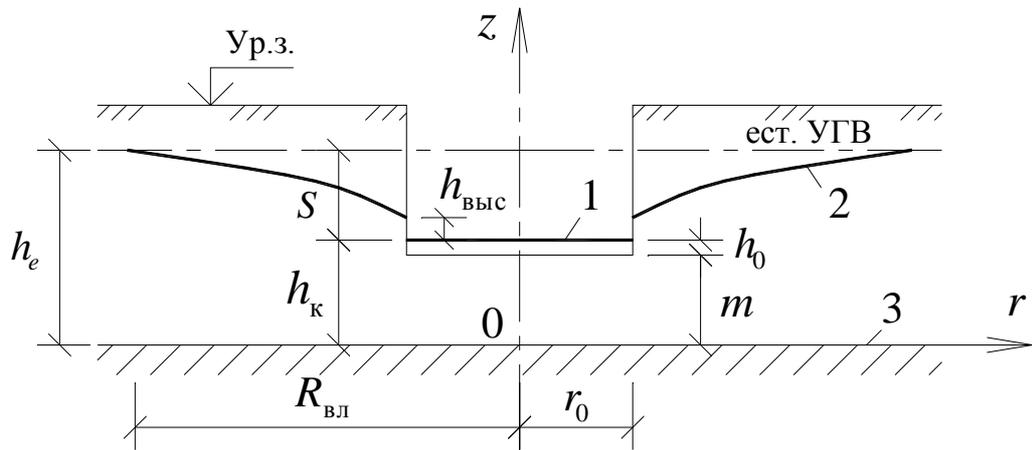


Рис. 51. Несовершенный котлован круглой в плане формы и грунтовые воды: 1 — уровень воды в котловане; 2 — кривая депрессии УГВ; 3 — водоупор

Нелинейное моделирование с помощью МКР-Excel (МЭТ) показало, что радиус питания котлована (по расходу) R_t можно рассчитывать по Э.Б. Чекалюку [206; 302], если понижение уровня воды в котловане S не превышает 10-25 % мощности грунтовых вод h_e . В этом случае радиус питания котлована [206; 302]

$$R_t = r_0 + \sqrt{\pi a t}; a = k h_e / \mu, \quad (209)$$

где t — время водоотлива; остальные обозначения см. на рис. 51.

При $S/h_e > (0,1...0,25)$ 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 (МЭТ). Для диапазона нелинейной постановки фильтрации грунтовых вод $0 \leq h_k/h_e \leq 0,8$ авторским методом АДЧМ получена довольно точная полуэмпирическая формула расчетного радиуса питания котлована (по расходу):

$$R_t = r_0 + (0,94 + 0,077 h_k/h_e)(1,72 - 0,016 \ln \tau) \sqrt{at};$$

$$a = kh_e/\mu; \tau = at/r_0^2. \quad (210)$$

Расхождение значений R_t по (210) с результатами нелинейного моделирования МКР-Excel (МЭТ) 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. Гиринского (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 [204, с. 155-156].

Дополнительное фильтрационное сопротивление гидродинамически несовершенного котлована (пластового дренажа) $\zeta_{пл}$ приведено в виде графика в справочном пособии к СНиП [204, с. 172]. Мы пересчитали, уточнили и расширили значения $\zeta_{пл}$ моделированием несовершенного пластового дренажа с помощью метода автора МЭТ. Дискретные эмпирические значения сопротивления $\zeta_{пл}$ в зависимости от степени гидродинамического несовершенства котлована (пластового дренажа) r_0/m приведены в табл. 6.

По данным табл. 6 построен график (рис. 52). Каждая экспериментальная точка на данном графике соответствует тщательно проведенному моделированию тестовых профильных двухмерных задач фильтрации подземных вод в несовершенный котлован (пластовый дренаж)

Экспериментальные значения дополнительного фильтрационного сопротивления гидродинамически несовершенного котлована (пластового дренажа) $\zeta_{\text{пл}}$

r_0/m	0,1	0,2	0,5	0,8	1
$\zeta_{\text{пл}}$	8,87	4,27	1,32	0,648	0,527
r_0/m	2	3	4	5	10
$\zeta_{\text{пл}}$	0,219	0,116	0,09	0,068	0,029

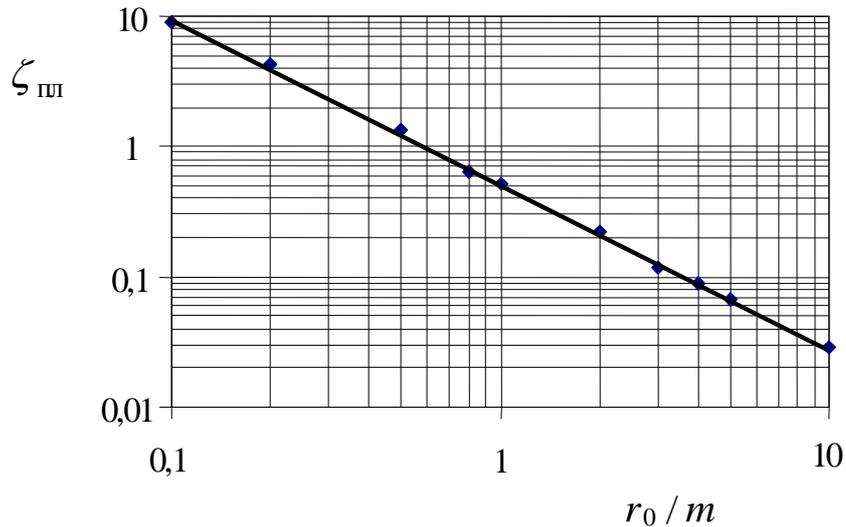


Рис. 52. Дополнительное фильтрационное сопротивление $\zeta_{\text{пл}}$ несовершенного круглого в плане котлована (пластового дренажа) в однослойном пласте

Довольно удобно для расчетов $\zeta_{\text{пл}}$ применять эмпирическую формулу, которая получена автором обработкой данных табл. 6 с помощью средства «Мастер диаграмм» в Excel. Дополнительное фильтрационное сопротивление гидродинамически несовершенного котлована (пластового дренажа)

$$\zeta_{\text{пл}} = \exp[-1,265 \ln(r_0/m) - 0,661], \quad (211)$$

где m — расстояние от водоупора до дна котлована или низа постели пластового дренажа (см. рис. 51). Формула (211) 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 (208) и на моделях МКР-

Excel (МЭТ) оказались менее 2-3 %.

Истинный радиус влияния водоотлива на уровень грунтовых вод (УГВ) $R_{\text{вл}}$ (см. рис. 51) определен для случая минимального фиксируемого понижения УГВ $S_{\text{min}} = 1$ см. Формула для $R_{\text{вл}}$ получена вышеупомянутым комбинированным методом АДЧМ для нелинейной постановки фильтрации грунтовых вод при $0 \leq h_{\text{к}}/h_{\text{е}} \leq 0,8$. Истинный радиус влияния на УГВ водоотлива из круглого в плане котлована

$$R_{\text{вл}} = r_0 + (1 - 0,157 h_{\text{к}}/h_{\text{е}})(4,12 - 0,1 \ln \tau) \sqrt{at};$$

$$a = kh_{\text{е}}/\mu; \tau = at/r_0^2. \quad (212)$$

Формула (212) прошла независимую проверку на двухмерной модели фильтрации грунтовых вод в нелинейной постановке (см. пример 67 в [262]) и показала удовлетворительное качество для целей моделирования фильтрации грунтовых вод малой мощности, соизмеримой с понижениями УГВ в дренажных, водоотливных и водопонизительных системах.

Гидродинамическое несовершенство котлована в (210) и (212) можно учесть введением вместо $h_{\text{к}}$ величины эквивалентного напора в котловане $h_{\text{к}*}$ как в формуле (202) для несовершенной траншеи. Приравняем водопритоки в совершенный и несовершенный круглый в плане котлован:

$$\frac{\pi k (h_{\text{е}}^2 - h_{\text{к}*}^2)}{\ln(R_t/r_0)} = \frac{\pi k (h_{\text{е}}^2 - h_{\text{к}}^2)}{\ln(R_t/r_0) + \zeta_{\text{пл}}},$$

откуда выразим эквивалентный напор в несовершенном котловане в виде

$$h_{\text{к}*} = \sqrt{h_{\text{е}}^2 - \frac{(h_{\text{е}}^2 - h_{\text{к}}^2) \ln(R_t/r_0)}{\ln(R_t/r_0) + \zeta_{\text{пл}}}}. \quad (213)$$

Вычисленное по (213) значение $h_{\text{к}*}$ надо подставлять в (210) и (212) вместо $h_{\text{к}}$ при расчете водоотлива из гидродинамически несовершенного котлована.

Реальная кривая депрессии вблизи котлована подходит к его стенке

выше уровня воды на величину участка высачивания $h_{\text{выс}}$ (см. рис. 51), который для котлованов при $h_0 = 0$ м приближенно можно найти по формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной (204), где приток грунтовых вод на погонный метр ширины стенки котлована можно найти так:

$$q = Q / (2 \pi r_0). \quad (214)$$

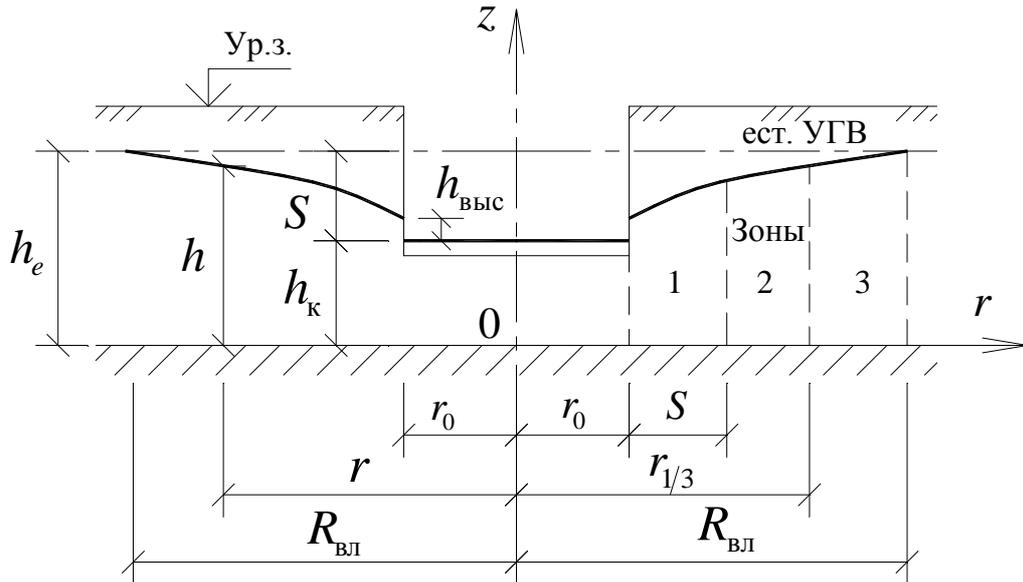


Рис. 53. К построению кривой депрессии УГВ при водоотливе из круглого в плане котлована

При моделировании (нелинейные МЭТ-модели в 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. 53).

В 1-й зоне (см. рис. 53), 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]:

$$h = h_k + \left[(r_0 + S - r) / S \right]^2 + S \sqrt{\frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_t/r_0)}}, \quad (215)$$

в которой расчетный, переменный во времени, радиус питания котлована (по расходу) R_t следует определять по формуле (210).

Во 2-й зоне (см. рис. 53), в пределах $(r_0 + S) \leq r \leq r_{1/3}$, где $r_{1/3} = (1/3)R_{\text{вл}}$, экспериментальная кривая депрессии почти совпадает с кривой по Дюпюи (погрешность по уровням менее 3 %) и ее ординаты выражаются в виде:

$$h = h_k + S \sqrt{\frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_t/r_0)}}. \quad (216)$$

В 3-й зоне (см. рис. 53), в пределах $r_{1/3} \leq r \leq R_{\text{вл}}$, кривая депрессии УГВ постепенно выходит на естественный уровень грунтовых вод с напором h_e . Ординаты кривой депрессии можно определить по следующей полуэмпирической формуле:

$$h = h_{1/3} + (h_e - h_{1/3}) \sqrt{\frac{\ln(r/r_{1/3})}{\ln(R_{\text{вл}}/r_{1/3})}}, \quad (217)$$

в которой истинный радиус влияния водоотлива R_t следует находить по формуле (212), а напор $h_{1/3}$ на контакте 2-й и 3-й зон можно определить так:

$$h_{1/3} = h_k + S \sqrt{\frac{\ln[R_{\text{вл}}/(3r_0)]}{\ln(R_t/r_0)}}. \quad (218)$$

В условиях тесной городской застройки траншеи и котлованы часто сооружают с креплением стенок или вообще методом «стена в грунте». Это создает техногенную неоднородность с пониженной проницаемостью в водоносном пласте, примыкающем к строительной выемке. При засыпке пазух выемок хорошо проницаемым грунтом возникает техногенная неоднородность, наоборот, приводящая к усилению подтопления подземной части здания или сооружения в случае бессточных пазух. Рассмотрим несколько характерных фильтрационных задач по движению подземных вод:

- к траншеям и котлованам с креплением «стена в грунте»;
- к траншеям и котлованам со свайным креплением;
- в пазухи строительных выемок.

Рассмотрим вытянутый в плане котлован со «стеной в грунте» при наличии напорных подземных вод (НПВ). Расчетная схема котлована показана на рис. 54.

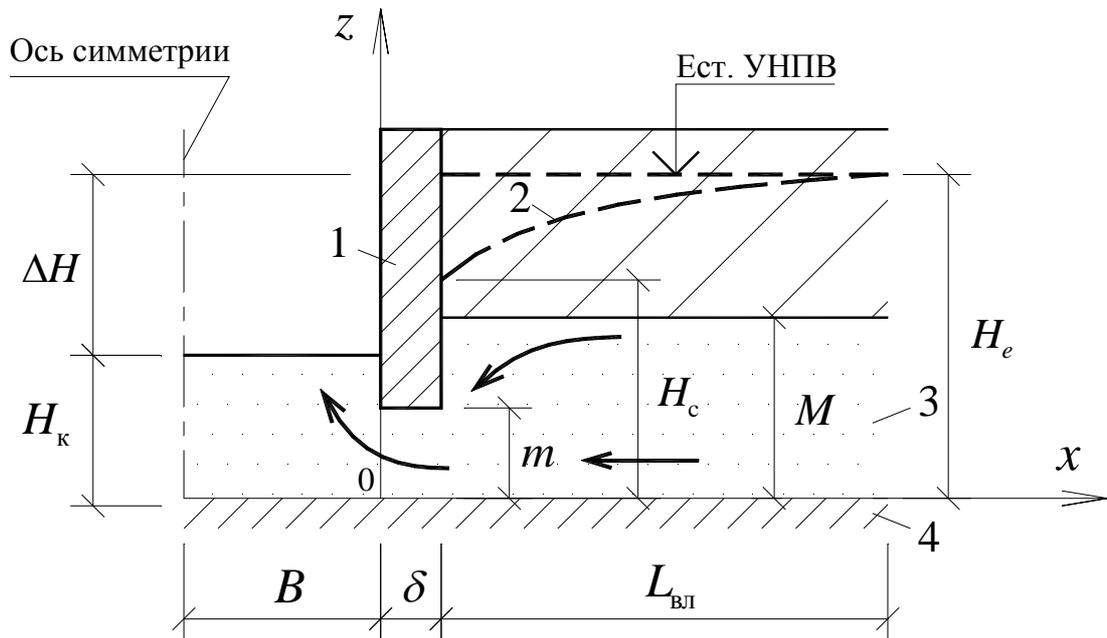


Рис. 54. Расчетная схема фильтрации НПВ к котловану с ограждением: 1 — «стена в грунте»; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — водоупор

Под «стеной в грунте» происходит обходная фильтрация с выходом в днище котлована. Для учета обтекания фильтрационного потока под «стеной в грунте» толщиной δ воспользуемся методом эквивалентных фильтрационных сопротивлений [11; 31].

Преобразуем двухмерный фильтрационный поток в разрезе к одномерному. Для этого заменим «стену в грунте» (см. рис. 54) на эквивалентную слабопроницаемую завесу такой же толщины δ с коэффициентом фильтрации k_* , отличным от коэффициента фильтрации напорного пласта k , как показано на рис. 55.

После такого преобразования котлован считаем гидродинамически со-

$$\xi_3 = \frac{1}{k} \left(\frac{L_{\text{вл}}}{M} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M} \right),$$

где обозначения см. рис. 54.

С другой стороны, фильтрационный расход по приведенной схеме (см. рис. 55)

$$q = \frac{\Delta H}{\zeta_1 + \zeta_2}, \quad (220)$$

где ζ_1, ζ_2 — фильтрационные сопротивления зон соответственно длиной δ и $L_{\text{вл}}$ по рис. 55.

Значения ζ_1 и ζ_2 по [13] имеют вид

$$\zeta_1 = \frac{\delta}{Mk_*}; \quad \zeta_2 = \frac{L_{\text{вл}}}{Mk}.$$

Приравнявая выражения расходов по (219) и (220), после несложных выкладок получим формулу для определения коэффициента фильтрации эквивалентной завесы в виде

$$k_* = \frac{\delta k}{M} \left[\frac{H_k - m}{B} + \frac{\delta}{m} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sin \frac{\pi m}{2M} \cdot \text{sh} \frac{\pi m}{2B} \right) \right]^{-1}. \quad (221)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{\eta a} \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq \delta; \quad \eta = k_*/k; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq \infty; \quad a = kM/\mu, \end{aligned} \quad (222)$$

где H_1 и H_2 — напоры соответственно в завесе и пласте; t — время от начала водоотливных работ; μ — коэффициент водоотдачи грунта; остальные обозначения см. на рис. 55.

Краевые условия следующие:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) = H_2(x, 0) = H_e; H_1(0, t) = H_k; \\ H_1(\delta, t) = H_2(\delta, t); \eta \frac{H_1(\delta, t)}{\partial x} = \frac{H_2(\delta, t)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (223)$$

Применим преобразование Лапласа по времени t [70; 71; 94; 95] к выражениям (222) и (223). Решение (222) и (223) в изображениях \bar{H}_1 и \bar{H}_2 по Лапласу известно [129], его мы перепишем для зоны $0 \leq x \leq \delta$ в пределах завесы так:

$$\begin{aligned} \bar{H}_1 = \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_k}{p} \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) \left\{ 1 - \beta \frac{\exp\left(x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) - \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right)}{\exp\left(\delta \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right) - \beta \exp\left(-\delta \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right)} \right\}; \\ \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}; \end{aligned} \quad (224)$$

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_c при $x = \delta$ (см. рис. 54).

Точное решение аналогичной задачи получено в теории теплопроводности [129] и имеет вид

$$H_1 = H_e - \Delta H \left[\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\eta at}} - \beta \sum_{n=1}^{\infty} \beta^{n-1} \left(\operatorname{erfc} \frac{2n\delta - x}{2\sqrt{\eta at}} - \operatorname{erfc} \frac{2n\delta + x}{2\sqrt{\eta at}} \right) \right], \quad (225)$$

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 (224), 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 [103] имеем приближенное решение для определения неустановившихся напоров в зоне завесы $0 \leq x \leq \delta$, которое выглядит так:

$$H_1 = H_e - \Delta H (1 - \beta) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\eta at}}. \quad (226)$$

Изменяющийся во времени (нестационарный) напор H_c на внешней стороне «стены в грунте» (см. рис. 54), то есть при $x = \delta$, по (226) записывается в виде

$$H_c = H_e - \Delta H (1 - \beta) \operatorname{erfc} \frac{\delta}{2\sqrt{\eta at}}. \quad (227)$$

Сопоставительный анализ формул (225) и (227) при разложении в ряды функции дополнительного интеграла вероятности $\operatorname{erfc}(z)$ показал, что последняя является тоже точной, но выгодно отличается от (225) своей простотой.

Нестационарный напор в водоносном пласте H_δ при $x = \delta$, но без «стены в грунте», выписываем из (227) с учетом, что в однородном пласте величины $\beta = 0$ и $\eta = 1$. Тогда имеем известную формулу [48, 194, 195]

$$H_\delta = H_k + \Delta H \operatorname{erf} \frac{\delta}{2\sqrt{at}}. \quad (228)$$

Нестационарный водоприток на 1 м^2 дна котлована со «стеной в грунте» q_* найдем, дифференцируя по x точное решение (225) с умножением на $k_* M/B$, то есть применяя закон Дарси. В результате получим формулу вида

$$q_* = \frac{k_* M \Delta H}{B \sqrt{\pi \eta at}}, \quad (229)$$

где все обозначения прежние и которая является точной.

Нестационарный водопиток на 1 м^2 дна котлована без «стены в грунте» q получим из (229) при $\eta = 1$, заменив k_* на k , в виде [6, 147, 194]

$$q = \frac{kM\Delta H}{B\sqrt{\pi at}}. \quad (230)$$

В достаточно короткий срок после начала водоотлива в вытянутом котловане со «стеной в грунте» (см. пример 48 в [262]) напор с внешней стороны «стены» быстро устанавливается до некоторого квазистационарного значения H_c (см. рис. 54). Поэтому зону влияния водоотлива $L_{\text{вл}}$ в напорном пласте можно приближенно определить по формуле (I.64) [76, с. 37]. Большие возмущения напоров грунтовых вод, когда $\Delta H/h_e$ превышает 10-25 %, встречаются довольно часто в практике городского строительства. Такой случай обычно наблюдается в грунтовых водах малой мощности, которая соизмерима с вертикальными размерами строящегося сооружения или с величиной возмущения уровня грунтовых вод. Тогда зону влияния водоотлива $L_{\text{вл}}$ в грунтовых водах можно найти по нашей формуле (201), полученной с помощью метода автора АДЧМ — автомодельных движений с численным моделированием.

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. 56).

При условии сохранения постоянства напора в напорном пласте для схемы на рис. 56 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 водопиток $q_{\text{в}}$ на 1 м^2 дна котлована со «стеной в грунте» по Н.Н. Павловскому можно было бы найти по формуле:

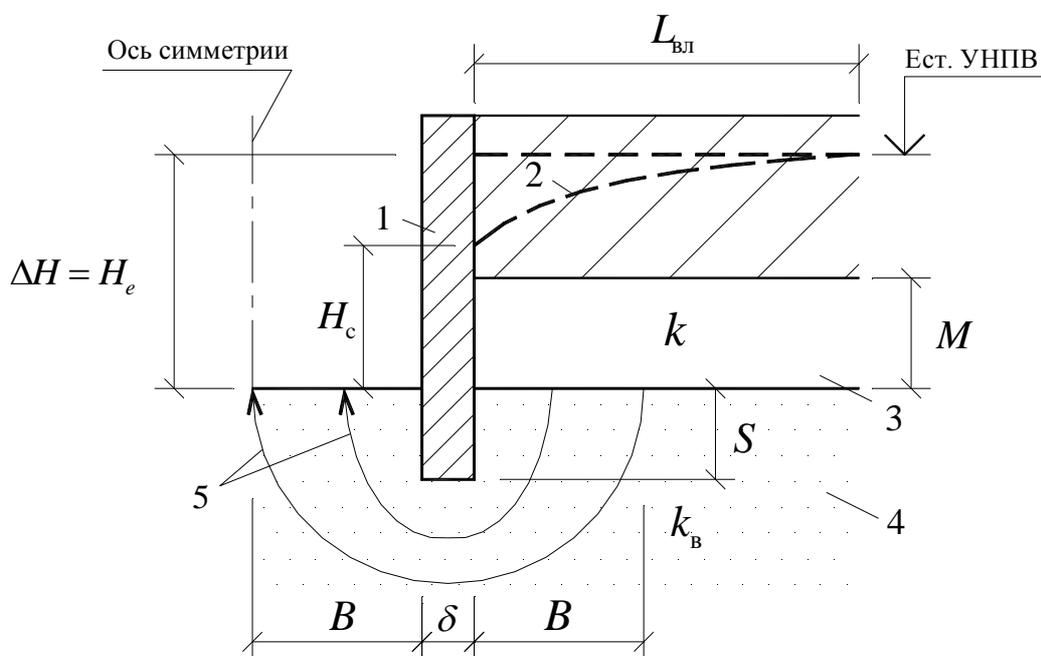


Рис. 56. Схема фильтрации НПВ к котловану: 1 — «стена в грунте»; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — относительный водоупор с коэффициентом фильтрации k_B ; 5 — линии тока фильтрационного потока в котлован

$$q_B = \frac{k_B \Delta H}{\pi B} \ln \left[\frac{B}{S} + \sqrt{\left(\frac{B}{S}\right)^2 + 1} \right], \quad (231)$$

где k_B — коэффициент фильтрации грунта относительного водоупора, подстилающего напорный пласт; ΔH — разность напоров в пласте и котловане; остальные обозначения показаны на рис. 56.

Но применить формулу (231) для нашего случая непосредственно нельзя, так как условие постоянства напора в напорном пласте не сохранится, а будет образовываться кривая депрессии (см. рис. 56).

Для изучения нестационарной фильтрации воды в данной задаче перейдем к расчетной схеме слабопроницаемой завесы (см. рис. 55) толщиной δ с коэффициентом фильтрации k_* , которая эквивалентно заменяет непроницаемую «стену в грунте» толщиной δ , причем учитывает обтекание под «стеной». Поэтому на рис. 55 грунт, подстилающий напорный пласт, считаем абсолютным водоупором. Найдем k_* .

С одной стороны, водоприток НПВ через завесу в котлован на 1 м^2 его дна

$$q_* = \frac{k_* M \Delta H}{\delta B},$$

с другой стороны, этот же водоприток можно найти по (231). Тогда из равенства водопритоков выразим коэффициент фильтрации эквивалентной завесы, заменяющей «стену в грунте», который определим в виде

$$k_* = \frac{k_B \delta}{\pi M} \ln \left[\frac{B}{S} + \sqrt{\left(\frac{B}{S}\right)^2 + 1} \right]. \quad (232)$$

Зависимость, напоминающую нашу (232), получил В.П. Недрига [162], но у него вместо B подставлена длина плоского непроницаемого флютбета плотины, что для наших условий не подходит.

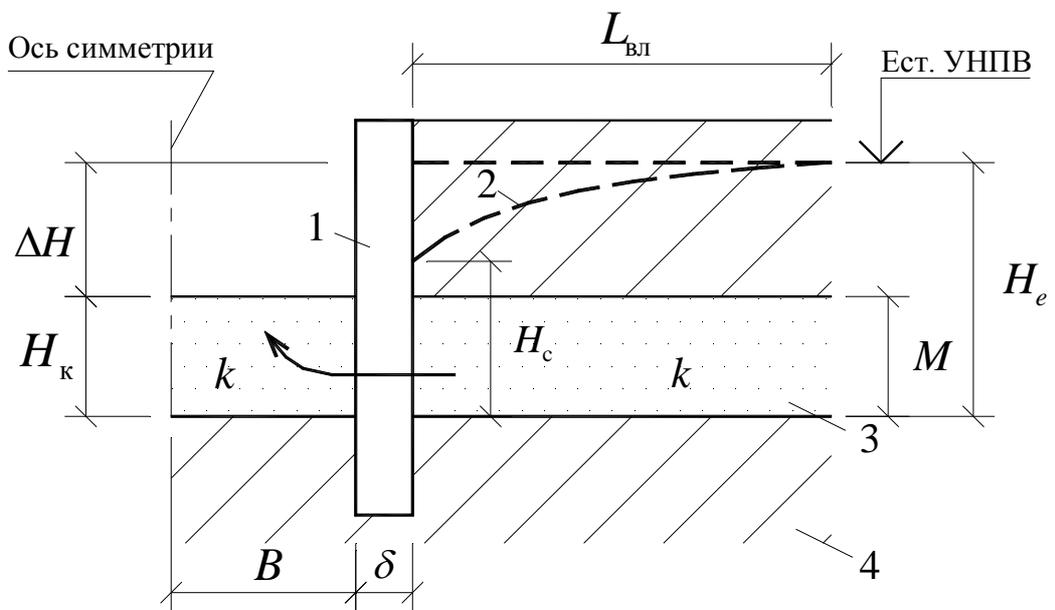


Рис. 57. Фильтрация НПВ к котловану: 1 — свайное крепление; 2 — кривая депрессии УНПВ; 3 — напорный пласт; 4 — водоупор

Таким образом, для исследования нестационарной фильтрации воды в котлован, защищенный «стеной в грунте», при наличии относительного водоупора можно вновь применить зависимости (227), (229), (230), в которых k_* подставлять по (232). Расчет зон влияния для напорных и грун-

товых вод оговорен выше в данном параграфе (см. также пример 49 в [262]).

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. 57).

Для проведения расчетов водоотлива из такого котлована при нестационарной и стационарной фильтрации опять удобно перейти к схеме гидродинамически совершенного котлована, огражденного завесой (см. рис. 55). 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:

$$k_* = \frac{\delta}{M} \left[\frac{\delta}{k_c M} - \frac{2}{\pi k} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi H_k}{2B} \right]^{-1}, \quad (233)$$

где δ — характерный размер свай и он же толщина эквивалентной завесы; M — мощность напорного пласта (см. рис. 57); B — полуширина котлована; H_k — напор в котловане; k_c — коэффициент фильтрации свайного ряда.

Формулу для определения величины k_c позаимствуем из нашей работы

[260]:

$$k_c = k \left[\frac{1}{1 - \delta/a_c} - \frac{2a_c}{\pi\delta} \ln \sin \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\delta}{a_c} \right) \right]^{-1}, \quad (234)$$

где k — коэффициент фильтрации грунта водоносного пласта; a_c — шаг свай.

После определения k_c и k_* соответственно по (234) и (233) можно найти нестационарный напор перед сваями H_c по (227) и нестационарный водоприток в несовершенный котлован со сваями q_* по (229).

В городском строительстве 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 СНиПами.

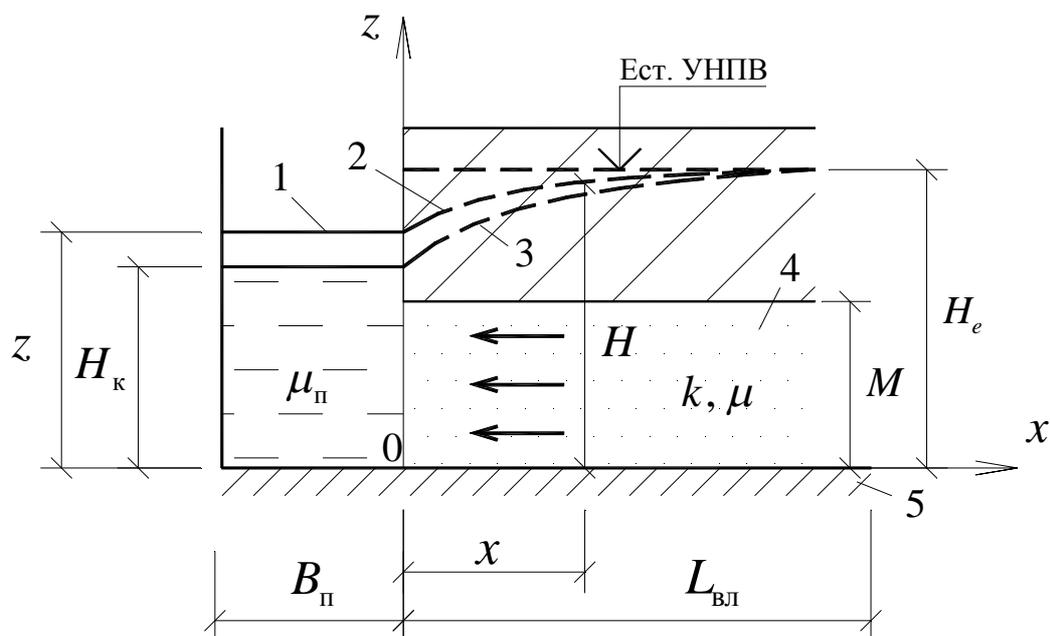


Рис. 58. Схема подтопления пазухи котлована: 1 — уровень воды в пазухе; 2 — промежуточное положение УНПВ; 3 — начальное положение кривой депрессии УНПВ; 4 — напорный пласт; 5 — водоупор

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 вода-

ми можно оценить по нашей методике, полученной в ходе исследований по защите от подтопления Омского метрополитена в 1992 г. [202].

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 схема процесса подтопления вытянутой в плане пазухи представлена на рис. 58. Вначале рассмотрим напорные подземные воды (НПВ).

Ход рассуждений проведем по аналогии с работой О.В. Холопова [299], но для случая напорной фильтрации.

При прекращении водоотлива и засыпке пазух в начальный момент времени $t = 0$ пусть напор в пазухе имеет величину H_K (см. рис. 58). 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

$$\frac{q}{B_{\Pi}} = \mu_{\Pi} \frac{dz}{dt}, \quad (235)$$

где μ_{Π} —недостаток насыщения грунта пазухи; B_{Π} — ширина пазухи; остальные обозначения см. на рис. 58.

Согласно методу последовательной смены стационарных состояний [195] водоприток НПВ в пазуху

$$q = \frac{kM(H_e - H)}{L_t - x}, \quad (236)$$

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

$$H = H_e - \frac{q}{kM}(L_t - x), \quad (237)$$

где q — расход, меняющийся во времени t .

Положив в (236) $x = 0$ и $H = z(t)$, найдем первое приближение расхода

$$q_{(1)} = \frac{kM(H_e - z)}{L_t}. \quad (238)$$

Подставим (238) в (235), разделим переменные и проинтегрируем. Получим

$$-\frac{\mu_{\text{п}} B_{\text{п}} L_t}{kM} \ln(H_e - z) = t + C,$$

где C — постоянная интегрирования, которую определяем при помощи начального условия $t = 0, z = H_{\text{к}}$.

Тогда имеем в первом приближении решение в виде

$$t_{(1)} = \frac{\mu_{\text{п}} B_{\text{п}} L_t}{kM} \ln \frac{H_e - H_{\text{к}}}{H_e - z}.$$

Уточним это решение до второго приближения. Для него расход составляет

$$q = q_{(1)} - \mu \int_0^{L_t} \frac{\partial H_{(1)}}{\partial t} dx, \quad (239)$$

где $H_{(1)}$ — напор в первом приближении; μ — коэффициент водоотдачи грунта напорного пласта.

Найдем первое приближение напорной линии с помощью подстановки (238) в (237), откуда

$$H_{(1)} = z + \frac{x(H_e - z)}{L_t}.$$

Последнее выражение используем в (239), а в результате получившийся расход q подставим в (237) и, повторяя выкладки с интегрированием, окончательно получим решение во втором приближении для определения времени подъема уровня воды в пазухах вытянутых котлованов:

$$t = \frac{2\mu_{\text{п}}B_{\text{п}}L_t + \mu L_t^2}{2kM} \ln \frac{H_e - H_{\text{к}}}{H_e - z}. \quad (240)$$

Решение (240) можно разрешить относительно вертикальной координаты поднимающегося в пазухе уровня воды в виде

$$z = H_e - (H_e - H_{\text{к}}) \exp \left[- \frac{2\tau}{2(\mu_{\text{п}}/\mu)(L_t/B_{\text{п}}) + (L_t/B_{\text{п}})^2} \right];$$

$$\tau = at/B_{\text{п}}^2; a = kM/\mu. \quad (241)$$

Формула (241) при $\tau \leq 250$ имеет погрешность менее 5 %, что проверено нелинейным моделированием с помощью МКР-Excel (метод МЭТ). 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 (240)–(241) следует вместо мощности напорного пласта M положить естественную мощность грунтовых вод h_e . Расчетную длину области питания L_t можно определить в зависимости от времени продолжительности водоотлива t по (200).

Отметим, что для грунтовых вод аналогичную задачу решил О.В. Холопов [299], причем у него было принято $\mu_{\text{п}} = 1$, 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 линейаризованные постановки гидравлической теории фильтрации [147].

Формулы (240)–(241) кроме рассмотренного случая подтопления пазух котлованов можно использовать для расчета подпора дренажной сис-

темы 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. Системы строительного водопонижения подразделяются на следующие [15; 46; 60; 73; 78; 99; 124; 180; 230; 271]:

- установки водопонижения с открытыми гравитационными скважинами (сообщающимися с атмосферой);
- установки вакуумного водопонижения (с иглофильтрами и эжекторами);
- 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, когда фильтрационные и гидроаэродинамические расчеты необходимо решить совместно. Общая технология расчетов водопонижения может быть принята с учетом вводных понятий, приведенных в п. 3.1.

Для проведения расчетов по водопонижению в качестве исходных данных нужно подобрать материалы об изучаемой площадке по гидрогеоло-

гии, 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. Согласно нормативным документам [234], 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 [60].

Основные формулы по фильтрационным расчетам водопонизительных систем из гравитационных скважин (открытых в атмосферу) приведены в справочном пособии к СНиП [204]. Такие системы с гравитационными скважинами относят к обычным способам строительного водопонижения [60]. Методики расчета водопонижения гравитационными скважинами разработали Н.Е. Жуковский [79], Ф. Форхгеймер [297; 333], И.П. Кусакин [118], И.А. Чарный [301], С.Ф. Аверьянов [4], В.И. Аравин [9], А.В. Романов [217], С.К. Абрамов [1], В.М. Григорьев [61], Л.Н. Воробков, В.М. Гаврилко, П.В. Лобачев и В.М. Шестаков [46], Л.Н. Павловская и В.М. Шестаков [180], Н.Н. Веригин [43], Г.М. Мариупольский [133], Ф.М. Бочеввер [174], В. Кнаупе [99] и др. В обобщающей статье [163] 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».

Методики фильтрационных расчетов для водопонижительных систем из гравитационных скважин обобщены и внесены в СНиП [234]. Примеры расчета приведены в руководстве [219] и справочнике проектировщика [172].

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 [195].

Однако С.Ф. Аверьянов [6, с. 177] достаточно убедительно доказал, что принцип сложения течений для грунтовых вод справедлив, если возмущение УГВ Δh незначительно отличается от первоначальной естественной мощности грунтовых вод h_e . В.М. Шестаков [315] указал, что этот принцип справедлив при отношении $\Delta h/h_e$ не более 10-20 %. А.Ж. Муфтахов проанализировал целый класс гидродинамических решений по грунтовым водам [152] и нашел, что для применения линеаризованной гидравлической теории фильтрации по Буссинеску возмущение УГВ не должно превышать 5-10 % отношения $\Delta h/\xi$, где ξ — характерный размер области фильтрации. Этот критерий использован в справочном пособии к СНиП [204].

Таким образом, стандартные методики фильтрационных расчетов систем гравитационных водопонижительных скважин имеют достаточно жест-

кое ограничение в случае осушения грунтовых вод: если понижение УГВ Δh 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 не справедлив. Поэтому фильтрационная задача становится нелинейной. В условиях однородного пласта грунтовых вод малой мощности h_e ее постановку можно описать обобщенным уравнением Буссинеска (18).

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 водотлива 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 [60]. Позднее Р.Н. Арутюнян издал книгу [15], обобщившую его исследования по вакуумному водопонижению с помощью эжекторных скважин. До этих исследователей методические рекомендации в виде статей представили М.Е. Альтовский (1946), С.В. Комиссаров (1955), Г.М. Мариупольский (1960), П.М. Петухов (1939) и др.

Опубликованные методики фильтрационных расчетов вакуумного во-

допонижения 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 [195]. Это означает, что их область применения ограничена понижениями УГВ не более 10-25 % от естественной мощности грунтовых вод.

Поэтому при нелинейной постановке уравнений фильтрации некоторое уточнение существующих методик расчета систем вакуумного водопонижения также может быть достигнуто с помощью наших формул из данного 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 γ — удельный вес воды, 10000 Н/м^2 [249]. 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 разработывали Г.М. Ломизе и А.В. Нетушил [124], Г.М. Мариупольский [134]. Краткие методические рекомендации приведены в руководстве [219, с. 39-40 и 79], а также у В. Кнаупе [99, с. 321-326], причем последний автор отметил, что «при сложных схемах расположения электродов необходимо переходить на модельные исследования». Дополнительные сведения по электроосмосу и связанным с ним дифференциальным уравнениям фильтрации приведены в п. 2.1.4.

Заметим, что фильтрационный расчет электроосмотического водопонижения еще труднее поддается аналитическому решению, поэтому его целесообразнее моделировать и, на наш взгляд, весьма удобно с помощью МКР-Excel (разновидности метода автора МЭТ).

Рекомендации по расчету строительного водопонижения:

1) в случае понижений УГВ меньше 10-25 % от естественной мощно-

сти 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. п. 5.3).

Методики аналитического расчета дренажей, применяемых в городском строительстве, достаточно подробно изложены в справочном пособии к СНиП [204]. Расчетные методики [204] в основном построены в рамках линеаризованных постановок по I или II способу уравнения Буссинеска гидравлической теории фильтрации. Так же, как и 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 метод МЭТ — МКР-Excel (см. п. 5.3).

Приведем наши решения [259; 264] по расчету двухлинейных и кольцевых дренажей с учетом устройства свайных фундаментов и появления других зон неоднородности под зданиями и сооружениями. Настоящая работа позволила выяснить, что зоны пониженной проницаемости влияют на уровни грунтовых вод гораздо больше, чем это предполагалось ранее.

Установившееся положение кривой депрессии уровня грунтовых вод (УГВ) при устройстве совершенного двухлинейного ($\alpha = 0$) или кольцевого ($\alpha = 1$) дренажа с учетом зоны пониженной проницаемости под зданием или сооружением (рис. 59) можно определить по формулам [264]:

$$h_1 = \left\{ \frac{\omega}{2^\alpha k} \left[\xi_0^2 + \xi_*^2 (\eta^{-1} - 1) - \xi^2 \eta^{-1} \right] \right\}^{0,5}; \quad 0 \leq |\xi| \leq \xi_*;$$

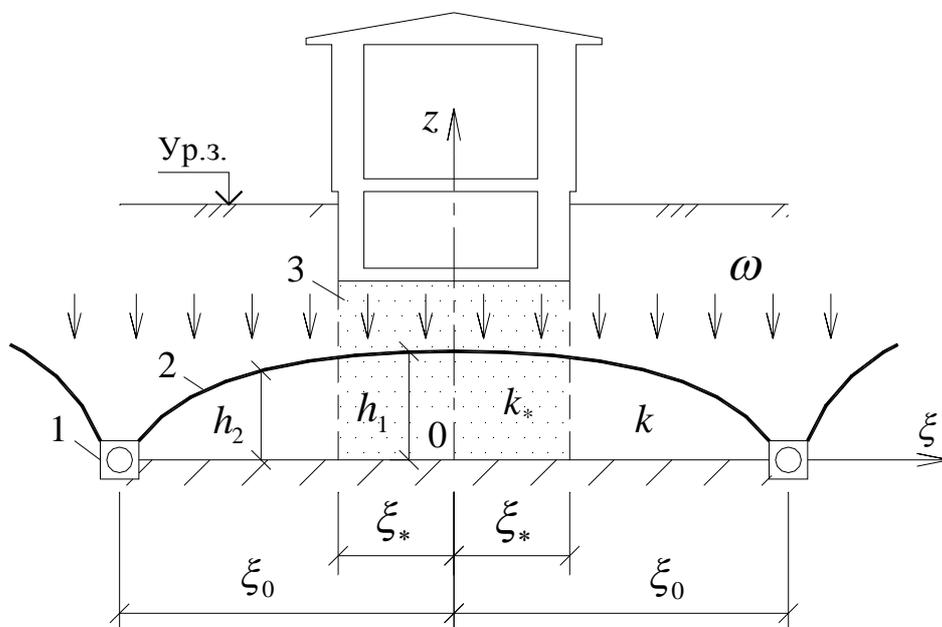


Рис. 59. К расчету совершенного двухлинейного или кольцевого дренажа: 1 — дрена; 2 — кривая депрессии; 3 — зона пониженной проницаемости

$$h_2 = \left[\frac{\omega}{2^\alpha k} (\xi_0^2 - \xi^2) \right]^{0,5}; \quad \xi_* \leq |\xi| \leq \xi_0; \quad \eta = k_*/k, \quad (242)$$

где h_1 и h_2 — напоры и одновременно вертикальные отметки кривой депрессии УГВ при работе дренажа в режиме установившейся фильтрации, которые отсчитываются от водоупорной подошвы, м; ω — 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; η — относительная проницаемость; ξ — обобщенная горизонтальная координата, для двухлинейного дренажа $\xi = x$ при $\alpha = 0$, для кольцевого дренажа $\xi = r$ при $\alpha = 1$; ξ_0 — размер дренажа в плане, соответственно $\xi_0 = L_0$ при $\alpha = 0$ и $\xi_0 = R_0$ при $\alpha = 1$; ξ_* — размер зоны пониженной проницаемости в плане, соответственно $\xi_* = L_*$ при $\alpha = 0$ и $\xi_* = R_*$ при $\alpha = 1$.

Формула (242) пригодна для любых соотношений понижений УГВ и

мощности водоносного пласта. Она является точной в рамках нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации [195]. Кроме двухлинейных и кольцевых дренажей она может быть использована и для расчета пристенных дренажей зданий.

При расчете дренажей по традиционным методикам [204] 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 [264]:

$$\eta < \bar{\xi}^2 (0,1025 + \bar{\xi}^2)^{-1}; \quad \bar{\xi} = \xi_*/\xi_0, \quad (243)$$

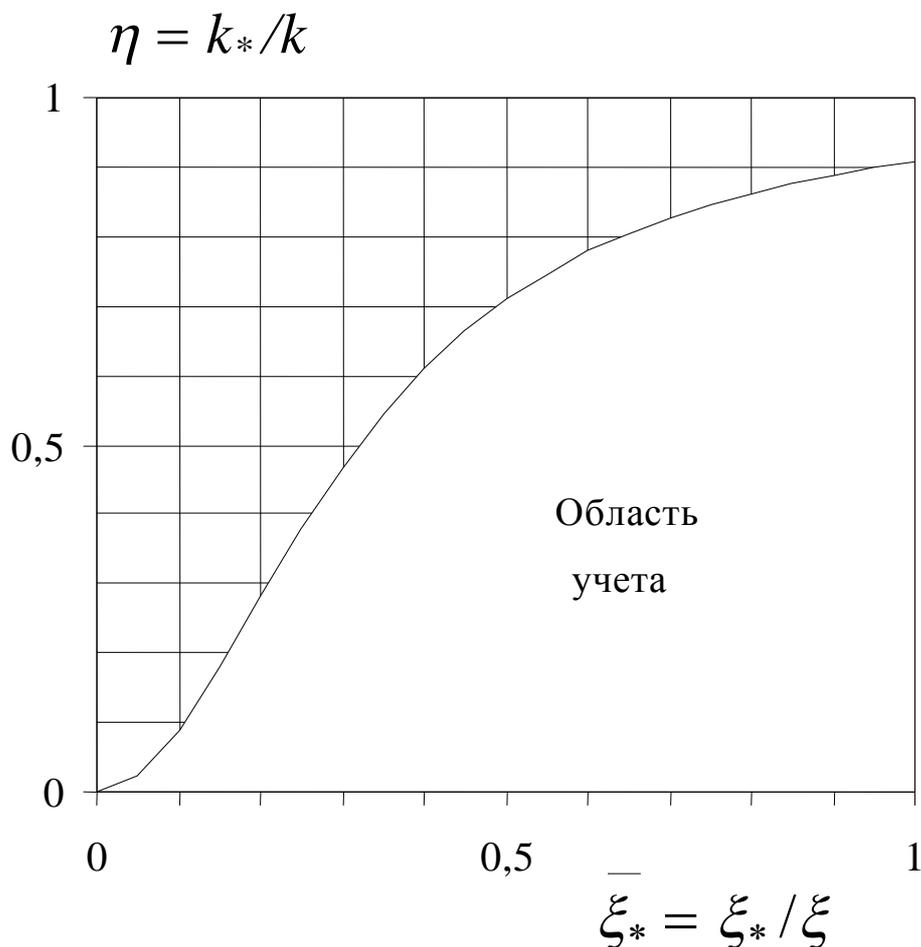


Рис. 60. Область учета зон пониженной проницаемости при расчете двухлинейных и кольцевых дренажей

где $\bar{\xi}_*$ — относительный размер зоны пониженной проницаемости в дренируемой области. Если критерий (243) 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. 60. Для этого предварительно вычисляют относительный размер $\bar{\xi}_*$ и относительную проницаемость η зоны грунта под строящимся зданием или сооружением. По этим двум координатам находят некоторую точку на графике рис. 60. Если точка попала внутрь области учета, то прогноз работы дренажа строящегося объекта следует производить по формуле (243), или даже применить моделирование по методу автора МЭТ (см. гл. 4–5). Моделирование необходимо, если объект имеет сложную конфигурацию в плане, если грунт анизотропный (например, лёсс), если требуется прогнозирование влияния технологии устройства дренажа при нестационарном режиме фильтрации в ходе выполнения строительных работ в соответствии с календарным графиком и т.д.

Методика прогнозного расчета дренажа с учетом устройства свайных фундаментов проиллюстрирована в [262] (пример 51). Данный пример расчета в нашей монографии, проведенный для строящегося дома в г. Называевске Омской области, показывает, что ошибки в определении прогнозного уровня грунтовых вод (УГВ) при работе дренажа могут быть довольно большими. В частности, для объекта строительства в данном примере, прогноз по традиционной методике [204] без учета изменения проницаемости под зданием приводит к занижению кривой депрессии при работе дренажа на 0,6 метра, что является довольно существенной ошибкой прогноза, так как данная ошибка занижения УГВ идет не в запас надежности работы дренажа. И наоборот, прогноз по нашей методике, произведенный по формуле (242), дает достоверные значения УГВ в установившемся режиме фильтрации грунтовых вод малой мощности под зданием.

3.5. Прогнозы испарения и инфильтрации воды с УГВ

В городском строительстве на испарение с УГВ влияют следующие микроклиматические 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. Кроме С.Ф. Аверьянова, испарение с УГВ в условиях сельскохозяйственных территорий, изучали П.Я. Полубаринова-Кочина с соавторами [196], И.С. Пашковский с соавторами [315], которые использовали степенную формулу С.Ф. Аверьянова (244), приведенную ниже. С.И. Харченко [298, с. 75] и Ц.Н. Шкиннис [316, с. 94] также для мелиорируемых сельскохозяйственных земель используют другую форму подобной зависимости — экспоненциальную.

Ниже приведены результаты исследований автора по актинометрии, испарению и климату приземной части поверхности городской среды. При этом преследовалась цель составления необходимой инженерной методики прогноза испарения с УГВ под влиянием городского строительства (ГС). Спрогнозировав испарение с УГВ, можно откорректировать величины инфильтрации влаги на поверхность УГВ.

В отечественной климатологии климат городов изучен лучше, чем климат огромных географических пространств [92]. Особенно это характерно для Сибири, гидрометеорологическая изученность которой до сих пор остается слабой [92]. Это связано с тем, что метеостанции устраивают в населенных пунктах [92]. 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 метеорологи-

ческих станций государственной сети, опубликованные в климатических справочниках СССР и России [267–270 и др.], для целей защиты от подтопления в городском строительстве.

Актинометрия изучает различные виды лучистой энергии в природных условиях [107]. Нас интересует влияние солнечной энергии на испарение с поверхности уровня грунтовых вод (УГВ) в городах. Это позволит более обоснованно прогнозировать УГВ при исследовании процессов подтопления и дренирования под влиянием ГС (см. табл. 2).

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 [160]. На основании многочисленных полевых наблюдений С.Ф. Аверьянов [6; 7] дал следующую зависимость для интенсивности испарения влаги с УГВ, $м/сут$:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - z/z_0\right)^n, \quad (244)$$

где ε_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, на 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 [195; 196] 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 [195] в виде

$$z_0 = (1,7 + 0,08T), \quad (245)$$

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

Цельсию.

Более поздние исследования ученых сибирской школы В.С. Мезенцева по гидрологии суши показали, что за величину ε_0 надо принимать максимально возможное испарение с поверхности суши — водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов (ТЭР) испарения [92; 139]. В нашей работе ε_0 понимается именно в этом смысле, однако для удобства использован традиционный термин «испаряемость». Среднемесячную испаряемость ε_0 для равнин Сибири можно определить по климатическим картам [91]. Среднесуточную испаряемость при прогнозах подтопления и моделировании мы 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 функциональных зонах ε_0 может уменьшаться и, наоборот, увеличиваться относительно величины $\varepsilon_{\text{мст}}$, средней по городу и измеренной на городской метеостанции. Испаряемость на конкретном участке застройки можно рассчитать с помощью корректирующих коэффициентов:

$$\varepsilon_0 = K_a K_T K_B \varepsilon_{\text{мст}}, \quad (246)$$

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 [179]. Эндогенная энергия, поступающая к поверхности земли из недр, на 2-3 порядка меньше солнечной энергии [90; 179]. С солнечной энергией по величине сравнимы лишь теп-

ловые потоки зимой от зданий и сооружений — это антропогенное или техногенное тепло [120; 291]. Таким образом, испарение с УГВ зависит от ε_0 , а величина ε_0 сильно зависит от прихода солнечной радиации и от альбедо облучаемой поверхности. Альбедо — это коэффициент отражения суммарной солнечной радиации [91].

Асфальтовые покрытия могут сильно увеличить испарение. Это известно из работ отечественных [306] и зарубежных авторов [120]. Это подтверждается нашими натурными наблюдениями и замерами в Омске.

Вслед за М.И. Будыко [35; 36] и С.И. Харченко [298] запишем приближенное выражение для испаряемости в средних широтах на метеостанции

$$\varepsilon_{\text{мст}} \approx R_{\text{мст}}/L_{\text{исп}}, \quad (247)$$

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 $2,512 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{мм})$ [91].

С другой стороны, испаряемость на конкретном участке застройки

$$\varepsilon_0 \approx R_{\text{уч}}/L_{\text{исп}}, \quad (248)$$

где $R_{\text{уч}}$ — радиационный баланс участка застройки.

Тогда, имея в виду (4) и (5), а также основные обозначения, принятые в климатологии [91], можно записать выражение для коэффициента изменения испаряемости по альбедо в виде

$$K_a = \left[R_K (1 - \alpha_y) / (1 - \alpha_{\text{мст}}) - I \right] / R_{\text{мст}}, \quad (249)$$

где R_K — баланс коротковолновой радиации; α_y — альбедо поверхности земли на участке застройки; $\alpha_{\text{мст}}$ — альбедо поверхности земли на метеостанции; I — эффективное длинноволновое излучение. Все величины, входящие в (6), можно брать по климатическим справочникам типа [267].

Например, альбедо площадки метеостанции в Омске летом $\alpha_{\text{мст}} = 25 \%$. В справочниках по климату СССР (1965-1969) альбедо асфальта дано в пределах $\alpha_{\text{асф}} = 10-30 \%$, например в [267, 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 альbedo влажного и сухого асфальта соответственно $a_{асф} = 5-15 \%$, что почти совпало с известным альbedo влажного и сухого чернозема 5-14 % [267]. По данным ученых США, альbedo влажных автостоянок и дорог на территории этой страны составляет около 5 % [120, с. 54].

Резюмируя, можно утверждать, что испаряемость в радиационно-теплый период года с поверхности влажного асфальта выше на 40-50 % среднего максимально возможного испарения ε_0 для любого города в средних широтах. Этот вывод подробно пояснен примером, приведенным в [262] (пример 7).

Старые растрескавшиеся асфальтовые покрытия могут служить испарителями влаги в городах. Они не обладают водоупорными свойствами. Инфильтрация атмосферной влаги в них, по данным А.Я. Тулаева [285, 286], может достигать значений $2 \cdot 10^{-3}$ м/сут, то есть соизмерима со среднегодовыми величинами дополнительной инфильтрации для городских территорий $10^{-2} \dots 10^{-5}$ м/сут [204]. Максимально возможное испарение с поверхности земли соизмеримо с дополнительной инфильтрацией влаги. Например, в июне в Омске, по нашим расчетам [262], среднемесячное испарение для условий метеоплощадки составляет около 5-6 мм/сут. Для открытых асфальтовых покрытий, находящихся на солнце, оно примерно в полтора раза больше [262, с. 28].

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 ГГИ [288] в виде

$$K_T = (e_{t_T} - e_{200}) / (e_{t_c} - e_{200}), \quad (250)$$

где e_{t_c} — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре почвы на солнце; e_{t_T} — 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 (250), могут быть приняты по климатическим справочникам. Данная формула пригодна для определения среднемесячных значений испаряемости, что удобно при прогнозном моделировании подтопления и дренирования (пример 8 в [262]).

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 °С...+30 °С (результаты были доложены на научно-технической конференции СибАДИ в 1997 г.). Рекомендовано определять коэффициент изменения посуточной испаряемости с учетом формулы Б.В. Давыдова [216] в виде

$$K_T = \left[(e_{t_T} - e_{200}) / (e_{t_c} - e_{200}) \right]^{0,8}, \quad (251)$$

где обозначения прежние, что и для формулы (250).

Коэффициент изменения испаряемости в зависимости от ветрового режима (продуваемости) с учетом [288] можно записать так:

$$K_B = (1 + 0,72V_3) / (1 + 0,72V_{MTC}), \quad (252)$$

где V_{MTC} — скорость ветра по данным метеостанции; V_3 — скорость ветра на конкретном участке застройки, которая может быть рассчитана по аэро-

динамической методике Э.И. Реттера [215]. В примере 9 [262] показано, что испаряемость в безветренной зоне застройки уменьшается в 3 раза.

Таким образом, внутри застройки, где существуют безветренные зоны, находящиеся в тени, с северных сторон домов, суммарное 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 [311], климатическими справочниками типа [267—270], вычисляя значения скоростей ветра между зданий и сооружений [215], можно определить по формулам (244) – (252) значения испарения с уровня грунтовых вод ε . Вычитая эту величину из интенсивности инфильтрационного питания ω 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 испарения с поверхности грунтовых вод ε устраняет неопределенность, связанную с величиной дополнительного техногенного инфильтрационного питания ω [204, с. 70-71].

Расчеты по испарению с поверхности грунтовых вод на конкретном участке строительства целесообразно проводить с помощью моделирования, для чего автор рекомендует использовать метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (метод автора МЭТ). Далее можно откорректировать величины дополнительного инфильтрационного питания грунтовых вод на территории застройки, вычитая из них полученные расчетом значения испарения с УГВ [262].

Конструкции и технологии надземного цикла строительных работ слабо влияют на подтопление территорий (см. табл. 2). Влияние этих разновидностей строительства изучено прогнозом изменения водного

баланса систем «грунтовые воды — зона аэрации — атмосфера» (инфильтрация и испарение) при возведении зданий и сооружений [262].

Методика уточнения испарения и инфильтрации влаги на поверхности грунтовых вод в условиях городского строительства полезна для проектирования долговременных средств защиты от подтопления (дренажей), для прогнозов осушения площадок гидронамыва и т.д.

3.6. Выводы по главе 3

1. Автором разработаны инженерные методики, позволяющие выполнять аналитические прогнозы подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства с учетом усложняющих факторов: грунтовых вод малой и нулевой мощности в нелинейной гидравлической постановке, изменения проницаемости грунтов оснований, с уточнением элементов водного баланса подземных вод систем «грунтовые воды — зона аэрации — атмосфера» (инфильтрация и испарение).

2. Данные авторские методики позволяют в первом приближении прогнозировать влияние разновидностей городского строительства (см. табл. 2) на подтопление и дренирование территорий отдельно по усложняющим факторам (см. рис. 1).

3. После аналитического прогноза подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства автор рекомендует проводить моделирование по его методу МЭГ (см. гл. 4–5), который позволяет учесть усложняющие факторы (см. рис. 1) при их одновременном действии, чтобы затем обоснованно выбрать рациональное сочетание конструктивных и технологических решений с целью достижения защиты от подтопления строящегося объекта и прилегающей территории.

4. Авторский метод моделирования в электронных таблицах

Моделирование защиты от подтопления в нашей стране ведет начало с работ Н.Н. Павловского [183] и Г.Н. Каменского [87]. Подробный обзор становления моделирования в нашей стране и за рубежом до 1980 г. приведен в монографии И.К. Гавич [49]. В последние годы все большее значение приобретает компьютерное моделирование. Поэтому в нашей работе ему уделено наибольшее внимание.

Компьютерное моделирование фильтрации подземных вод на застраиваемых территориях является более точной и достоверной информационной технологией в сравнении с аналитическими методами при решении сложных задач прогнозирования процессов подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования в городском строительстве. Аналитические методы позволяют решать такие задачи максимум в двухмерных постановках, но чаще — одномерных. При этом большинство их базируются на решениях линеаризованных дифференциальных уравнений фильтрации. Напротив, компьютерное моделирование в настоящее время позволяет решать сложнейшие задачи фильтрации, вплоть до нестационарных трехмерных, в неоднородных пористых средах.

В данной главе представлены основы нового метода компьютерного моделирования в электронных таблицах (МЭТ).

Представленный метод моделирования предназначен, прежде всего, для решения сложных задач фильтрации воды и воздуха при проектировании защиты от подтопления в городском строительстве, то есть таких задач, которые не поддаются аналитическому решению или же когда аналитические методы дают слишком грубые оценки реальных процессов подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования.

4.1. 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 своего метода МЭТ.

Моделирование — это замена, отображение или воспроизведение реального объекта моделью с целью изучения на ней поведения и свойств объекта-оригинала [49; 227]. 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.

Моделирование фильтрации, влагопереноса и электроосмоса может быть [12; 38; 49; 127; 148; 194; 195; 313]:

- 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 натуральных условиях. Лотки по форме могут быть плоскими в виде параллелепипеда (плоская в разрезе фильтрация) или сегментные (осесимметричная фильтрация). Подробное описание моделирования фильтрации в грунтовой лотке привел С.Ф. Аверьянов [6]. Физическое моделирование не потеряло значения при исследовании фильтрации жидкости и газа и других родственных процессов для изучения частных эффектов [262].

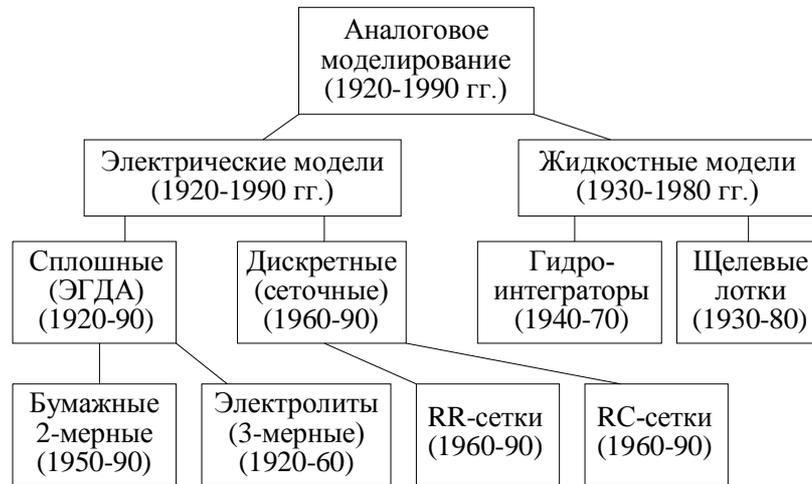


Рис. 61. Классификация аналогового моделирования

Аналоговое моделирование существенно потеснено компьютерным. Однако по аналоговому моделированию за XX век были сделаны огромные наработки [12; 38; 47; 49; 66; 75; 76; 127; 148; 182; 183; 194; 195; 206; 289; 313; 314], которые взаимно дополнили друг друга.

С 1990-х годов идея аналогового моделирования возродилась опять, но в новом качестве компьютерного аналогового моделирования. Известные математические суперпрограммы MatLab и MathCAD снабдили мощными визуальными дополнениями, реализующими идею аналогового моделирования, соответственно: Simulink и MathConnex. Таким образом, появилась возможность опять использовать полезные наработки по опыту аналогового моделирования прошлых лет.

Классификация аналогового моделирования составлена по литературным данным и личному опыту автора и изображена в виде иерархической структуры с исторической хронологией на рис. 61. ЭГДА — это электрогидродинамическая аналогия для моделирования фильтрации. Метод ЭГДА предложен Н.Н. Павловским в 1922 г. [182; 183]. RR-сеточные модели используют электрические сопротивления (резисторы), а RC-сеточные модели — сопротивления с емкостями (конденсаторами) [75; 127].

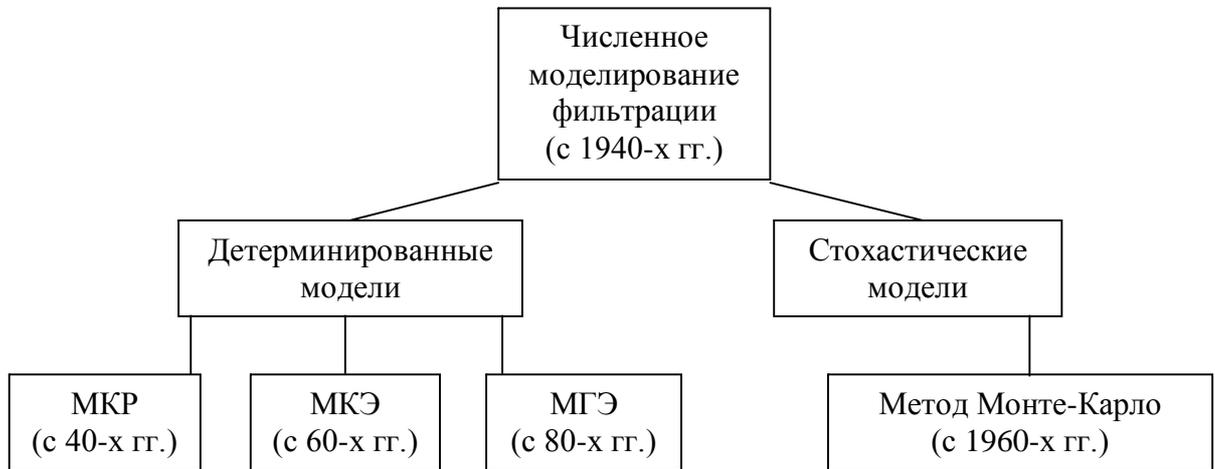


Рис. 62. Классификация численного моделирования

Численное компьютерное моделирование в настоящее время занимает ведущее место над другими методами моделирования при исследовании фильтрационных процессов. Классификация основных методов численного моделирования фильтрации изображена на рис. 62. 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 [169].

В переводе с английского *determined* — определенный. Чем больше полезной информации мы узнаем 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 [49], — 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 [308, 309], В.Н. Эмих [322], В.К. Рудаков [218], С.П. Поздняков [192], Е.С. Дзекцер [28] 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 [192]. Метод Монте-Карло или, по-другому, метод статистических испытаний является основным при построении стохастических моделей [74; 144; 195]. Подробная библиографическая сводка по стохастическому моделированию приведена в книге [206].

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 [33].

Идея метода сеток — МКР — восходит в XVIII век к Леонарду Эйлеру (Euler Leonhard) [69]. 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 [184]. Широкое применение МКР для моделирования нестационарной фильтрации подземных вод началось с 1940-х годов после выхода в свет монографии Г.Н. Каменского [87]. 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 [222; 223; 284]. Особенно важным шагом было введение А.А. Самарским принципа баланса (интегроинтерполяционного 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 метода МЭТ.

Метод конечных элементов (МКЭ) первоначально был применен для решения задач строительной механики стержневых систем, где он является точным методом [82; 275]. Моделирование фильтрации с помощью МКЭ впервые применил О.К. Зенкевич (O.C. Zienkiewicz) [83]. МКЭ известен также под названием «проекционно-сеточный метод» [136]. МКЭ приме-

нен 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. Наш метод МЭТ мы сравнили с МКЭ, используя PDETOOL MatLab. Пример использования PDETOOL приведен в п. 3.3, результаты показаны на рис. 45 – рис. 46.

Метод граничных элементов (МГЭ) называют также методом граничных интегральных уравнений [109]. Название МГЭ предложил К.А. Бреббиа (С.А. Brebbia) [33]. Имеется разновидность МГЭ в виде комплексного метода граничных элементов (КМГЭ) [63]. Эти методы требуют от исследователя сложных математических выкладок. Мы использовали пример одномерной МГЭ-модели из [33, с. 26], где сравнивается численное решение МГЭ с точным. Эту задачу мы решили методом МКР-МЭТ, 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. 7.

Таблица 7

Аргумент x	Результаты МГЭ	Точное решение	Результаты МКР-МЭТ
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-МЭТ не более 0,1 %. Результаты сравнения явно указывают на преимущество авторского метода.

4.2. Метод автора МЭТ и автоматизация моделирования

Метод конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (разновидность МЭТ— МКР-Excel) позволяет моделировать фильтрацию воды и воздуха, фильтрационную консолидацию, влагоперенос и электроосмос при проектировании защиты от подтопления в городском строительстве. Моделировать можно одно-, двух- и трехмерные стационарные и нестационарные процессы в однородных и неоднородных пористых средах.

4.2.1. Информационная технология автора МКР-Excel (МЭТ)

Отсутствие публикаций на русском языке по использованию электронных таблиц для моделирования фильтрации позволяет автору заявить свой приоритет по разработанному методу, опубликованному в 1998 г. [247; 250; 258]. В более поздней публикации В.Д. Орвиса (США) в 1999 г. [170] 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 и влагопереноса применительно к защите от подтопления в городском строительстве. Этот авторский метод не имеет аналогов в мировой практике, поэтому он получил название МКР-Excel (МЭТ) [262].

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

[221]. 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:

- пользователю не обязательно быть программистом;
- электронные таблицы необычайно популярны среди пользователей;
- 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 100000. 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 100000 до 1000000 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.

Моделирование в электронных таблицах (МЭТ) по автору есть метод моделирования прикладных фильтрационных задач особыми приемами. В отличие от коммерческих и свободно распространяемых пакетов метод

МЭТ не скован встроенными специализированными алгоритмами. В МЭТ заложен принцип развития моделей самими исследователями, которые для своих задач могут записать новые формулы моделирования, чего нельзя сделать в традиционных пакетах. Таким образом с помощью МЭТ пользователь получает свободу научного творчества при моделировании подтопления и дренирования в городском строительстве.

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 [127];

- старые, но проверенные практикой математические руководства по численному моделированию, ориентированные на ручной счет [184].

В то же время появляются новые возможности:

- отпадает необходимость программирования итерационных циклов, так как они встроены в электронные таблицы;

- то же касается наперед заданной точности расчета модели, которая определяется пользователем таблицы через параметр меню;

- 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 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. 63.

	A
1	{macro}
2	{calc}
3	{branch A2}
4	{quit}

Рис. 63. 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 сходимость 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 (см. пример 54 в [262]).

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 несущественные.

Электронные таблицы Lotus 1-2-3 фирмы Lotus Development Corporation до начала 1990 годов выпускались 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 [108]. В Lotus 1-2-3 представлена интересная опция назначения направления итерационного пересчета 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, представленном на рис. 64.

A	
1	{calc}
2	{branch A1}

Рис. 64. 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 быстроедействие 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 (см. 4.2.2, с. 219). В результате таблицы Excel рассчитывают МКР-модель примерно в два раза быстрее, чем Lotus 1-2-3.

Таблицы Microsoft Excel для Windows с начала 1990 годов получили массовое распространение. Начиная с версии Excel 5.0 ©1993, в таблицах появился весьма удобный интерпретирующий язык программирования Visual Basic for Application (VBA) [171]. 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.

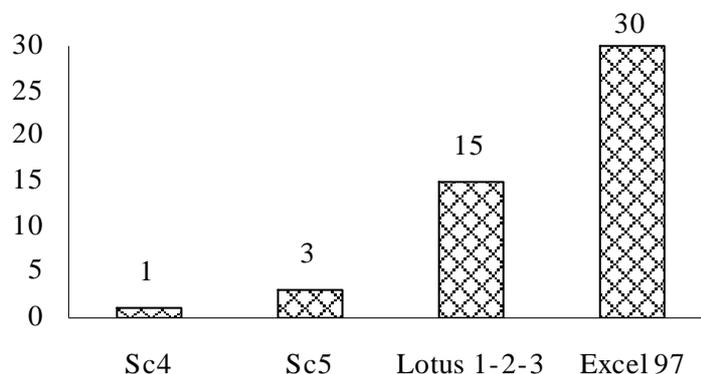


Рис. 65. Сравнительное быстродействие расчета МКР-моделей в электронных таблицах

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. 65. Данный рисунок получен автором по результатам разработки большого числа компьютерных моделей в перечисленных программных продуктах [262].

Таким образом, автором окончательно были выбраны таблицы Microsoft Excel 97 (русская версия) для моделирования методом конечных разностей (МКР), а методика получила название МКР-Excel (МЭТ). Версия Excel 2000 изменилась несущественно и в данной книге описание методики МКР-Excel сделано с использованием версии Excel 97, учитывая ее массовое распространение на компьютерах средней производительности типа Intel Pentium, Pentium-MMX, Celeron, Pentium-II, с тактовой частотой 100-400 МГц и оперативной памятью 32-64 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 [101]. 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 [204]. 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 [250].

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. [319], 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 наилучшим образом подходит для непрофессиональных программистов, коими в большинстве своём являются исследователи в технических науках.

Использование OLE 2.0 имеет перспективу на много лет, так как её разработчик Microsoft объявила эту версию базовой, а все дальнейшие шаги будут просто добавлением новых функциональных средств [318]. Таким образом, прикладные программы исследователей не потеряют 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 [171], сокращённо VBA. Этот язык позволяет автоматизировать моделирование фильтрации с помощью OLE 2.0, а вернее её части — OLE Automation. В версии Excel 97 технология

OLE Automation переименована в технологию ActiveX [290], 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 через 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 [132].

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 [48]. Сборка модели в Excel 97 весьма удобна при использовании обеих кнопок манипулятора мыши с интуитивным интерфейсом ввода. Например, в модели размером 100x100 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 распространённом пакете Surfer 6.04 для Windows ©1996 фирмы Golden Software. Эта программа занимает на жестком диске (винчестере) чуть больше 7 Мбайт, то есть она 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 (см. пример 55 в [262]). Результатом является профессионально построенная карта изолиний.

Авторская VBA-программа ForSurfer() позволяет надёжно 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 5.2 используют эту папку для сохранения своих файлов. При выполнении перечисленных условий построение карт изолиний с помощью ForSurfer из Excel в пакете Surfer происходит безупречно (см. пример 56 в [262]). 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.

4.2.2. Недокументированные возможности Excel

В процессе моделирования фильтрации с помощью МКР-Excel (МЭТ) были обнаружены интересные недокументированные возможности (особенности) 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 (особенности) 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 в [262]);

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;

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, которую связать с графиком-диаграммой.

4.2.3. Особенности технологии моделирования МКР-Excel (МЭТ)

Окинем общим взглядом технологию моделирования фильтрации методом конечных разностей в электронных таблицах Microsoft Excel (МКР-Excel как разновидность МЭТ) и попытаемся оценить ее качество с помощью метрик, применяемых в психологии программирования [317].

При моделировании, прежде всего, надо определить цель исследования, схематизировать и разбить область фильтрации на блоки и узлы МКР-сетки. При этом должны быть соблюдены критерии устойчивости (для нестационарных моделей). Формулы моделирования нужно выбрать адекватно отвечающие физическому процессу. Модель

собрать, проверить и запустить на счет. Полученные результаты обработать и осмыслить.

Моделирование с помощью МКР-Excel может производиться в оперативных системах Windows 3.1/95/98/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 [317]: 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 моделированию не полностью отвечают перечисленным критериям качества (метрикам), поэтому автор рекомендует к широкому использованию МКР-Excel — разновидность МЭТ.

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 [184] и книги Г.Н. Каменского, И.К. Гавич, Н.А. Мясниковой и С.М. Семеновой [87; 54]. 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 середине XX века это было очень удобно для гидрогеологов и гидротехников при моделировании с помощью ручных подсчетов. Однако набор опубликованных формул у предшествующих авторов не так велик. В нашей работе формулы выведены обобщенно, что позволяет переходить к частным случаям моделирования с единой методикой. Набор формул достаточно полный для большинства практических задач по борьбе с подтоплением в городском строительстве.

В более поздних публикациях подавляющее большинство авторов отказались от непосредственной формы записи формул моделирования в связи с работой на больших ЭВМ и персональных компьютерах. Это можно объяснить тем, что в процессе программирования моделей приходилось применять матричную алгебру, где уравнения для моделирования удобнее записывать в форме разностей, то есть 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 методики обременительный груз дополнительного изучения математических правил матричных операций и сосредоточить усилия непосредственно на получение модельных результатов по защите от подтопления.

Известно, что явные схемы при нестационарном моделировании имеют преимущество перед неявными в задачах с двумя и более пространственными переменными [24, с. 199; 86, с. 391]. Это послужило дополнительным аргументом к преимущественному использованию явных схем. Однако и неявные схемы тоже реализованы в МКР-Excel с помощью метода прогонки. Они неплохо работают 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 п. 3.3, 3.4). Невозможно создать совершенно универсальные формулы моделирования. Подборка формул отвечает научным интересам автора и теме представленной работы.

Основные сведения по формулам моделирования изложены в п. 4.5, где дана расширенная классификация формул моделирования и показан способ вывода формул с постановкой исходных балансовых уравнений по А.А. Самарскому [222; 223; 284].

Технология моделирования фильтрации при защите от подтопления в городском строительстве аналогична технологии фильтрационных расчетов, которая изложена в п. 3.1 и проиллюстрирована на рис. 8 и рис. 9. Также как и при аналитических расчетах, при моделировании вначале нужно получить прогноз подтопления. Затем можно построить модель защитного мероприятия, если по результатам прогноза защита от подтопления необходима. Технология моделирования обеспечивает более точные результаты.

4.3. Выбор и построение модельной 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 на-

чать с одномерной, проследить поведение объекта и по мере необходимости усложнить. Точно также не следует сразу мельчить сетку модели. Начинать моделировать надо с минимальным и достаточным числом узлов сетки.

Д.Ю. Панов [184, 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 [254] при моделировании верховодки на слабопроницаемой линзе. Этот прием приведен в [262] (пример 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, средний 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 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 являются декартова (рис. 66а) и цилиндрическая (рис. 66б). Например, подавляющее большинство аналитических зависимостей в справочном пособии к СНиП [204] решены именно в этих двух системах.

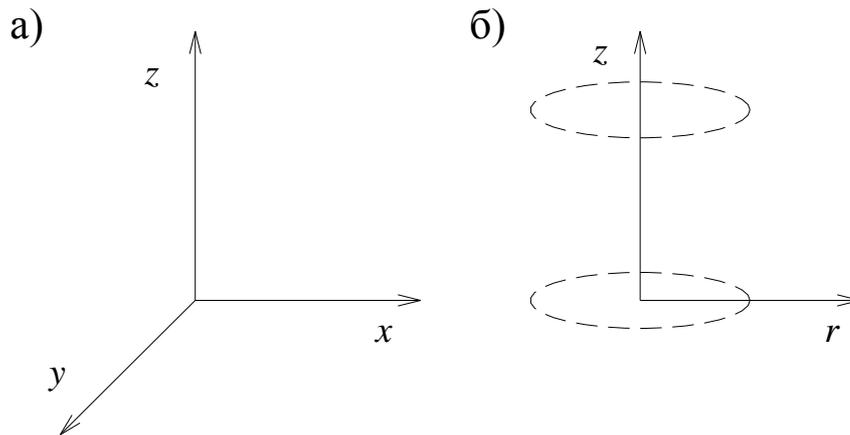


Рис. 66. Системы координат: а — декартова (трехмерная); б — цилиндрическая (двухмерная)

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 были рассмотрены в [262] (примеры 54 и 58), где была использована декартова система координат. Такой вид течения по горизонтали называют плоскопараллельной фильтрацией [148, 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 в [262]). Профильная же фильтрация чаще всего применяется для изучения локальных случаев фильтрации, например для моделирования шпунтовых ограждений котлованов.

Приведем рекомендации по назначению пространственного шага сетки. Сетки с равномерным шагом рекомендуют многие руководства по численному моделированию [20; 69; 135; 184; 222]. Это упрощает формулы моделирования и вычислительный процесс. Разбиение модели равными шагами показано в [262] (примеры 54, 56, 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:

— в декартовых координатах при квадратных МКР-сетках DL , при прямоугольных сетках плановых моделей Dx и Dy и профильных как Dx и Dz (по вертикали);

— в цилиндрических координатах профильно-радиальных моделей как Dr и Dz (по вертикали).

На трехмерных моделях, которые собираем только в декартовых координатах, обозначаем равномерные пространственные шаги МКР-сетки как Dx , Dy и Dz (по вертикали).

Иногда удобнее использовать переменный пространственный шаг. Эти случаи обычно возникают на плановых моделях [209], а также радиальных

и профильно-радиальных [127; 289].

В книгах [76, с. 85; 127, с. 192] приведена формула Р. Столлмена [350] для определения последующей радиальной координаты МКР-узла r_{i+1} через предыдущую координату r_{i+1} , что можно записать в виде

$$r_{i+1} = r_i \cdot 10^{0,25}. \quad (253)$$

Более удобной является формула В.С. Усенко [289, 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 мы тоже записываем по своему так:

$$r_{i+1} = r_i \exp \left[\frac{\ln(R/r_0)}{N_{\text{ш}}} \right], \quad (254)$$

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 (см. пример 57 в [262]).

В ходе исследований при моделировании нестационарных нелинейных процессов фильтрации грунтовых вод малой мощности мы обнаружили, что в этом случае также целесообразно использовать переменный пространственный шаг по формуле (254) не только для осесимметричных процессов, но и для плоскопараллельных. Малый начальный шаг надо назначать около источника возмущения (траншеи с водоотливом, водопонижением или вытянутого в плане очага инфильтрации).

4.4. Критерии устойчивости нестационарных моделей

При расчете нестационарных моделей с помощью МКР-Excel мы рекомендуем формулы моделирования так называемого явного вида или по яв-

ной конечно-разностной схеме [86, с. 301]. Из теории и практики моделирования методом конечных разностей известно [20; 48; 123; 148; 164; 174; 209; 222; 223; 284], что перед расчетом таких моделей надо определенным образом подобрать соотношение пространственных и временных шагов. Это необходимо для обеспечения устойчивости расчета.

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.

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 назначить так, чтобы он был равен или меньше величины Dt_{\max} . Если шаг времени $Dt = Dt_{\max}$, то формулы моделирования упрощаются, что показано в [262] (пример 58). Однако при этом величина $Dt = Dt_{\max}$ может оказаться не круглой, например не в целых сутках, как в [262] (пример 58), когда получилось $Dt_{\max} = 46,875$ 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 исследователю надо самому выбрать шаг времени 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».

ся».

Нельзя для явных МКР-схем назначать $Dt > Dt_{\max}$, иначе счет модели станет неустойчивым 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 диапазона от $-1 \cdot 10^{307}$ до $1 \cdot 10^{307}$.

Для одномерных плоскопараллельных и радиальных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени такой [86, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL_{\min})^2}{2a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (255)$$

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 в [262]); 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; μ_{\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 (255) 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 (255) принимают минимаксные значения и по ним сделать расчет Dt_{\max} . Нельзя для расчета брать средние значения, 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. [262] (пример 58).

Эти требования по применению критерия устойчивости (255) для одномерных моделей относятся также и к двух-, трехмерным МКР-моделям, использующим явные схемы формул моделирования.

Для двумерных плановых МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для прямоугольной сетки по Н.Н. Калиткину [86, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[\frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dy_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (256)$$

где Dx_{\min} и Dy_{\min} — минимальные шаги соответственно по осям x и y из принятых на модели; остальные обозначения см. в пояснении к формуле (255).

Для двумерных плановых МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для квадратной сетки [284, с. 600]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL)^2}{4a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (257)$$

где DL — пространственный шаг квадратной сетки; остальные обозначения см. в пояснении к формуле (255).

Для двумерных профильных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для прямоугольной сетки [86, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[\frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (258)$$

а для квадратной сетки по (257).

Для двумерных профильно-радиальных (осесимметричных) МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени для

прямоугольной сетки [86, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[\frac{1}{(Dr_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (259)$$

для квадратной сетки по формуле (257).

Для трехмерных МКР-моделей критерий устойчивости при выборе шага времени в случае сетки с шагами, разными по всем трем осям декартовых координат [86, с. 390]:

$$Dt_{\max} = \frac{1}{2a_{\max}} \left[\frac{1}{(Dx_{\min})^2} + \frac{1}{(Dy_{\min})^2} + \frac{1}{(Dz_{\min})^2} \right]^{-1};$$

$$a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (260)$$

а для кубической сетки [284, с. 601]:

$$Dt_{\max} = \frac{(DL)^2}{6a_{\max}}; a_{\max} = \frac{k_{\max} M_{\max}}{\mu_{\min}}, \quad (261)$$

где DL — пространственный шаг кубической сетки; остальные обозначения см. в пояснении к формуле (255).

Приведенные критерии устойчивости проверены нами тщательным моделированием на моделях нестационарной фильтрации подземных вод по методу автора МЭТ. Несмотря на то, что приведенные критерии (255) – (261) приняты со ссылками на соответствующие литературные источники, все же следует обратить внимание, что автор несколько конкретизировал данные критерии. Во-первых, все эти критерии записаны в виде последовательной классификации (от простых моделей к сложным). Во-вторых, данные критерии записаны с четким указанием, какие величины, входящие в них всегда надо брать максимальными, а какие — минимальными. Такая конкретизация вносит элемент новизны в данные критерии. Их достоверность была проверена автором весьма скрупулезно. Примеры их применения приведены в гл. 5 со ссылками на монографию автора [262].

4.5. Формулы моделирования

Основой фильтрационных моделей по методу автора МЭТ (разновидность МЭТ — МКР-Excel) являются формулы моделирования (сборочные формулы), которые нужно ввести в ячейки электронной таблицы Microsoft Excel, имитирующие узлы конечно-разностной сетки.

4.5.1. Классификация формул моделирования МКР-Excel

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 как территорий застройки (ЗПТЗ), так и отдельных объектов (участков строительства).

Формулы моделирования фильтрации методом конечных разностей в электронных таблицах (по методу автора МЭТ) 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;
- 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 нашей монографии [262].

В монографии [262] (примеры 54 и 56) проиллюстрировано применение соответственно одно- и двумерных формул моделирования по методу автора МЭТ. Задачи решались в декартовой системе 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 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 нашей монографии [262].

В [262] (пример 56) указано, что наиболее корректным способом вывода формулы моделирования является балансовый принцип

А.А. Самарского [223]. Этот метод продемонстрирован в [262] (примеры 54 и 56). Наоборот, при выводе зависимостей (64) и (134) в [262] был использован другой принцип вывода формул моделирования непосредственно из исходных дифференциальных уравнений фильтрации.

В упомянутых примерах [262] 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 процесса фильтрации. Физика процесса представлена чисто фильтрацией воды. В отношении гидрогеологии и механики грунтов рассмотрена жесткая напорная фильтрация в недеформируемом проницаемом грунте.

В [262] (пример 58) рассмотрено моделирование нестационарной фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью в линеаризованной и нелинейной гидравлических постановках по Буссинеску [195].

Данный пример подтвердил вывод, что при определении области применимости линеаризации процессов фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью, описываемых нелинейным уравнением Буссинеска необходимо использовать:

1) критерии (51)–(52), когда отношение возмущения УГВ ΔH превышает 10-25 % естественной мощности водоносного пласта H_e ;

2) критерий (53), когда отношение ΔH к длине области фильтрации L меньше 10 %.

Также отметим, что подтвердилась правомерность рекомендаций П.Я. Полубариновой-Кочиной [194; 195] и Н.П. Куранова [114] о том, что в задачах подпора лучше применять линеаризацию нелинейного уравнения Буссинеска по I способу. Это было широко использовано в прогнозах подпора в справочном пособии к СНиП [204].

В процессе моделирования фильтрации грунтовых вод малой мощности (пример 58 [262, с.290]) найден новый критерий (54), при соблюдении

которого нелинейное уравнение Буссинеска (18) можно линеаризовать всегда. Это означает, что для грунтовых вод малой мощности при довольно длинной области фильтрации прогнозы и моделирование существенно упрощаются.

4.5.2. Одномерные формулы моделирования

Получим обобщенные одномерные формулы моделирования МКР-Excel в рамках гипотезы А.Н. Мятлева — Н.К. Гириного [194] о том, что в хорошо проницаемых водоносных пластах движение подземных вод преимущественно горизонтальное, а в примыкающих к ним слабопроницаемых прослоях движение в основном происходит в вертикальном направлении. Такую гипотезу за рубежом называют теорией перетекания [195].

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. 67. Тремя кружками обозначены узлы одномерной МКР-сетки, которые в Excel соответствуют ячейкам таблицы. Здесь ξ — обобщенная координата.

Поясним обозначения рис. 67. Моделируемый напорный пласт имеет переменную мощность (толщину) M . Движение подземных вод происходит по нему слева направо. Коэффициенты фильтрации k и водоотдачи μ 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 .

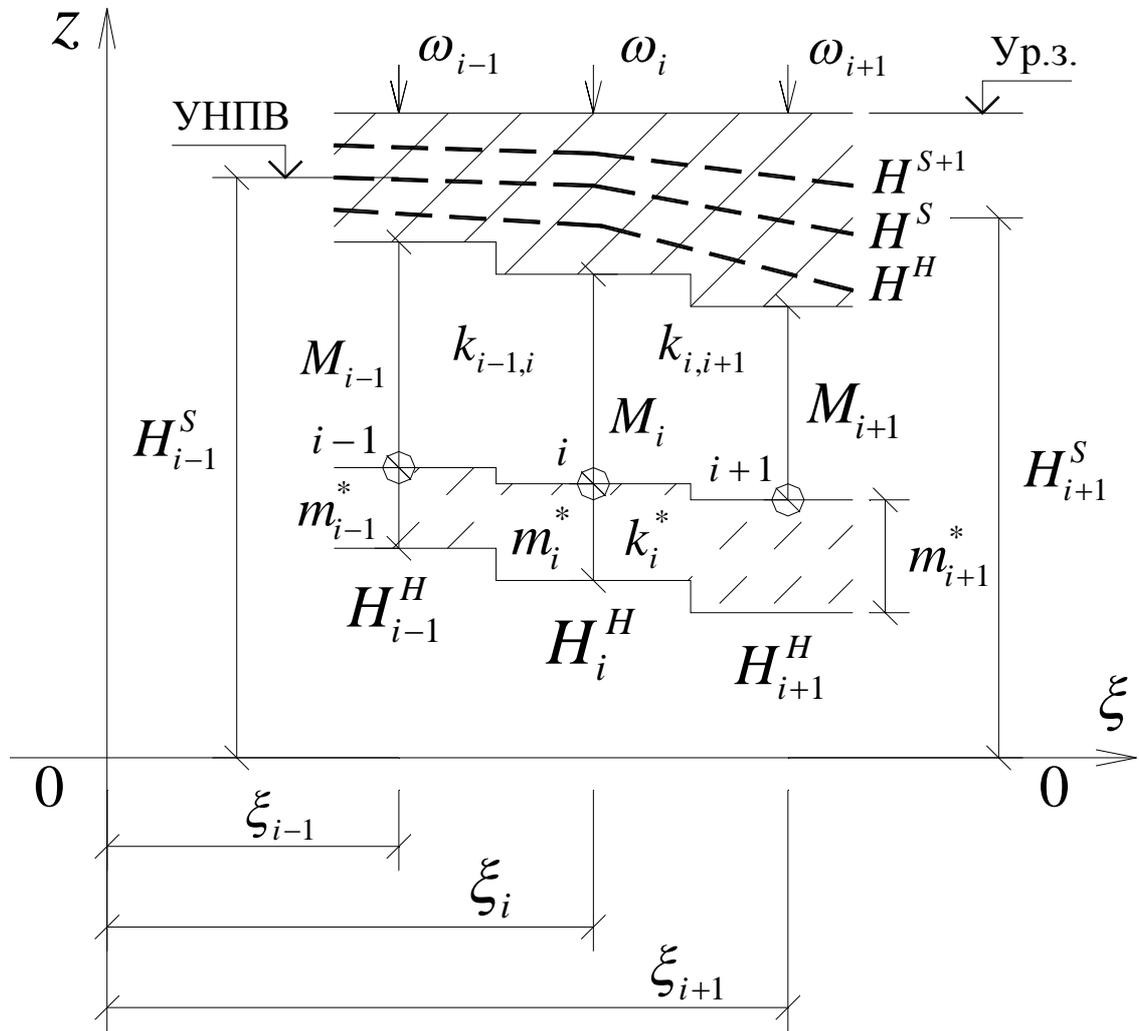


Рис. 67. Схема-шаблон обобщенной одномерной модели напорного пласта: $\xi=x$ в декартовых координатах (плоскопараллельная фильтрация); $\xi=r$ в цилиндрических координатах (радиальная фильтрация)

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 x . Пласт под прослоем имеет переменные в горизонтальном направлении, но неизменные во времени напоры H^H , чья напорная линия показана на рис. 67.

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 ω 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 [87]. 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, водоотдачи и инфильтрации. Коэффициенты фильтрации моделируемого пласта принимаем средними между блоками, например, $k_{i-1,i}$ (см. рис. 67). Величину $k_{i-1,i}$ можно найти по формуле Г.Н. Каменского [87]. Узлы сетки принимаем по центру тяжести блоков.

Исходное уравнение баланса нестационарной плоскопараллельной фильтрации воды в напорном пласте (см. рис. 66 при $\xi = x$) запишем в виде

$$\begin{aligned} k_{i-1,i} \left(\frac{M_{i-1} + M_i}{2} \right) \left(\frac{H_{i-1}^S - H_i^S}{x_i - x_{i-1}} \right) - k_{i,i+1} \left(\frac{M_i + M_{i+1}}{2} \right) \left(\frac{H_i^S - H_{i+1}^S}{x_{i+1} - x_i} \right) + \\ + \frac{\omega_i (x_{i+1} - x_{i-1})}{2} - \frac{k_i^* (H_i^S - H_i^H) (x_{i+1} - x_{i-1})}{2m_i^*} = \\ = \frac{\mu_i (H_i^{S+1} - H_i^S) (x_{i+1} - x_{i-1})}{2Dt}, \end{aligned}$$

откуда получим формулу моделирования:

$$\begin{aligned}
H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{Dt}{\mu_i(x_{i+1} - x_{i-1})} & \left[\frac{k_{i-1,i}(M_{i-1} + M_i)(H_{i-1}^S - H_i^S)}{x_i - x_{i-1}} - \right. \\
& \left. - \frac{k_{i,i+1}(M_i + M_{i+1})(H_i^S - H_{i+1}^S)}{x_{i+1} - x_i} \right] + \\
& + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \quad (262)
\end{aligned}$$

где все обозначения оговорены выше.

Отметим, что в рекомендациях ПНИИИСа [209] записана похожая формула, но в ней, в отличие от (262), использованы не коэффициенты фильтрации и мощности напорного пласта, а комплексы в виде их произведения, называемые проводимостью (водопродимостью) пласта

$$T = kM. \quad (263)$$

Введение T вносит большую степень схематизации в моделирование, несколько огрубляет результаты.

При использовании формулы (262) 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 . Подробнее о фиксированных (абсолютных) ссылках см. в [262] (пример 58).

Из (262) можно получить формулу моделирования безнапорного пласта со свободной поверхностью УГВ, если сделать замены:

$$\begin{aligned}
M_{i-1} &= h_{i-1}^S = H_{i-1}^S - z_{i-1}; \\
M_i &= h_i^S = H_i^S - z_i; \\
M_{i+1} &= h_{i+1}^S = H_{i+1}^S - z_{i+1}, \quad (264)
\end{aligned}$$

где h_i^S и др. — переменные во времени мощности (толщины) грунтовых вод; z_i и др. — соответствующие отметки подошвы моделируемого водоносного пласта (рис. 68).

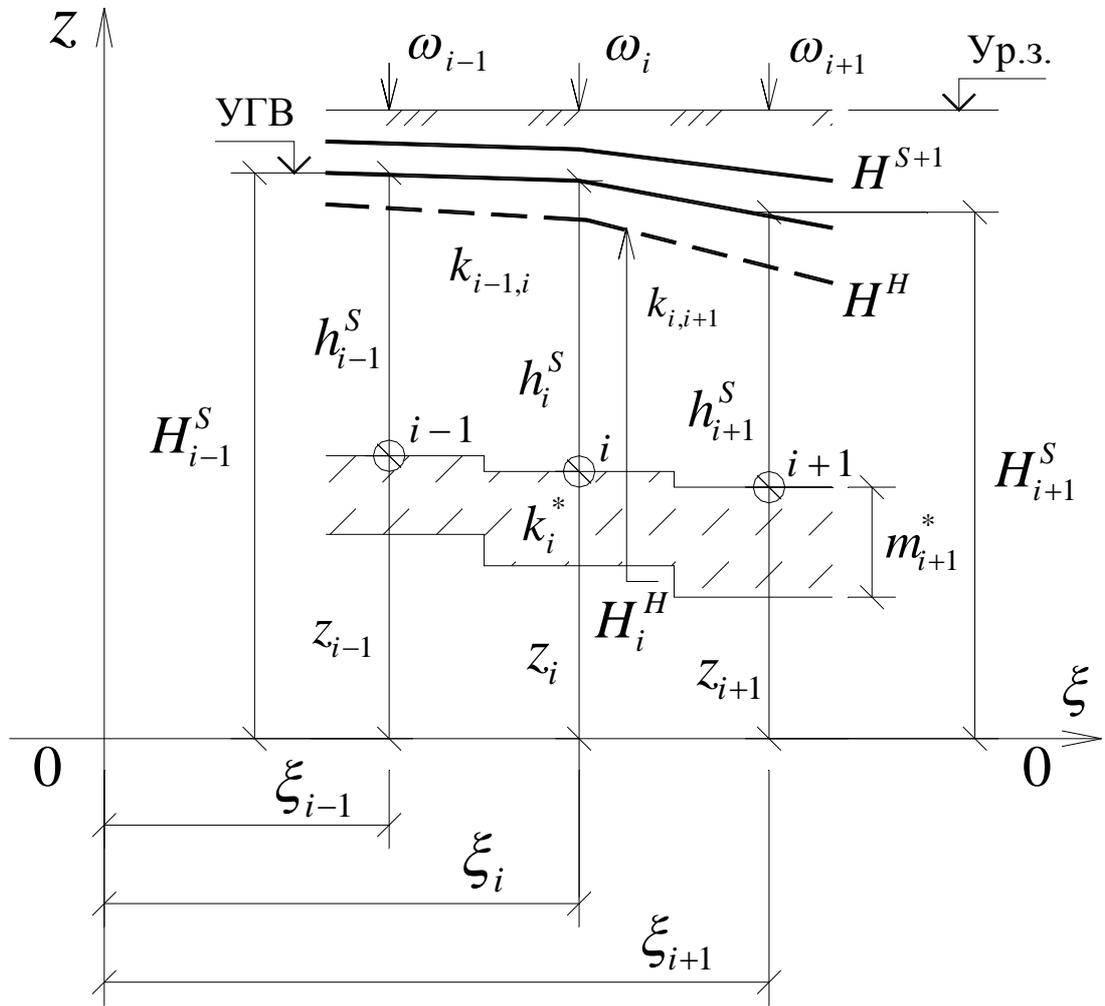


Рис. 68. Схема-шаблон обобщенной одномерной модели безнапорного пласта грунтовых вод: $\xi=x$ в декартовых координатах (плоскопараллельная фильтрация); $\xi=r$ в цилиндрических координатах (радиальная фильтрация)

В таком случае обобщенная одномерная формула моделирования безнапорных грунтовых вод или верховодки будет выглядеть как

$$\begin{aligned}
 H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{Dt}{\mu_i (x_{i+1} - x_{i-1})} & \left[\frac{k_{i-1,i} (h_{i-1}^S + h_i^S) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{x_i - x_{i-1}} - \right. \\
 & \left. - \frac{k_{i,i+1} (h_i^S + h_{i+1}^S) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{x_{i+1} - x_i} \right] + \\
 & + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \quad (265)
 \end{aligned}$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод h^S надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (264). Строго говоря, формула (265) 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. 67 при $\xi = r$). В этом случае блоки МКР-сетки представлены цилиндрами с основанием в виде кольца, площадь которого

$$F_{\kappa} = \frac{\pi}{4} \left[(r_{i+1} + r_i)^2 - (r_i + r_{i-1})^2 \right], \quad (266)$$

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 [195] в виде

$$\frac{\pi k_{i-1,i} (M_{i-1} + M_i) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \frac{\pi k_{i,i+1} (M_i + M_{i+1}) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} + \\ + \omega_i F_{\kappa} - \frac{k_i^* (H_i^S - H_i^H) F_{\kappa}}{m_i^*} = \frac{\mu_i (H_i^{S+1} - H_i^S) F_{\kappa}}{Dt},$$

откуда получим обобщенную формулу моделирования одномерной нестационарной радиальной фильтрации напорных вод с инфильтрацией и перетеканием в цилиндрических координатах в виде

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi Dt}{\mu_i F_{\kappa}} \left[\frac{k_{i-1,i} (M_{i-1} + M_i) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \frac{k_{i,i+1} (M_i + M_{i+1}) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \\ + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}. \quad (267)$$

Отметим, что моделированием радиальной фильтрации подробно за-

нимался В.С. Усенко [289], но его формулы моделирования являются частным случаем формулы (267).

С помощью подстановок (264) из (267) получается формула моделирования одномерной нестационарной радиальной фильтрации безнапорных грунтовых вод или верховодки с инфильтрацией и перетеканием в цилиндрических координатах (см. рис. 68 при $\xi = r$) в виде

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi Dt}{\mu_i F_k} \left[\frac{k_{i-1,i} (h_{i-1}^S + h_i^S) (H_{i-1}^S - H_i^S)}{\ln(r_i/r_{i-1})} - \frac{k_{i,i+1} (h_i^S + h_{i+1}^S) (H_i^S - H_{i+1}^S)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \frac{\omega_i Dt}{\mu_i} - \frac{k_i^* Dt (H_i^S - H_i^H)}{\mu_i m_i^*}, \quad (268)$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод h^S надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (264).

Таким образом, обобщенные формулы (262), (265), (267), (268) позволяют создавать с помощью МКР-Excel (МЭТ) 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.

4.5.3. Двухмерные формулы моделирования

Выведем обобщенные двухмерные формулы моделирования фильтрации МКР-Excel. На контактах с внутренними источниками-стоками и слабопроницаемыми прослоями, при наличии инфильтрации и перетекания используем гипотезу А.Н. Мятиева — Н.К. Гиринского [194].

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.

Рассмотрим три двумерных 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 [209];

2) плоской (профильно-плоской) фильтрации в вертикальной плоскости в декартовых координатах; область применения: локальные задачи моделирования водопритока в несовершенные траншеи, одно- и двухлинейный дренаж;

3) профильно-радиальной фильтрации в вертикальной плоскости в цилиндрических координатах; например для изучения фильтрации в несовершенные скважины и котлованы (см. рис. 51).

Схема-шаблон МКР-сетки для случая плановой фильтрации воды в напорном пласте в горизонтальной плоскости показана на рис. 69. Кружками обозначены узлы двумерной МКР-сетки, которые в Excel соответствуют ячейкам таблицы. Шаг узлов в общем случае неравномерный по обеим осям x и y . Индексы узлов двумерной 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 μ 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 .

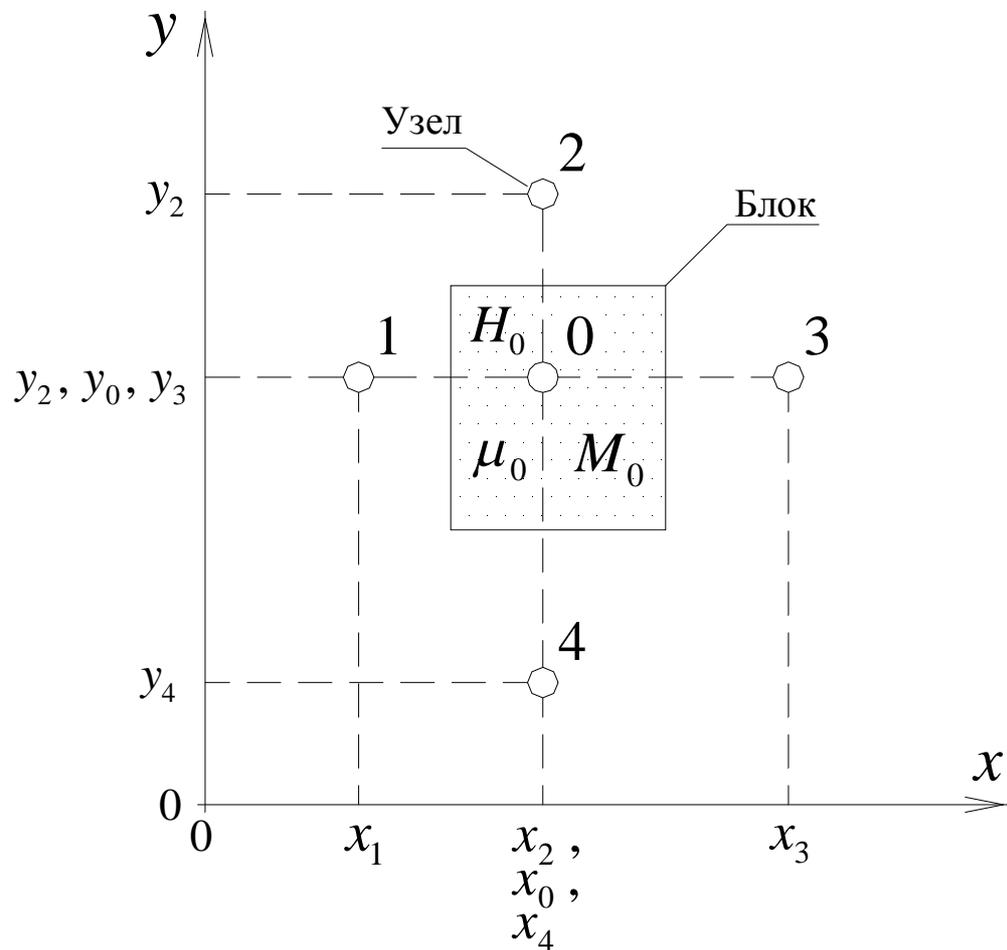


Рис. 69. Схема-шаблон обобщенной двумерной модели плановой фильтрации (в горизонтальной плоскости) в напорном пласте

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 [249, 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 ω в пространстве.

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 [87]. 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 двухмерной МКР-сетки обозначены цифровыми индексами: 0 — центральный узел блока и 1, 2, 3, 4 — узлы соседних блоков (см. рис. 69). Соответствующие индексы присвоены для напоров, мощностей, коэффициентов фильтрации и водоотдачи, инфильтрации. Коэффициенты фильтрации моделируемого пласта принимаем средними между блоками, например k_{0-1} (между узлами 0 и 1) и т.д. Величину k_{0-1} и др. можно найти по формуле Г.Н. Каменского [87]. Узлы сетки расположены по центру тяжести блоков.

Исходное уравнение баланса нестационарной плановой фильтрации воды в напорном пласте (см. рис. 68) 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

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{\mu_0} & \left[\frac{k_{0-1}(M_1 + M_0)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2}(M_2 + M_0)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{k_{0-3}(M_0 + M_3)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \\
 & \left. - \frac{k_{0-4}(M_0 + M_4)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*}, \quad (269)
 \end{aligned}$$

где все обозначения оговорены выше.

В рекомендациях ПНИИИСа [209] имеется подобная формула, но в ней, в отличие от (269), использованы не коэффициенты фильтрации и мощности напорного пласта, а проводимость по (263), что делает моделирование несколько грубее.

При использовании формулы (269) 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. в [262] (пример 58).

Из (269) можно получить формулу моделирования безнапорного пласта грунтовых вод или верховодки со свободной поверхностью, если сделать замены:

$$\begin{aligned}
 M_0 &= h_0^S = H_0^S - z_0; \\
 M_1 &= h_1^S = H_1^S - z_1; \\
 M_2 &= h_2^S = H_2^S - z_2; \\
 M_3 &= h_3^S = H_3^S - z_3; \\
 M_4 &= h_4^S = H_4^S - z_4, \quad (270)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{\mu_0} & \left[\frac{k_{0-1}(h_1^S + h_0^S)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2}(h_2^S + h_0^S)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{k_{0-3}(h_0^S + h_3^S)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} \\
 & \left. - \frac{k_{0-4}(h_0^S + h_4^S)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*}, \quad (271)
 \end{aligned}$$

причем при моделировании в эту формулу вместо мощности грунтовых вод h^S надо подставлять разность напоров и высотных отметок по (270). Строго говоря, формула (271) 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. 70 при значении $\xi = x$.

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 μ данного пласта изменяются в горизонтальном и вертикальном 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 .

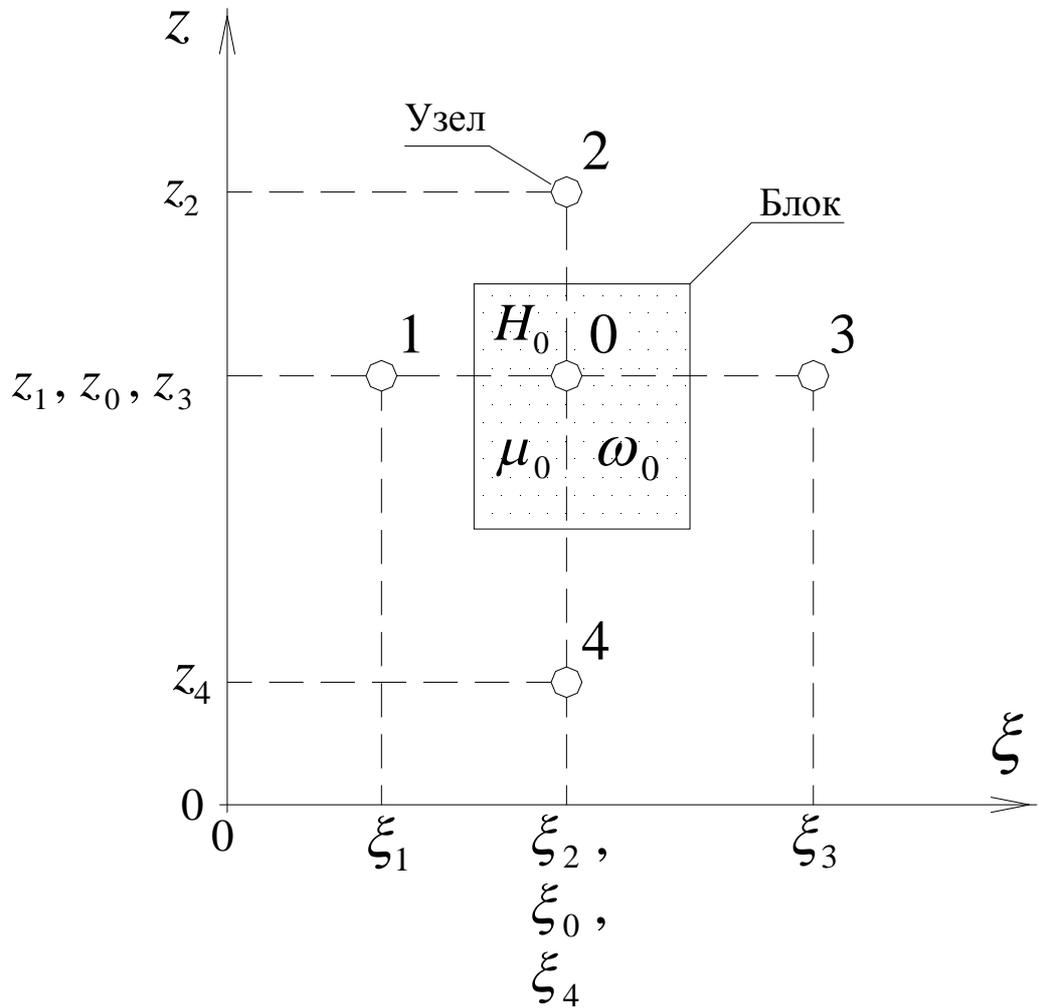


Рис. 70. Схема-шаблон обобщенной двухмерной модели фильтрации в вертикальной плоскости: плоской при $\xi = x$; профильно-радиальной (осесимметричной) при $\xi = r$

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 ω 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.

При нестационарном моделировании с помощью МКР-Excel мы применяем физически реальную схему с суммарным коэффициентом водоотдачи μ , отнесенным к интервалу опробования M_0 , вместо того, чтобы использовать жесткую схему фильтрации (см. п. 2.1).

Уравнение баланса воды через блок МКР-сетки при плоской фильтрации (рис. 70 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

$$\begin{aligned} H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{2M_0 Dt}{\mu_0} & \left[\frac{k_{0-1} (H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{k_{0-2} (H_2^S - H_0^S)}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_4)} - \right. \\ & \left. - \frac{k_{0-3} (H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{k_{0-4} (H_0^S - H_4^S)}{(z_0 - z_4)(z_2 - z_4)} \right] + \\ & + \frac{2\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0 (z_2 - z_4)} - \frac{2k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* (z_2 - z_4)}, \end{aligned} \quad (272)$$

которая пригодна для напорных, безнапорных пластов грунтовых вод и верховодки.

Схема-шаблон МКР-сетки для случая профильно-радиальной (осесимметричной) фильтрации воды в напорном или безнапорном пласте показана на рис. 70 при $\xi = r$. Блок МКР-сетки на этом рисунке показан в виде

прямоугольного сечения, но на самом деле это сечение цилиндрического кольца с площадью основания

$$F_{\kappa} = \frac{\pi}{4} \left[(r_3 + r_0)^2 - (r_0 + r_1)^2 \right], \quad (273)$$

где радиальные координаты узлов сетки см. рис. 70 при $\xi = r$.

Уравнение баланса имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{\pi k_{0-1} (z_2 - z_4) (H_1^S - H_0^S)}{\ln(r_0/r_1)} + k_{0-2} F_{\kappa} \left(\frac{H_2^S - H_0^S}{z_2 - z_0} \right) - \\ & - \frac{\pi k_{0-3} (z_2 - z_4) (H_0^S - H_3^S)}{\ln(r_3/r_0)} - k_{0-4} F_{\kappa} \left(\frac{H_0^S - H_4^S}{z_0 - z_4} \right) + \\ & + \omega_0 F_{\kappa} - \frac{k_0^* F_{\kappa} (H_0^S - H_0^H)}{m_0^*} = \\ & = \frac{\mu_0 F_{\kappa} (H_0^{S+1} - H_0^S) (z_2 - z_4)}{2M_0 Dt}, \end{aligned}$$

откуда получим формулу моделирования профильно-радиальной (осесимметричной) фильтрации воды в напорном, безнапорном пласте грунтовых вод или верховодке в виде

$$\begin{aligned} H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{2M_0 Dt}{\mu_0} & \left\{ \frac{\pi}{F_{\kappa}} \left[\frac{k_{0-1} (H_1^S - H_0^S)}{\ln(r_0/r_1)} - \frac{k_{0-3} (H_0^S - H_3^S)}{\ln(r_3/r_0)} \right] + \right. \\ & + \left. \frac{k_{0-2} (H_2^S - H_0^S)}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_4)} - \frac{k_{0-4} (H_0^S - H_4^S)}{(z_0 - z_4)(z_2 - z_4)} \right\} + \frac{2\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0 (z_2 - z_4)} - \\ & - \frac{2k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* (z_2 - z_4)}, \end{aligned} \quad (274)$$

причем при моделировании в эту формулу вместо площади F_{κ} надо подставлять величины по выражению (273).

4.5.4. Трёхмерные формулы моделирования

Более десяти лет назад авторы [157] 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 трёхмерную нестационарную фильтрацию в неоднородной среде.

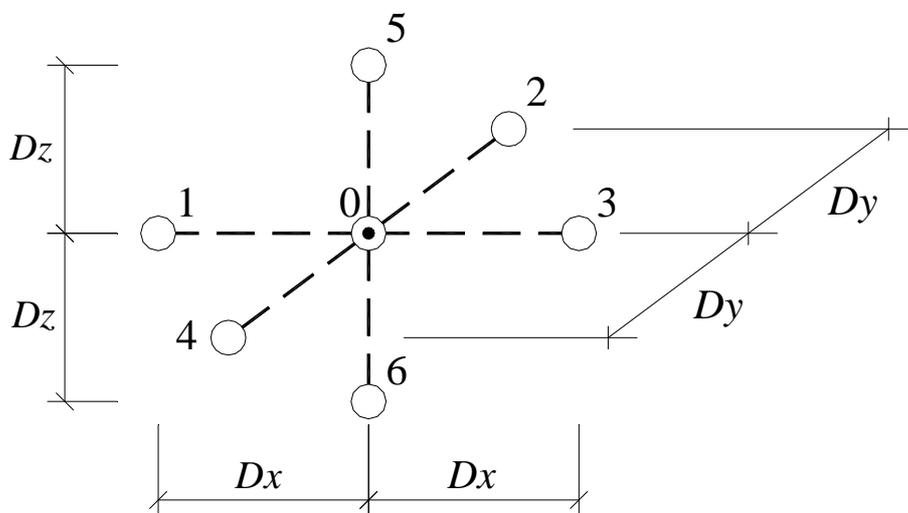


Рис. 71. Схема-шаблон трёхмерной фильтрации

Чтобы получить формулу моделирования для узла 0 сетки в конечных разностях применительно к трёхмерной фильтрации (рис. 71), 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 [54], где авторы рассмотрели случай двухмерного потока. В нашем случае через элементарный объём блока МКР-сетки проходит фильтрационный поток, направление которого в общем случае не парал-

лельно 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 известной формуле Г.Н. Каменского [87].

Исходное уравнение баланса воды через элементарный объём 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; μ_0 — коэффициент, характеризующий ёмкостные свойства грунта (водоотдачу, недостаток насыщения или упругую ёмкость); ω_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 μ_0 и ω_0 берутся в зависимости от типа решаемой задачи: напорный или безнапорный пласт и др. Коэффициент водоотдачи μ_0 надо брать по соответствующему интервалу опробования пласта M_0 .

После элементарных выкладок получаем формулу моделирования трёхмерной нестационарной фильтрации в неоднородных грунтах в следующем явном виде:

$$\begin{aligned}
H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{M_0 Dt}{\mu_0} & \left[\frac{k_{0-1} (H_1^S - H_0^S) - k_{0-3} (H_0^S - H_3^S)}{(Dx)^2} + \right. \\
+ \frac{k_{0-2} (H_2^S - H_0^S) - k_{0-4} (H_0^S - H_4^S)}{(Dy)^2} & + \frac{k_{0-5} (H_5^S - H_0^S) - k_{0-6} (H_0^S - H_6^S)}{(Dz)^2} \left. \right] + \\
+ \frac{\omega_0 M_0 Dt}{\mu_0 Dz} - \frac{k_0^* M_0 Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^* Dz}. &
\end{aligned}
\tag{275}$$

Обобщенная формула (275) позволяет создавать с помощью МКР-Excel (МЭТ) различной степени сложности модели напорной и безнапорной трехмерной фильтрации подземных вод в декартовых координатах.

В заключение данного параграфа заметим, что формулы моделирования других физических процессов легко строятся с помощью балансового принципа А.А. Самарского, продемонстрированного нами при выводе формул моделирования для фильтрации воды. Эта легкость перехода к другим процессам объяснима их достаточной аналогичностью.

4.6. Разные технологические приемы моделирования

Рассмотрим полезные технологические приемы моделирования с помощью МКР-Excel (МЭТ), 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 дренажей;
- 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 водопонижительных 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 двухмерной сетки рис. 72. Ход рассуждений заимствуем из [148, с. 128-129].

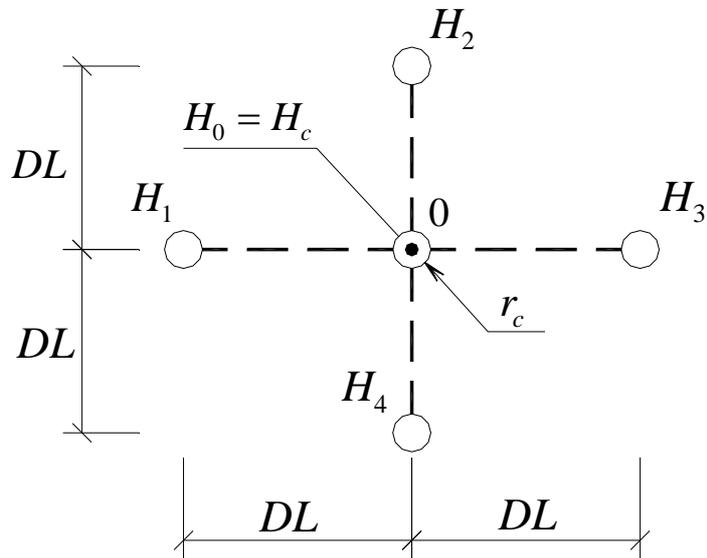


Рис. 72. К выводу r_c

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. 71 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

$$Q_c = \frac{2\pi kM(H_k - H_c)}{\ln(DL/r_c)},$$

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 :

$$r_c = DL \exp(-\pi/2). \quad (276)$$

Заметим, что обычно [123, с. 46] выражение (276) используют в приближенном виде

$$r_c \approx 0,2 DL,$$

однако в Excel в этом нет необходимости и лучше использовать точную формулу (276). В некоторых случаях удобнее шаг квадратной МКР-сетки DL задавать по известному радиусу скважины r_c , обращая формулу (276).

Скважина может быть гидродинамически несовершенной, то есть оборудованной фильтром длиной l не на всю мощность пласта M . Дополнительное гидравлическое сопротивление несовершенной скважины ζ в отечественной гидрогеологической практике вычисляют с помощью таблиц Н.Н. Веригина [146, 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

$$r_c = DL \exp\left(-\frac{\pi}{2} + \zeta\right). \quad (277)$$

Возможен случай, когда на модели радиус какой-либо скважины r_c не соответствует условию (276). Тогда в ячейке Excel, имитирующей эту скважину с постоянным напором H_c в напорном пласте надо исправить напор так:

$$H_0 = \left(H_c + \alpha \sum_{i=1}^4 H_i / 4 \right) / (1 + \alpha); \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_c} - 1, \quad (278)$$

где H_i — напоры в соседних узлах квадратной МКР-сетки (см. рис. 72).

При моделировании безнапорного пласта — грунтовых вод — для скважины, работающей с постоянным напором H_c при несоблюдении условия (276) надо исправлять напор в ячейке Excel по следующей формуле:

$$H_0 = \sqrt{\left(H_c^2 + \alpha \sum_{i=1}^4 H_i^2 / 4 \right) / (1 + \alpha)}; \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_c} - 1. \quad (279)$$

В любом случае — при соблюдении или несоблюдении условия (276) — для скважины, работающей с постоянным напором H_c , величину расхода (дебита) скважины можно найти на модели с квадратной сеткой (см. рис. 72) по следующим соотношениям:

а) в напорном пласте

$$Q_c = 4kM \left(\frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - H_0 \right); \quad (280)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$Q_c = 2k \left(\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - H_0^2 \right). \quad (281)$$

Формулу (280) можно использовать для вычисления дебита скважины-катода за счет электроосмотической фильтрации в виде

$$Q_c = 4k_3M \left(\frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} - U_0 \right), \quad (282)$$

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. 72). Тогда напор в ячейке, моделирующей скважину, можно задать так:

а) в напорном пласте

$$H_0 = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - \frac{Q_c}{4kM}; \quad (283)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$H_0 = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - \frac{Q_c}{2k}}. \quad (284)$$

Если для таких скважин ($Q_c = \text{const}$) есть необходимость вычисления меняющегося напора внутри скважины H_c , то он — при несоблюдении условия (276) — находится по формулам:

а) в напорном пласте

$$H_c = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4} - \frac{Q_c}{2\pi k M} \ln \frac{DL}{r_c}; \quad (285)$$

б) в безнапорном пласте (грунтовых водах)

$$H_c = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}{4} - \frac{Q_c}{\pi k} \ln \frac{DL}{r_c}}. \quad (286)$$

При соблюдении условия (276) значение напора в ячейке Excel и в скважине (при $Q_c = \text{const}$) совпадают и соответствуют (283).

Приведенные формулы для моделирования скважин (276)-(286) при плановой фильтрации в горизонтальной плоскости пригодны для дрен на профильных моделях в вертикальной плоскости. Они обычно записываются в приближенном виде [123; 148; 209; 313], но в Excel в этом нет необходимости. Дополнительные соображения по моделированию скважин на МКР-сетках с неравномерным шагом приведены в [123, с. 46; 209, 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 [195]:

$$H = z, \quad (287)$$

где H — напор; z — отметка УГВ; обе величины отсчитываются от единой горизонтальной плоскости сравнения напоров 0-0. Иначе формулу (287) можно осмыслить так: на свободной поверхности УГВ пьезометрическая высота $h_p = 0$, избыточное давление $p_{изб} = 0$ и полное давление равно атмосферному. Как известно из механики жидкости и газа [249] — это общее

определение свободной поверхности жидкости.

Этот прием известен также из аналогового моделирования [75, 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 п. 5.2.

Кривые депрессии при стационарной фильтрации можно моделировать другим способом — с помощью изобарного моделирования. П.Я. Полуба-ринова-Кочина продемонстрировала в книгах [194, с. 499; 195, 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 [249, с. 28] связана с фильтрационным напором H и высотной отметкой z так:

$$h_p = H - z. \quad (288)$$

Изобарную модель МКР-Excel (МЭТ) для стационарной фильтрации собирают из формул моделирования, в которых напоры заменены на пьезометрические высоты по (288). После расчета модели положение свободной поверхности УГВ можно найти по узлам сетки, в которых $h_p = 0$, то есть в тех узлах, где давление равно атмосферному. Рекомендуется изобарные линии получать с помощью нашей макропрограммы ForSurfer (см. приложение 2).

Изобарное моделирование свободной поверхности уровня грунтовых вод может быть полезно как при моделировании фильтрации воды под влиянием силы тяжести в обычные гравитационные системы дренажа (см. п. 1.4), так и при совместной фильтрации воды и воздуха при использовании технологий строительного водопонижения с вакуумированием водоносного пласта.

Рассмотрим еще одну разновидность моделирования с помощью сборки модели из отдельных фрагментов областей фильтрации, причем некоторые фрагменты модели могут отражать процессы одномерной фильтрации, другие фрагменты — процессы двухмерной фильтрации, а третьи — трехмерной. Такие разнообразные сочетания фрагментов модели позволяют существенно увеличить производительность моделирования как с точки зрения размеров модели, так и с точки зрения быстроты ее расчета (сокращения компьютерного времени).

Комбинированное фрагментное моделирование известно из практики аналогового моделирования [76, 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 пото-

ков около дрен и скважин лучше моделировать двух- и трехмерными фрагментами.

Следует отметить, что мы приняли в качестве основного метода моделирования любых задач фильтрации (нестационарных и стационарных) метод с использованием явных разностных схем. Достаточное количество примеров по таким схемам (15 примеров) изложено в нашей монографии [262]. Тем не менее, надо указать и на возможность моделирования авторским методом и при использовании неявных разностных схем.

Моделирование нестационарных задач по неявным схемам методом прогонки с помощью МКР-Excel (разновидности МЭТ) 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 [86, 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; 86, с. 391].

Книг по теории и практике метода прогонки достаточно много [24; 25; 48; 58; 69; 86; 135; 148; 164; 174; 222; 224; 284]. Метод прогонки неэффективен для решения нелинейных задач [86, 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 [195], что достаточно тривиально для моделирования. Технология расчета нестационарной задачи методом прогонки в динамической МКР-Excel-модели показана на рис. 73 (см. пример 59 в нашей монографии [262]).



Рис. 73. Схема метода прогонки в динамической нестационарной модели МКР-Excel

4.7. Выводы по главе 4

— разработан новый метод компьютерного моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве с помощью электронных таблиц (МЭТ);

— технология автора МЭТ напоминает аналоговое моделирование, являясь виртуальной исследовательской лабораторией, что обеспечивает преимущество развития фильтрационного моделирования;

— новая информационная технология моделирования процессов фильтрации подземных вод многократно снижает трудоемкость моделирования в сравнении с традиционными принципами программирования компьютерных моделей.

5. Практика моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве

Данная глава содержит примеры расширенного применения метода автора по моделированию в электронных таблицах (МЭТ) процессов подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования в городском строительстве.

Большинство задач относятся к гидрогеологическому моделированию, так как основным моделируемым процессом является движение подземных вод естественного или техногенного происхождения. Сопутствующими процессами при моделировании защиты от подтопления в нашей работе рассмотрены фильтрационная консолидация грунтов и электроосмотическая фильтрация.

Разновидности моделирования при защите от подтопления можно перечислить следующие:

- 1) схематизационное моделирование;
- 2) моделирование обратных задач;
- 3) моделирование изменения проницаемости грунта под зданиями и сооружениями;
- 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 нашей монографии [262] по большей части представлены прямые задачи моделирования, в которых целью является определение напоров, уровней и расходов подземных вод. Это в наибольшей степени соответствует теме диссертационного исследования определять влияние городского строительства на подтопление и дренирование территорий.

5.1. Моделирование изменения проницаемости грунтов оснований

Прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований аналитическим методом рассмотрены в п. 3.2. Там были использованы некоторые упрощения с целью схематизации расчетов. Моделирование изменения проницаемости грунтов оснований под влиянием различных конструкций и технологий городского строительства (см. табл. 2) может быть выполнено с помощью метода автора МЭТ (его разновидности МКР-Excel) гораздо точнее, чем при аналитическом прогнозе. Данное чередование прогнозирования от аналитических прогнозов к компьютерному моделированию и, далее, к проектированию и строительству соответствует основному циклическому алгоритму работы в рамках нового конструктивно-технологического подхода автора к реализации защиты от подтопления городских территорий (см. рис. 1). Данное моделирование 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 [293; 294; 295]. Однако в настоящее время начальное распределение p_0 в грунтовой воде под устраиваемыми фундаментами гораздо проще и точнее можно найти с помощью МКР-Excel. Для этого нужно промоделировать стационарную задачу фильтрации под фундаментом (рис. 74), ибо поровое давление связано с фильтрационным напором так:

$$H = p_0/\gamma, \quad (289)$$

где γ — удельный вес воды. Поровое давление — это избыточное давление над гидростатическим давлением в грунтовой воде, согласно теории фильтрационной консолидации К. Терцаги [278].

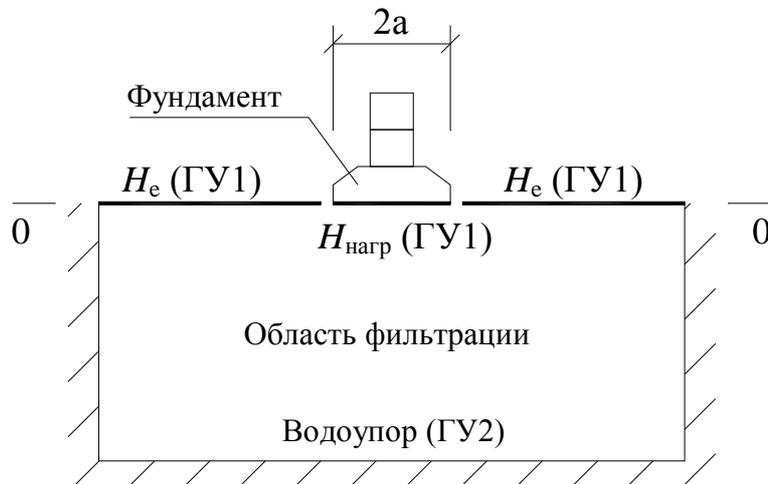


Рис. 74. Определение начальных поровых давлений на МКР-Excel-модели

Проведя горизонтальную плоскость отсчета напоров 0-0 по подошве фундамента (см. рис. 74), принимают в этом месте граничное условие I рода (ГУ1), то есть задают напор от нагрузки

$$H_{\text{нагр}} = p_{\text{нагр}} / \gamma. \quad (290)$$

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 [293; 294; 295] моделируют границу II рода (ГУ2), как водоупор (см. рис. 73). Можно также сразу моделировать поровое давление p_0 , подставляя его значения на границы модели по формулам (289) – (290). В пределах области фильтрации, показанной на рис. 74, 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 [84; 294], 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 (71), принимая в ней вместо p_{ϕ} 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 (65) или Г.И. Черного (67). Результат моделирования методом автора МЭТ в графическом виде представлен на рис. 75 [262] (пример 62) — здесь и далее размеры в метрах.

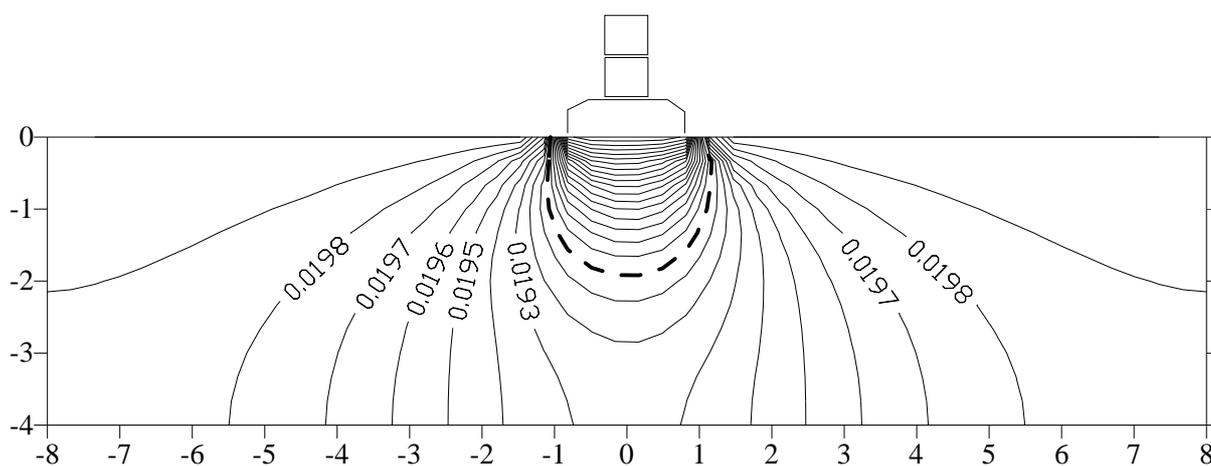


Рис. 75. Поле коэффициентов фильтрации грунта, уплотненного фундаментом (получено моделированием по автору — МЭТ — МКР-Excel)

Анализируя полученное поле распределения коэффициентов фильтрации уплотненного грунта под фундаментом, можно заметить некоторые любопытные особенности. Штриховой линией под фундаментом на рис. 75 показана граница, где коэффициент фильтрации грунта изменился до $k = 0,019$ м/сут, то есть уменьшился ровно на 5 % по отношению к коэффициенту фильтрации грунта в естественном залегании. Таким образом, эта граница показывает зону уплотнения грунта под ленточным фундаментом с точки зрения изменения его проницаемости. Заметим также, что на данной модели мы рассмотрели среднесжимаемый суглинок, у которого коэффициент фильтрации уменьшается не очень интенсивно, в отличие от супесей. В случае же 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 (МЭТ).

Более сложный случай фильтрационной консолидации возникает, когда здание или сооружение возводят постепенно. Эта методика подробно рассмотрена В.А. Флориным [294] и повторена П.Л. Ивановым [84]. Она легко реализуется с помощью МКР-Excel.

Определение изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства с помощью аналитических методов рассмотрено в п. 3.2. 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 [294], можно решать при гипотезе напорной фильтрации воды.

Определение изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий с помощью аналитических методов рассмотрено в п. 3.2. Моделирование изменения проницаемости грунта под свайными полями при эксплуатации зданий может быть произведено с помощью МКР-Excel (МЭТ). 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 моделировать помощью МКР-Excel (МЭТ), как показано в [262] (пример 62).

5.2. Прогнозное моделирование подтопления

Материал данного параграфа дает лишь некоторые примеры применения МЭТ для моделирования влияния городского строительства на подтопление территорий. Тем не менее он дает достаточное представление для освоения авторского метода моделирования подтопления.

Прогнозы верховодки аналитическим методом рассмотрены в п. 3.3. Рассмотрен 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 неточные (см. п. 3.3).

Исследуемые верховодки можно подразделить на вытянутые и круглые в плане. Причиной их образования принято считать поступление дополнительной инфильтрации влаги интенсивностью ω , м/сут [115]. 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 конфигураций надо решать плоскопараллельную или радиальную задачи.

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 мо-

делирование следует производить не менее чем на двухмерных плановых моделях, отражающих зоны неоднородной проницаемости.

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 (МЭТ).

Динамику образования верховодок на слабопроницаемых линзах рассмотрим так же, как у А.Ж. Муфтахова и Н.П. Куранова [115], то есть для плоскопараллельной и радиальной задач. При поступлении инфильтрации ω на поверхности слабопроницаемой линзы вначале образуется купол верховодки с ползущей границей обводнения при растекании (рис. 76).

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; $\xi_{л} = L_{л}$ — полуширина линзы; $\xi_c = L_c$ — ширина зоны стока с края линзы; $\xi = x$ — горизонтальная ось. Ось z совмещена с вертикальной осью симметрии. Здесь ξ — 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; $\xi_{л} = R_{л}$ — радиус линзы; $\xi_c = R_c$ — ширина кольцевой зоны стока с края линзы; $\xi = r$ — горизонтальная ось.

Максимальный напор (подъем уровня верховодки) наблюдается в центре линзы. Вначале он H_t , в пределе достигает наибольшего стационарного значения $H_{ц}$. Напоры отсчитываются от верха линзы (ось r). Грунт линзы считается водонасыщенным полностью. Также как Н.П. Куранов [115] и С.А. Пильдыш [188], считаем, что грунт линзы водонасыщен в любом случае, даже если сверху нет питания и нет слоя верховодки (см. п. 3.3).

Лежащий на линзе грунт имеет коэффициенты фильтрации k и водоотдачи μ . При растекании купола вода движется не только к краям

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{kDt}{\mu(Dx)^2} \left[\frac{(H_{i-1}^S)^2 + (H_{i+1}^S)^2}{2} - (H_i^S)^2 \right] + \frac{\omega Dt}{\mu} - \frac{k_0 Dt H_i^S}{\mu m_0},$$

(291)

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 легко получается из (268) как

$$H_i^{S+1} = H_i^S + \frac{\pi k Dt}{\mu F_k} \left[\frac{(H_{i-1}^S)^2 - (H_i^S)^2}{\ln(r_i/r_{i-1})} + \frac{(H_{i+1}^S)^2 - (H_i^S)^2}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \right] + \frac{\omega Dt}{\mu} - \frac{k_0 Dt H_i^S}{\mu m_0},$$

(292)

где F_k — площадь кольца по формуле (266); r_{i-1} , r_i , r_{i+1} , — радиальные координаты узлов МКР-сетки, шаг которых рекомендуется выбирать по формуле (254), подробнее см. в [262] (пример 57); остальные обозначения уже оговорены.

Одномерное моделирование нестационарных верховодок по формулам (291) и (292) не представляет каких-либо сложностей. Конкретные модели верховодок можно собрать с учетом вышеизложенных технологических приемов и примеров.

Более сложный случай двумерного профильного стационарного моделирования верховодки на слабопроницаемой линзе при инфильтрационном питании рассмотрен в [262] (пример 63). В результате расчета двумерной гидромеханической модели верховодки получен напор в центре вытянутой линзы $H_c = 2,6241$ м. Для сравнения: на нелинеаризованной гидравлической модели $H_c = 2,4915$ м, 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 [157]. 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 [262] (пример 58). Кроме того, в ходе проведения аналитических исследований был разработан комбинированный метод автомодельных движений в сочетании с МКР-Excel (МЭТ). Там был рассмотрен подпор от источника подтопления с постоянным напором (см. п. 3.3), выведены формулы автомодельного безразмерного моделирования по автору (64) и (134). Все остальные случаи можно моделировать по одномерным и двумерным формулам п. 4.5 и 4.6.

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; 86; 224]. 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 μ), 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 [86]. 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 (271). Рассмотрим случай равномерных пространственных шагов Dx и Dy соответственно по горизонтальным декартовым координатам x и y (рис. 75). Формулу (271) можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{2\mu_0} & \left[\frac{k_{0-1} (H_1^S - z_1 + H_0^S - z_0) (H_1^S - H_0^S)}{(Dx)^2} + \right. \\
 & + \frac{k_{0-2} (H_2^S - z_2 + H_0^S - z_0) (H_2^S - H_0^S)}{(Dy)^2} - \frac{k_{0-3} (H_0^S - z_0 + H_3^S - z_3) (H_0^S - H_3^S)}{(Dx)^2} \\
 & \left. - \frac{k_{0-4} (H_0^S - z_0 + H_4^S - z_4) (H_0^S - H_4^S)}{(Dy)^2} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*},
 \end{aligned}
 \tag{293}$$

где обозначения см. на рис. 77; остальные пояснения см. в п. 4.5 к двумерным формулам плановой фильтрации.

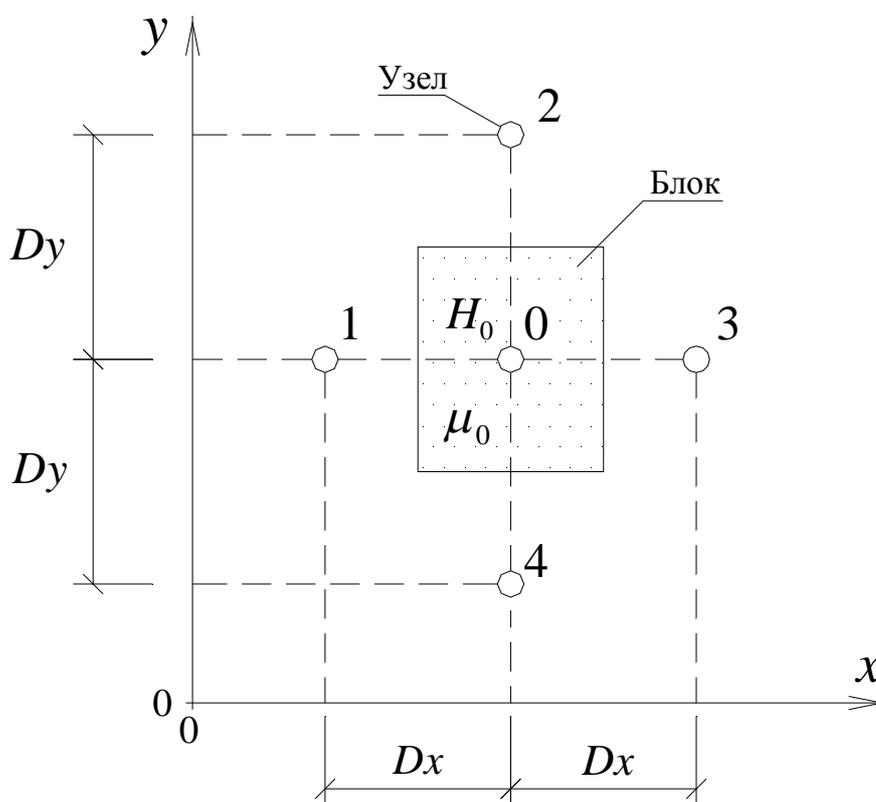


Рис. 77. Схема-шаблон двумерной модели плановой фильтрации грунтовых вод

Заметим, что формула (293) относится к явной схеме, при которой надо соблюдать условие устойчивости разностных схем (256).

Оптимальный шаг времени $Dt_{\text{опт}}$ на эволюционной модели можно найти по формуле Н.Н. Калиткина [86, с. 406], записанной в виде

$$Dt_{\text{опт}} = \frac{\mu_{\min} \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2}}{\pi k_{\max} h_{\max} \sqrt{1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2}}, \quad (294)$$

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. 77 и пояснение к формуле (255).

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 двумерной плановой фильтрации грунтовых вод надо соблюдать условие устойчивости разностной схемы по формуле (256). 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 (256) и (294), найдем формулу для определения оптимального коэффициента водоотдачи (недостатка насыщения) при эволюционном методе моделирования двумерной плановой фильтрации грунтовых вод в виде

$$\mu_{\text{опт}} = \frac{2 \mu_{\min} \left[1/(Dx)^2 + 1/(Dy)^2 \right] \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2}}{\pi \sqrt{1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2}}, \quad (295)$$

где μ_{\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 δ расхождения значений напоров на последующем и предыдущем временных шагах. Величину N_t можно найти по формуле Н.Н. Калиткина [86, с. 406], записанной в виде

$$N_t = \frac{1}{\pi} \left[(Dx)^2 + (Dy)^2 \right]^{-1/2} \left(1/X_{\max}^2 + 1/Y_{\max}^2 \right)^{-1/2} \ln \frac{1}{\delta}. \quad (296)$$

Эволюционный метод моделирования продемонстрирован в [262] (пример 64). С помощью метода автора МЭТ промоделирована задача о барражном эффекте комплекса зданий СибАДИ как зон неоднородности с пониженной проницаемостью в потоке грунтовых вод малой мощности (рис.78). Сопоставление прогнозных значений уровня грунтовых вод с данными натурных обследований автора на рассматриваемой территории застройки показало их удовлетворительную сходимость. Следует заметить, что в данном примере основным фактором, влияющим на подтопление, было последствие нерационального строительства всего комплекса зданий застройки, выразившееся в виде барражного эффекта.

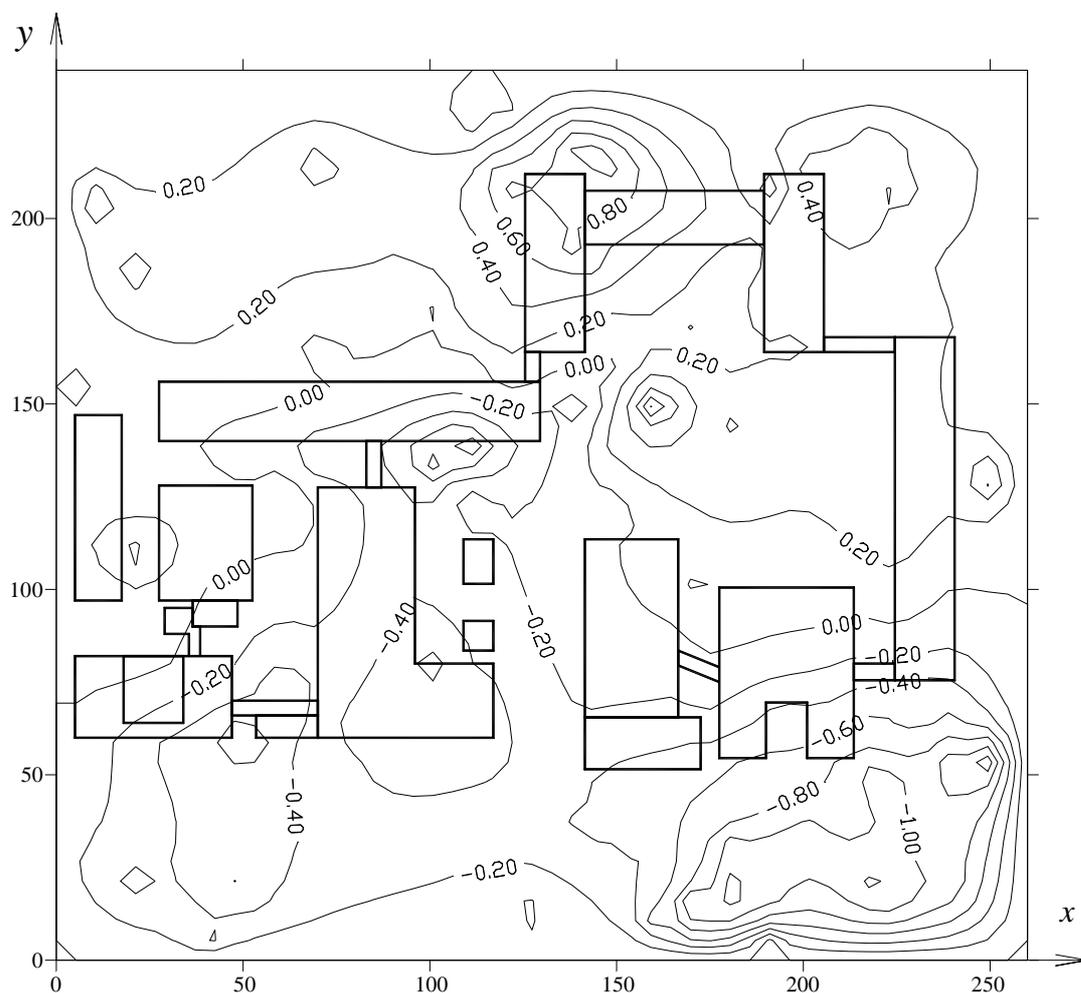


Рис. 78. Прогнозное повышение УГВ на территории застройки как последствие строительства (моделирование по автору)

5.3. Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа

Моделирование строительного водоотлива, водопонижения и дренажа имеет сходную методику, как и аналитические методы расчета, рассмотренные в п. 3.4. Моделирование целесообразно применять, когда аналитические методы дают заведомо неточные результаты, крайне усложняются или вообще не применимы. Вот примеры таких случаев:

— 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);

— в стесненных условиях городской застройки при существенной природной и техногенной неоднородности области фильтрации в плане, разрезе и анизотропии;

— при грунтовых водах малой мощности, когда понижения УГВ почти равны толщине водоносного слоя в сочетании со сложной плановой конфигурацией строительных выемок и выработок;

— при применении комбинированных способов водопонижения, например, электроосмотического с вакуумным водопонижением, требующих совместного учета закономерностей электроосмоса, фильтрации воды, воздуха и т.д.;

— когда фильтрационные потоки имеют существенно двухмерный и даже трехмерный характер движения, например в лучевой дренаж.

Содержание данного параграфа по моделированию надо рассматривать как развитие положений п. 3.4 по фильтрационному расчету водоотлива, водопонижения и дренажа.

Рассмотрим моделирование строительного водоотлива. Общая методика моделирования водоотлива с помощью МКР-Excel (МЭТ) вбирает в себя все полезные приемы моделирования, рассмотренные в предыдущих параграфах и примерах.

Как уже было сказано в п. 3.4, 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 [194; 195]. Пример 65 [262, с. 359] нашего моделирования водоотлива из тоннеля БАМа с помощью МКР-Excel (МЭТ) показал, что ошибка аналитики в определении положения УГВ может достигать нескольких сотен процентов.

Рассмотрим 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 [219] ее превращают в катод, куда по закону электроосмоса прите-

кает вода из грунта.

Так как строительное водопонижение по требованиям технологии [236; 279; 280] 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 (51)–(54).

Если гидрогеологические условия позволяют применить линеаризованную гидравлическую теорию, то следующим шагом находят зоны влияния водопонижения. Нелинеаризованные (по Буссинеску) гидравлические постановки задач могут возникнуть в случае грунтовых вод малой мощности. Тогда зоны влияния строительного водопонижения можно найти по нашим формулам (201) и (212).

Определив размеры области фильтрации при водопонижении, затем 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 $r_э$ (см. рис. 72) в плане целесообразно окружить квадратной сеткой с шагом DL по формуле (276), записанной в виде

$$DL = r_э \exp(\pi/2). \quad (297)$$

При таком задании квадратного шага сетки DL скважина-электрод радиусом $r_э$ 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 $r_д = r_э$ в формуле (297) при моделировании профильных задач в вертикальной плоско-

сти.

Другие объекты, кроме скважин и дрен, могут попасть в зону влияния рассматриваемой технологии строительства с точки зрения подтопления или дренирования — контуры зданий, фундаментов, участков уплотненных грунтов и т.д. Их можно вписывать в сетку модели с неравномерным шагом. Это весьма удобно реализуется с помощью формулы (254), которую можно применять и в декартовой системе координат (см. п. 4.3).

Формулы моделирования фильтрации воды можно выбрать из п. 4.5 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 обязательно соблюдать критерии устойчивости (256)-(257) 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 п. 2.1.1 и 2.1.4. Эти процессы во многом аналогичны фильтрации воды, поэтому вывод формул моделирования не представляет трудностей.

В ходе проектирования системы электроосмотического водопонижения возникает специфическая задача определения затрат электроэнергии. Аналитический метод расчета электроэнергии изложен в [219, с. 39-40 и с. 79]. Упомянутая методика имеет узкое применение для расположения разнополюсных электродов в виде двойных рядов: в ортогональном и шахматном порядке (рис. 79).

С помощью метода автора МЭТ (его разновидности 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 [119] можно определить по формуле:

$$I_j = \frac{L_3}{\rho_3} \left(4U_0 - \sum_{i=1}^4 U_i \right), \quad (298)$$

где L_3 — длина электрода на контакте с токопроводящим грунтом, м; ρ_3 — удельное электрическое сопротивление грунта, ом·м; U_0 — потенциал электрода (рис. 80), В; U_i — потенциалы на ближайших узлах МКР-Excel-модели при квадратной сетке около электрода с шагом DL по (297).

В данной формуле использовано допущение точно такое же, как и в руководстве по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов НИИОСПа [219], а именно о том, что электрический ток поступает в вертикальные электроды в виде планового потока в пределах мощности грунта L_3 . Наше проверочное моделирование с помощью метода МЭТ без использования данного допущения показало, что такой прием обеспечивает вполне приемлемую инженерную точность.

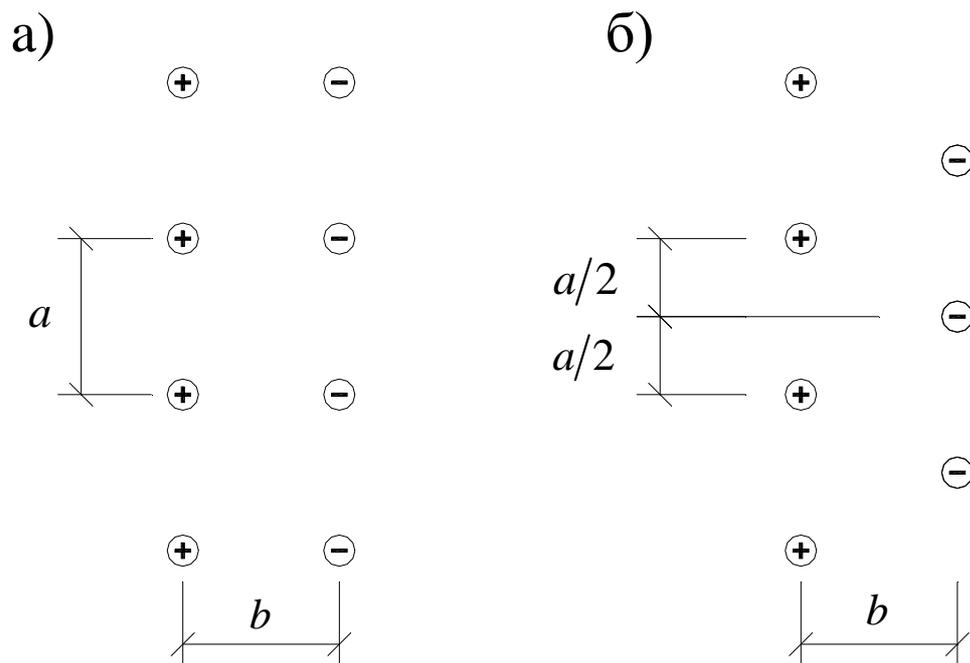


Рис. 79. Схемы расположения электродов в плане: а — ортогональная; б — шахматная

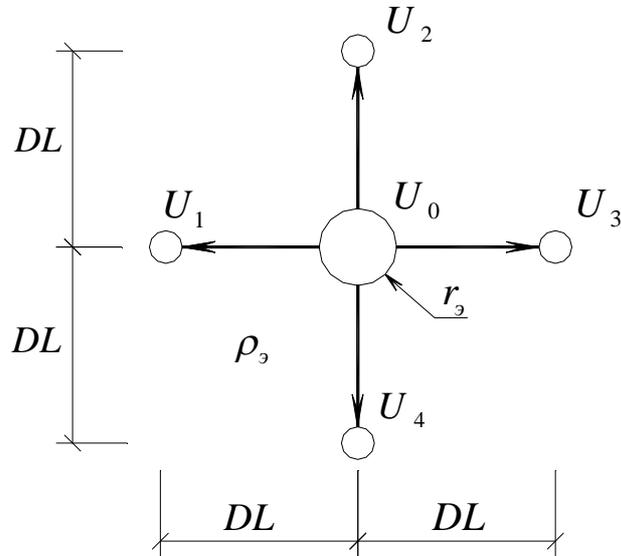


Рис. 80. Схема-шаблон электрода

Возможен случай, когда разнополюсные электроды имеют разные радиусы, один из радиусов r_3 соответствует, а другой не соответствует условию (297). Тогда в ячейке Excel, имитирующей электрод с потенциалом U_3 и радиусом r_3 , не соответствующим условию (297), надо задать потенциал так:

$$U_0 = \left(U_3 + \alpha \sum_{i=1}^4 U_i / 4 \right) / (1 + \alpha); \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \ln \frac{DL}{r_3} - 1. \quad (299)$$

Данная формула аналогична формуле (278) для напорной скважины.

Формула моделирования электрических потенциалов в грунте при неравномерном пространственном шаге конечно-разностной сетки для стационарной плановой модели имеет вид

$$U_0 = \left[\frac{U_1}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{U_2}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} + \frac{U_3}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} + \frac{U_4}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] / \left[\frac{1}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{1}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} + \frac{1}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} + \frac{1}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right], \quad (300)$$

Здесь пространственные координаты надо задавать так же, как показано на рис. 70.

Общий ток в системе электроосмотического водопонижения определяется как сумма токов отдельных однополюсных электродов, A :

$$I = \sum_{j=1}^{N_3} I_j, \quad (301)$$

где N_3 — число однополюсных электродов.

Затраты электроэнергии при работе установки электроосмотического водопонижения можно найти по известной формуле [119], $Дж$:

$$W = IUt, \quad (302)$$

где U — общее электрическое напряжение в системе (разность потенциалов), B ; t — время работы установки под напряжением, $с$. Полученное значение расхода электроэнергии W можно перевести из джоулей в киловатт-часы с помощью соотношения: $3600000 Дж = 1 кВт \cdot ч$.

Электрическое сопротивление отдельного электрода можно найти из формулы (298) по закону Ома так:

$$R_{3j} = \frac{\rho_3 U}{L_3 \left(4U_0 - \sum_{i=1}^4 U_i \right)}. \quad (303)$$

Полученные формулы использованы для МЭТ-моделирования сопротивлений электродов в грунте и критически сопоставлены с сопротивлениями, вычисленными аналитически по [219] — см. пример 66 в [262]. Выявлена ошибка аналитики до 66 % завышения расхода электроэнергии.

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 подзем-

ных вод [234], 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 [60] «комплексный расчет» — следует произвести комплексное моделирование, в ходе которого кроме фильтрации воды рассматривается 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.

Осмысление физических и технологических особенностей данной разновидности строительного водопонижения для слабопроницаемых грунтов позволяет наметить следующие пункты динамического нестационарного моделирования с помощью МКР-Excel (МЭТ):

1. Вначале надо решить стационарную плановую задачу по нахождению поля электрических потенциалов U_i (В) 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 найдено 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 моделировать необязательно. Можно ограничиться расчетом по формулам, так как гидравлика трубопроводов водопонижительных систем достаточно надежно проработана аналитически в ряде изданий: [26; 27; 60; 106; 219].

Приведем формулы моделирования для наиболее распространенного случая плановой нестационарной двухмерной (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 (48). Они могут быть также записаны на основе общей формулы (271) по аналогии так (см. рис. 70):

а) формула моделирования напора при электроосмотической фильтра-

ции с коэффициентами k_3 и μ_3 при мощности грунта M

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{k_3 M D t}{\mu_3} \left[\frac{U_1 - U_0}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{U_2 - U_0}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{U_0 - U_3}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{U_0 - U_4}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right]; \quad (304)$$

б) при вакуумировании грунтовых вод

$$H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{k D t}{\mu} \left[\frac{(\bar{h}_1^S + \bar{h}_0^S)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \frac{(\bar{h}_2^S + \bar{h}_0^S)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{(\bar{h}_0^S + \bar{h}_3^S)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \frac{(\bar{h}_0^S + \bar{h}_4^S)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right]. \quad (305)$$

В формуле (305) величину \bar{h} назовем, вслед за В.М. Григорьевым [60, с. 71; 62, с. 58], полной глубиной потока грунтовых вод:

$$\bar{h} = h + \alpha h_k, \quad (306)$$

где h — мощность грунтовых вод; h_k — высота капиллярной зоны над УГВ; α — коэффициент приведения капиллярной зоны к полностью водонасыщенной зоне. Вблизи вакуумной скважины h может полностью сработаться под влиянием вакуума. Тогда вода в скважину поступает через приведенную капиллярную зону высотой αh_k [60]. В.М. Григорьев на основе опытных данных [60, с. 208; 62, 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 [204, с. 187] рекомендует принимать для вакуумных дренажей $\alpha = 0,1 \dots 0,2$. Все предложения проверены практикой защиты от подтопления.

Скважины системы вакуумного водопонижения надлежит рассчитывать с учетом неустановившейся фильтрации воды при постоянном напоре [234, с. 7].

Приток грунтовых вод за счет электроосмотической фильтрации в скважину-катод с потенциалом U_0 можно найти на модели с квадратной сеткой так:

$$Q_c^{\text{зо}} = k_3 M \left[\left(\sum_{i=1}^4 U_i / 4 \right) - 4U_0 \right]. \quad (307)$$

Рассмотрим скважину с напором H_0 , на стенке которой полная глубина грунтовых вод \bar{h}_0 соответствует выражению (306). Тогда водоприток за счет вакуумирования водоносного пласта можно выразить при квадратной сетке на модели в виде

$$Q_c^{\text{в}} = \frac{k}{2} \left[\sum_{i=1}^4 (\bar{h}_i + \bar{h}_0) (H_i - H_0) \right]. \quad (308)$$

Полный водоприток в скважину совместной системы электроосмотического и вакуумного водопонижения

$$Q_c = Q_c^{\text{зо}} + Q_c^{\text{в}}. \quad (309)$$

Полный водоприток всей системы водопонижения Q есть сумма водопритоков отдельных скважин Q_c . Модель позволяет найти точно долю водопритока за счет электроосмоса и долю — за счет вакуумирования, то есть отдельно — см. пример 67 в нашей монографии [262].

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 $k_э = 0$ в таблице исходных данных с именами. Тогда, согласно формуле (304), процесс электроосмоса на модели будет отключен.

При отключении электроэнергии насосы тоже отключатся. Тут же перестанут работать эжекторы и исчезнет вакуум в скважинах. Тогда в скважине образуется начальный напор, соответствующий уровню воды на отметке эжектора по верху отстойника скважины. 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 [53, с. 63; 313, с. 283]:

$$t_v = 20 F_c S_c / Q_c, \quad (310)$$

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, по-

этому

$$t_v = t - t_a. \quad (311)$$

Формула моделирования изменяющегося напора в стволе скважины имеет вид

$$H_0^{S+1} = H_0^S + Q_c^S Dt / F_c, \quad (312)$$

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 (278).

В примере 67 монографии [262] продемонстрировано моделирование вакуумно-электроосмотического водопонижения. Реализовано производственное моделирование установки вакуумного эжекторного водопонижения для Омского метрополитена, усиленной электроосмосом. Так как коэффициент фильтрации суглинка имел предельное по В.Кнаупе [99] значение для применения вакуумного водопонижения $k = 0,01$ м/сут, то решено усилить осушительные работы по вакуумированию в зоне щитовой проходки с помощью электроосмотического водопонижения, которое дополнительно закрепляет грунт [78].

При глубоком водопонижении в соответствии с критериями (51)–(52) и нестационарном фильтрационном процессе осушения грунта была применена нелинеаризованная гидравлическая постановка фильтрации грунтовых вод. Движение влаги в капиллярной зоне, следуя В.М. Григорьеву [60], учтено высотой приведенной капиллярной зоны. Однако В.М. Григорьев применял для расчета чисто вакуумного водопонижения линеаризованные постановки. С помощью метода автора МЭТ такие упрощения не требуются, лишь специальными тестовыми задачами было обосновано в данном случае применение гидравлического метода вместо гидродинамического. Кроме того, авторская технология МЭТ позволяет проводить одновременное (без использования принципа суперпозиции) моделирование

процессов, в данном примере — вакуумной фильтрации и электроосмоса. Промоделированное стационарное электрическое поле наложено на нестационарное поле вакуумной фильтрации воды в грунте зоны щитовой проходки. В результате получают карты понижений УГВ, одна из которых показана на рис. 81 (пусковая камера щита заштрихована) [262].

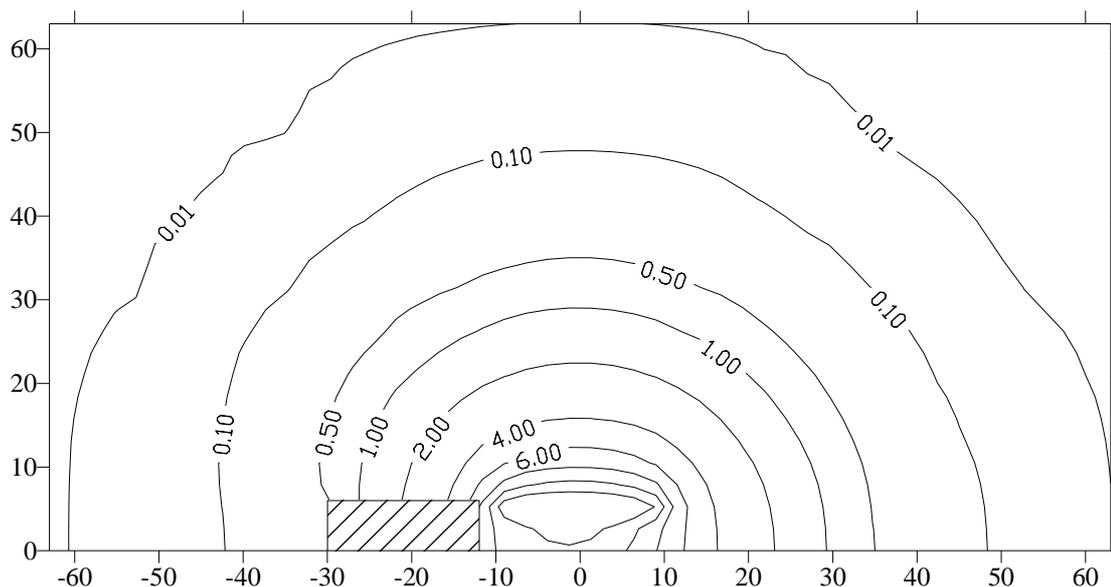


Рис. 81. Карта понижений УГВ через 12 суток работы совмещенной установки водопонижения (моделирование по автору)

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.

Для полноты изложения метода МЭТ сошлемся на пример 68 [262] моделирования трехмерной нестационарной фильтрации подземных вод в крестообразный лучевой дренаж — макропрограмму к нему см. в прил. 3.

Более сложные случаи моделирования процессов подтопления, водоотлива, водопонижения и дренирования в ходе проектирования защиты от подтопления в городском строительстве могут возникнуть при наличии водонасыщенных грунтов оснований, обладающих анизотропией фильтрационных параметров, двойной пористостью, повышенной слоистостью. Эти сложности для информационной технологии МКР-Excel (МЭТ) явля-

ются лишь количественными, но принципиальной трудности не представляют при использовании изложенных в данной диссертационной работе и нашей монографии [262] методов, методик и технологий авторского моделирования в электронных таблицах.

5.4. Выводы по главе 5

Достоверность новой информационной технологии — авторского метода моделирования в электронных таблицах (МЭТ) — проверена и подтверждена тщательным многолетним тестированием (научно-исследовательским моделированием автора) процессов подтопления и дренирования на типовых расчетных схемах областей фильтрации: в двухмерной и одномерной постановках; при стационарных и нестационарных процессах фильтрации подземных вод; в декартовых и цилиндрических координатах; в однородных и неоднородных по проницаемости водоносных пластах и др., а также натурными обследованиями [262].

Полученные моделированием результаты были сопоставлены с расчетными значениями напоров подземных вод и водопритоков, найденных по известным точным аналитическим зависимостям для соответствующих расчетных схем, которые в свое время получили В.И. Аравин, Г.И. Баренблатт, В.В. Ведерников, Н.Н. Веригин, М. Маскет (M. Muskat), А.Ж. Муфтахов, С.Н. Нумеров, Н.Н. Павловский, П.Я. Полубаринова-Кочина, А.В. Романов. Расхождения значений составили от 2–3 % на малых моделях (10–1000 узлов) до сотых–тысячных долей процентов на средних моделях (1000–10000 узлов), что удовлетворяет общепринятым критериям инженерной точности.

Таким образом, авторский метод моделирования в электронных таблицах (МЭТ) эффективен и полезен для определения влияния городского строительства на подтопление и дренирование территорий, позволяет получать научно обоснованные технические решения по защите от подтопления городских территорий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны за счет предотвращенного ущерба от подтопления.

Заключительные выводы и рекомендации

1. На основании выполненных автором исследований разработан новый подход к защите от подтопления в городском строительстве, позволяющий принимать научно обоснованные технические решения по борьбе с подтоплением территорий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны за счет предотвращенного ущерба от подтопления. В частности, для г. Омска предотвращенный годовой ущерб от подтопления на селитебной территории может достигать 83,93 млн. руб. (в базовых ценах 1984 г.), что составляет не менее трети средств на строительство жилья.

2. Разработанная автором классификация (см. табл. 2) показала, что наибольшее влияние на подтопление и дренирование территорий оказывают строительные конструкции и технологии цикла инженерной подготовки и нулевого (подземного) цикла. Общая тенденция влияния городского строительства (ГС) направлена в сторону подтопления, нежели дренирования, поэтому необходимо усиливать защиту от подтопления мероприятиями, влияющими на дренирование, особенно применением дренажа, как наиболее надежного средства.

3. На основе анализа существующих подходов, методов, методик и критериев прогнозов и моделирования процессов фильтрации, относящихся к влиянию городского строительства на подтопление и дренирование территорий, автором поставлен и разработан новый конструктивно-технологический подход к защите от подтопления в городском строительстве.

4. Разработан и широко применен новый прикладной математический метод автомодельных движений с численным моделированием (АДЧМ), позволяющий получать точные гидравлические решения по фильтрации грунтовых вод с малой мощностью потоков. Получены новые решения для

радиуса языка техногенных грунтовых вод от очага подтопления с постоянным уровнем воды, для размеров кривых (воронок) депрессий при применении строительных технологий водоотлива, водопонижения и дренажа. Они применимы и как эталоны для проверки приближенных решений, а также как критерии для определения размеров областей фильтрации грунтовых вод при моделировании влияния ГС на подтопление и дренирование территорий. Уточнены известные критерии линеаризации (51)–(52) и найден новый критерий (54) применимости гидравлической теории фильтрации, имеющие важное значение для прогнозов и моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве.

5. Разработана новая методика прогнозирования изменения проницаемости грунтов оснований зданий и сооружений как действие и последствие влияния конструктивных решений и технологий городского строительства. Часть задач решена классическими методами теории фильтрации: влияние строительства на уровни подземных вод в случае применения щитовых проходок, «стен в грунте», свайных креплений котлованов, при устройстве обратных засыпок.

6. Предложено уточнять элементы водного баланса подземных вод при прогнозе и моделировании подтопления и дренирования городских территорий с использованием данных метеостанций городов путем расчетов испарения с уровня грунтовых вод с учетом климатических факторов городской застройки (альбедо, затенение, продуваемость и др.) и последующим уточнением инфильтрационного питания.

7. Разработан и широко использован новый метод компьютерного моделирования в электронных таблицах (МЭТ) подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства. Новая информационная технология моделирования процессов фильтрации подземных вод многократно снижает трудоемкость моделирования в

сравнении с традиционными принципами программирования моделей. Технология автора МЭТ напоминает аналоговое моделирование, являясь виртуальной исследовательской лабораторией. Она позволяет моделировать в электронных таблицах стационарные и нестационарные процессы фильтрации воды, воздуха, влагопереноса, электроосмоса, консолидации грунтов, происходящие при подтоплении и дренировании в городском строительстве, с учетом техногенных изменений проницаемости грунтов оснований и т.д., с применением автоматизации обработки информации и управления моделированием.

8. В ходе исследований определены области применения методов и методик автора для аналитических прогнозов и компьютерного моделирования фильтрации и аналогичных процессов при защите от подтопления в городском строительстве:

а) в производственной деятельности строительных, проектных и изыскательских организаций разработанные методы и методики позволяют прогнозировать параметры фильтрационных процессов водоотлива, водопонижения и дренирования, совершенствовать конструктивные решения и технологии строительства с точки зрения борьбы с подтоплением, исследовать эффективность применения технических средств защиты от подтопления (водоотлива, водопонижения и дренажа) путем расчета и моделирования, повысить качество определения фильтрационных параметров в ходе инженерно-строительных изысканий с помощью имитационного моделирования, необходимое для 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 строительных процессов на окружающую гидрогеологическую среду городов путем аналитических расчетов и моделирования подтопления, водопонижения, дренажирования и др.;

б) научно-исследовательское моделирование может быть существенно ускорено с помощью метода автора МЭТ: для проверки полученных аналитических зависимостей по теории фильтрации; комбинирования аналитических, численных методов с лабораторным и натурным экспериментом с быстрой аппроксимацией данных и получением эмпирических формул; для моделирования сложных процессов фильтрации и влаготеплопереноса в пористых средах, не поддающихся аналитическому исследованию.

9. Новая технология моделирования автора МЭТ может быть применена в других научных дисциплинах строительного профиля и промышленности. В частности, в технологии строительного производства методика моделирования электроосмоса легко трансформируется в моделирование электропрогрева бетона. В строительной физике авторский метод можно использовать при моделировании влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений, применяя аналогию физических процессов фильтрации, теплопроводности, диффузии и др. В фундаментах строения и механике грунтов моделирование по автору можно применять для процессов фильтрационной консолидации грунтов оснований, прогнозировать осадки фундаментов и морозное пучение.

10. Научные результаты по защите от подтопления в городском строительстве, полученные автором, прошли внедрение и производственную апробацию на всесоюзном уровне [204], на крупных народно-хозяйственных объектах: при разработке технико-экономического обоснования защиты г. Омска от подтопления, при строительстве Омского метрополитена, в системе вузовского, послевузовского и дистанционного образования.

Список использованной литературы

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.: Изд-во 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. Арутюнян Р.Н. Вакуумное водопонижение в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
16. Атлас Омской области. – Омск: Изд-во «Роскартография», 1996. – 56 с.
17. Балущкин В.М., Сологаев В.И. Оптимизация технологии при возведении очистных сооружений с учетом их гидравлического режима // Совершенствование строительства в новых хозяйственных условиях. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 1991. – С. 9-11
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.: Высшая школа, 1978. – 328 с.

24. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – М.: Высшая 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 ин-

- женеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
35. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. – Л.: Гидрометеоздат, 1948. – 136 с.
36. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. – 255 с.
37. Бывальцев И.М. Расчет вентиляционных дренажных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1989. – 26 с.
38. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971. – 452 с.
39. Веригин Н.Н. О гравитационно-упругом режиме фильтрации // Труды ин-та «ВОДГЕО», вып. 22: Инженерная гидрогеология. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1969. – С. 6-17.
40. Веригин Н.Н. О неустановившемся движении грунтовых вод вблизи водохранилищ // Доклады Академии наук СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Том 66, № 6. – С. 1067-1070.
41. 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.
42. 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.
43. Веригин Н.Н. Расчет прямолинейных бесконечных рядов скважин // Труды лаборатории инженерной гидрогеологии. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1962. – Вып. 4. – С. 4—23.
44. Веригин Н.Н., Шестаков В.М. Методы расчета движения грунтовых вод в двухслойной среде. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1954. – 47 с.
45. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий / С.К. Абрамов, Н.Н. Биндеман, Ф.М. Бочеввер, Н.Н. Веригин

- гин. – М.: Госстройиздат, 1960. – 318 с.
46. Водопонижение в гидротехническом строительстве / Л.Н. Воробков, В.М. Гаврилко, П.В. Лобачёв, В.М. Шестаков. – М.: Стройиздат, 1960. – 244 с.
47. Волынский Б.А., Бухман В.Е. Модели для решения краевых задач. – М.: Физматгиз, 1960. – 451 с.
48. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. – М.: Недра, 1988. – 349 с.
49. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1980. – 359 с.
50. Гаврилко В.М., Алексеев В.С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
51. Гавшина З.П., Дзекцер Е.С. Условия подтопления грунтовыми водами застраиваемых территорий. – М.: Стройиздат, 1982. – 116 с.
52. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. – М.-Л.: ОНТИ, 1937. – 242 с.
53. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
54. 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.
55. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. – М.: Пищепромиздат, 1960. – 684 с.
56. Гирицкий Н.К. Некоторые вопросы динамики подземных вод // Гидрогеология и инженерная геология. – 1947. – № 9. – С. 3—100.
57. Годес Э.М., Нарбут Р.М. Строительство в водной среде: Справочник. – Л.: Стройиздат, 1989. – 528 с.
58. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. –

440 с.

59. Горбунов-Посадов М.И. Разрыв сплошности и уплотнение основания телом забивной сваи // Тр. НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1970. – Вып. 60. – С. 118-141.
60. Григорьев В.М. Вакуумное водопонижение. – М.: Стройиздат, 1973. – 224 с.
61. Григорьев В.М. Понижение уровня грунтовых вод иглофильтровыми установками. – М.: Госстройиздат, 1955. – 232 с.
62. 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.
63. Громадка П.Т., Лей Ч. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах. – М.: Мир, 1990. – 304 с.
64. Гусак А.А., Гусак Г.М., Бричикова Е.А. Справочник по высшей математике. – Минск: ТетраСистемс, 2000. – 640 с.
65. Давидянц Н.М., Карагодин А.Л., Карагодин В.Л. Городские водостоки. – М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1961. – 184 с.
66. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. – М.: Мир, 1969. – 312 с.
67. Дегтярев Б.М. Дренаж в промышленном и гражданском строительстве. – М.: Стройиздат, 1990. – 238 с.
68. Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Муфтахов А.Ж. Защита оснований зданий и сооружений от воздействия подземных вод. – М.: Стройиздат, 1985. – 264 с.
69. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.
70. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и опера-

- ционное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 544 с.
71. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 467 с.
72. Дренаж сельскохозяйственных земель: Пер. с англ.; Под ред. Дж.Н. Лутин. – М.: Колос, 1964. – 720 с.
73. Емельянов А.В., Клейман Д.Б. Водопонижение в гражданском и промышленном строительстве. – М.: Стройиздат, 1971. – 81 с.
74. Ермаков С.М., Некруткин В.В., Сипин А.С. Случайные процессы для решения классических уравнений математической физики. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
75. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. – Киев: Вища школа, 1976. – 192 с.
76. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
77. 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.
78. Жинкин Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве. – Л.; М.: Стройиздат, 1966. – 196 с.
79. Жуковский Н.Е. Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод // Журнал русского физико-химического общества. – 1889. - Т. XXI, отд. I, вып. 1. – С. 1-20.
80. Зальцберг Э.А. Режим и баланс грунтовых вод зоны избыточного увлажнения. – Л.: Недра, 1980. – 207 с.
81. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.
82. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

83. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
84. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. – М.: Высшая школа, 1985. – 352 с.
85. Истомина В.С., Буренкова В.В., Мишурова Г.В. Фильтрационная прочность глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1975. – 220 с.
86. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
87. Каменский Г.Н. Основы динамики подземных вод. – М.: Госгеолтехиздат, 1943. – 248 с.
88. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
89. Канюка Н.С., Шевчук Б.М., Белостоцкий О.Б. Справочник по проектированию организации строительства. – Киев: Изд-во «Будівельник», 1969. – 448 с.
90. Карнацевич И.В. Закономерности и ресурсы тепловлагообмена на территории Сибири: Дис. ... д-ра геогр. наук. – Иркутск: СО АН СССР, 1991. – 466 с.
91. 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.
92. 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.
93. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
94. Карслоу Х., Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. – М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. – 292 с.

95. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
96. Климат Омска / Под. ред. Ц.А. Швер. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 247 с.
97. Климентов П.П., Кононов В.М. Динамика подземных вод. – М.: Высшая школа, 1985. – 384 с.
98. Клиорина Г.И., Осин В.А., Шумилов М.С. Инженерная подготовка городских территорий. – М.: Высшая школа, 1984. – 271 с.
99. Кнаупе В. Устройство котлованов и водопонижение: Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1988. – 376 с.
100. Кожин И.В., Добровольский Р.Г. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. – М.: Стройиздат, 1988. – 348 с.
101. Кондон Р. IP — новый шаг в технологии программирования // Компьютеры + программы. – Киев: Комиздат, 1995. – № 8. – С. 19.
102. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. – М.: Стройиздат, 1988. – 287 с.
103. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
104. Коротеев А.П. Спутник гидрогеолога. – М.; Л.: ОНТИ, 1934. – 316 с.
105. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов. – М.: Стройиздат, 1981. – 456 с.
106. Костерин Э.В. Основания и фундаменты. – М.: Высшая школа, 1990. – 431 с.
107. Костин С.И. Основы метеорологии и климатологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1955. – 395 с.
108. Кох О. Excel 4.0 для пользователя. – М.: БИНОМ, 1994. – 448 с.
109. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
110. Крейшман К.К. Защита деревянных конструкций от гниения, древо-

- точцев и огня. – Л.: Стройиздат, 1967. – 136 с.
111. Кристеа Н. Подземная гидравлика: Пер. с рум.. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – Т. II. – 492 с.
112. Куприянов Е.М. Уплотнение и осадки грунтов. – М.: Госстройиздат, 1954. – 168 с.
113. Куранов Н.П. Линейные модели гидродинамической теории фильтрации // Доклады Академии наук СССР. – М.: Наука, 1984. – Т. 278, № 2. – С. 309-313.
114. 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.
115. 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.
116. Куранов Н.П. Прогнозы подтопления и дренирования застроенных территорий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 42 с.
117. Куранов Н.П., Расторгуев А.В., Кумов П.Н. Различные методы прогнозирования образования новых техногенных горизонтов и верховодки на урбанизированных территориях // Проблемы инженерной геоэкологии. – М.: Изд-во «ДАР/ВОДГЕО», 2002. – Вып. 2. – С. 72-76.
118. Кусакин И.П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 248 с.
119. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
120. Ландсберг Г.Е. Климат города: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 248 с.
121. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. – М.; Л.: Изд-во АН

- СССР, 1936. – 316 с.
122. Лейбензон Л.С. Движение газа в пористой среде // Нефтяное и сланцевое хозяйство. – 1929. – № 10. – С. 497-519.
 123. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988. – 228 с.
 124. Ломизе Г.М., Нетушил А.В. Электроосмотическое водопонижение. – М.; Л.: Энергоиздат, 1958. – 173 с.
 125. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра, 1984. – 511 с.
 126. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. – Л.: Недра, 1978. – 496 с.
 127. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1976. – 408 с.
 128. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
 129. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
 130. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
 131. Маккавеев А.А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
 132. Мак-Кинни Б. Крепкий орешек Visual Basic 4. – М.: Microsoft Press, 1996. – 560 с.
 133. Мариупольский Г.М. Основные параметры водопонизительных систем и методика типовых расчетов // Индустриальные методы строительного водопонижения. – М.: Госстройиздат, 1962. – № 48. – С. 5-37.
 134. Мариупольский Г.М. Теоретические основы и расчет гидромеханического и электроосмотического вакуумирования фильтрационного потока при водопонижении // Специальные способы строительного водо-

- понижения. – М.: Госстройиздат, 1959. – № 35. – С. 5-30.
135. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
136. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
137. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.
138. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1982. – 512 с.
139. Мезенцев В.С. Гидролого-климатические основы проектирования гидромелиораций: Учеб. пособие / ОмСХИ. – Омск, 1993. – 128 с.
140. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.
141. Мелиорация и водное хозяйство: Справочник / Под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – Т. 5. – 400 с.
142. Мелиорация и использование осушенных земель / Под ред. В.Е. Алексеевского. – Киев: Урожай, 1988. – 184 с.
143. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
144. Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло) / Под ред. Ю.А. Шрейдера. – М.: Физматгиз, 1962. – 332 с.
145. 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.
146. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения / Ф.М. Бочевер и Н.Н. Веригин; ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Госстройиздат, 1961. – 200 с.
147. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем /

- С.В. Васильев, Н.Н. Веригин, Б.А. Глейзер, Г.А. Разумов, В.К. Рудаков, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков; Под. ред. Н.Н. Веригина. – М.: Колос, 1970. – 440 с.
148. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. – М.: Недра, 1983. – 358 с.
149. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. – М.: Недра, 1974. – 295 с.
150. Молоков М.В. Дождевая канализация площадок промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1964. – 184 с.
151. Момчилов В.С. Защита шахт от подземных вод. – М.: Недра, 1989. – 189 с.
152. Муфтахов А.Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975. – 44 с.
153. 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.
154. 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.
155. 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.
156. Муфтахов А.Ж., Абдель Азиз Н.М.Х. Экспресс-методы определения фильтрационных параметров слабопроницаемых пород // Технология и

- технические средства строительного водопонижения и дренажа: Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1990. – С. 27-36.
157. 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.
158. 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.
159. Найфельд Л.Р. Инженерная подготовка пойменных и заболоченных территорий для градостроительства. – М.: Стройиздат, 1974. – 179 с.
160. Найфельд Л.Р., Тарасов Н.А. Освоение неудобных земель под городскую застройку. – М.: Стройиздат, 1968. – 224 с.
161. Нарбут Р.М. Работа свай в глинистых грунтах. – Л.: Стройиздат, 1972. – 160 с.
162. Недрига В.П. Расчет пространственной фильтрации в земляных плотинах на участке их примыкания к бетонным сооружениям с учетом водопроницаемости противоперфорационной диафрагмы. – М.: Изд-во ВОДГЕО, 1959. – 118 с.
163. 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.
164. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1971. – 267 с.
165. Нумеров С.Н. Медленно изменяющаяся неустановившаяся фильтрация // Известия ВНИИГ. – Л., 1948, т. 37. – С. 3-29.
166. Нумеров С.Н. О фильтрации к несовершенной дренажной траншее в

- горизонтальном артезианском пласте // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1954. – Т. 52. – С. 119-130.
167. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.
168. Омск – 2000: Справочный материал для депутатов городского совета / ГлавОмскархитектура. – Омск, 1989. – 56 с.
169. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. – М.: Мир, 1990. – 662 с.
170. Орвис В.Д. Excel для ученых, инженеров и студентов. – Киев: Юниор, 1999. – 528 с.
171. Орвис В.Д. Visual Basic for Application на примерах. – М.: Изд-во БИНОМ, 1995. – 512 с.
172. Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
173. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
174. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов, А.В. Лебедев, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1969. – 368 с.
175. Основы советского градостроительства / Центральный научно-исследовательский и проектный институт по градостроительству. – М.: Стройиздат, 1967. – 196 с. – Т. 3.
176. 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.
177. Павилонский В.М. Метод определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та «ВОДГЕО», вып. 7. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1964. – С. 59-79.
178. Павилонский В.М. Противофильтрационные устройства накопителей отходов промышленных предприятий // Исследования хвостохранилищ

- и накопителей промстоков. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – С. 12-28.
179. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 284 с.
180. Павловская Л.Н., Шестаков В.М. Методические указания по фильтрационным расчетам водопонижительных установок. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 124 с.
181. Павловский Н.Н. Основы метода гидромеханического решения задачи о свободной фильтрации из открытых русел // Известия ВНИИГ. – М.; Л., 1936. – Т. 19. – С. 5—24.
182. Павловский Н.Н. Собрание сочинений. Т. II. Движение грунтовых вод. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 772 с.
183. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. – Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института, 1922. – 752 с.
184. Панов Д.Ю. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений. – М.; Л.: Гостехтеориздат, 1950. – 184 с.
185. Пек Р.Б., Хенсон У.Э., Торнбурн Т.Х. Основания и фундаменты: Пер. с англ. – М.: Госстройиздат, 1958. – 336 с.
186. Песков В.Г., Зинь В.С., Мобило Л.В. Механизация эксплуатационных работ на гидромелиоративных системах. – М.: Агропромиздат, 1986. – 143 с.
187. Пилатовский В. П. Основы гидромеханики тонкого пласта. – М.: Недра, 1966. – 309 с.
188. Пильдыш С.А. Определение фильтрационных параметров слабопроницаемого разделяющего слоя грунта // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988. – С. 83-88.
189. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 456 с.

190. Плотников Н.А., Алексеев В.С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
191. Плотников Н.И., Краевский С. Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. – М.: Недра, 1983. – 208 с.
192. 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.
193. 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.
194. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Гостехтеориздат, 1952. – 676 с.
195. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
196. Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н. Математические методы в вопросах орошения. – М.: Наука, 1969. – 416 с.
197. Пономаренко Ю.В., Анпилов В.Е. Лучевой дренаж застроенных территорий. – М.: Недра, 1989. – 198 с.
198. 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.
199. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплового режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02-85) / СоюздорНИИ. – М.: Стройиздат, 1989. – 97 с.
200. Пособие по производству работ при устройстве оснований и фундаментов (к СНиП 3.02.01-83). – М.: Стройиздат, 1986. – 576 с.
201. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве / С.К. Абрамов, Б.М. Дегтярев, Е.С. Дзекцер,

- Г.В. Донской, А.Ж. Муфтахов; Под. ред. С.К. Абрамова. – М.: Стройиздат, 1978. – 177 с.
202. 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.
203. 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.
204. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: Справочное пособие к СНиП / А.Ж. Муфтахов, И.В. Коринченко, Н.М. Григорьева, В.И. Сологаев, А.П. Шевчик; ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1991. – 272 с.
205. 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.
206. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1967) / Под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. – М.: Наука, 1969. – 546 с.
207. Разработка систем вакуумного водопонижения для подземных щитовых проходок (на примере 1 очередь 1 линии Омского метрополитена): Отчет о НИР / СибАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. - № ГР 01940001695; Инв. № 03940001031. – Омск, 1993. – 51 с.
208. Разумов Г.А., Хасин М.Ф. Тонушие города. – М.: Стройиздат, 1991. – 256 с.
209. Рекомендации по методике оценки и прогноза гидрогеологических условий при подтоплении городских территорий / ПНИИИС Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с.

210. Рекомендации по натурному обследованию дренажей застроенных территорий / ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1984. – 14 с.
211. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 141 с.
212. Рекомендации по определению капитальных вложений и эксплуатационных расходов для сооружений инженерной защиты от подтопления территорий городов / ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1987. – 47 с.
213. Рекомендации по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Изд-во ВНИИ ВОДГЕО, 1976. – 324 с.
214. 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.
215. Ретгер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
216. Ретхати Л. Грунтовые воды и строительство / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1989. – 432 с.
217. 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.
218. Рудаков В.К., Харченко Э.М. Расчеты методом Монте-Карло пространственной неустановившейся фильтрации при орошении в неоднородных водоносных пластах // Вопросы гидрогеологических прогнозов в связи с ирригацией земель и водоснабжением. – Днепропетровск, 1973. – Вып. 6. – С. 18-23. – (Труды Днепропетровского гос. ун-та).
219. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1977. – 240 с.

220. 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.
221. 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.
222. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
223. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
224. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
225. Самсонов Б.Г. Приток подземных вод к разведочным горным выработкам. – М.: Недра, 1991. – 159 с.
226. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. – М.: Физматгиз, 1962. – 464 с.
227. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
228. Сенченко Н.М. Сырость в жилых зданиях, её источники и борьба с ней. – М.: Стройиздат, 1967. – 257 с.
229. Силин-Бекчурин А.И. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1965. – 375 с.
230. Смородинов М.И. Водопонизительные установки. – М.: Стройиздат, 1984. – 117 с.
231. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. – М.: ГУП ЦПП, 1995. – 50 с.
232. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
233. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения / Гос-

- строй СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с.
234. СНиП 2.06.14-85. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 40 с.
235. СНиП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 20 с.
236. СНиП 3.01.01-85*. Организация строительного производства. – М.: ГУП ЦПП, 1995. – 36 с.
237. 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.
238. Соколовский В.В. Теория пластичности. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
239. 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.
240. Сологаев В.И. Анализ причин и последствий подтопления объектов г. Омска по результатам работы экспертной группы городской администрации в 1993 г. // Автомобильные дороги Сибири: Тезисы докл. Всероссийской междунар. научно-технической конференции. – Омск, 1994. – С. 165-166.
241. 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.
242. 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.

243. 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.
244. Сологаев В.И. Влияние свайных оснований на фильтрацию подземных вод на застроенных территориях // Совершенствование методов инженерных изысканий в строительстве; ПНИИИС. – Депонировано во ВНИИС 14 апреля 1986 г., № 6910. – М., 1986. – С. 78-88.
245. Сологаев В.И. Защита от подтопления в городском строительстве. Устройство и работа: Конспекты лекций. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – 56 с.
246. Сологаев В.И. К определению проницаемости грунта около забивных свай // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1991. - № 1. – С. 110-112.
247. Сологаев В.И. Компьютерное моделирование трёхмерной нестационарной фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 236-242.
248. Сологаев В.И. Концепции моделирования защиты от подтопления территорий застройки // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 17-22.
249. Сологаев В.И. Механика жидкости и газа. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1995. – 56 с.
250. Сологаев В.И. Моделирование фильтрации с применением компьютерных ОLE-технологий // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 229-236.
251. Сологаев В.И. О применении систем вакуумного водопонижения при строительстве Омского метрополитена // Материалы междунар. научно-практической конференции «Город и транспорт». – Ч. II. – Россия, Омск: Изд-во СибАДИ, 1996. – С. 16-18.
252. Сологаев В.И. Об изменении проницаемости грунта, уплотненного

- забивной сваей // Изв. вузов. Строительство. – 1992. - № 1. – С. 112-114.
253. Сологаев В.И. Применение при проектировании, строительстве и эксплуатации защиты от подтопления г. Омска аналитических методов расчета и компьютерного моделирования // Тезисы докл. междунар. конференции «Роль России в развитии экологии на пороге XXI века» . – Омск: Изд-во ОГПУ, 1997. – С. 108-110.
254. 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.
255. Сологаев В.И. Прогнозы изменения гидрогеологических условий на застраиваемых территориях с учётом свайных фундаментов зданий и сооружений // Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии городов и городских агломераций. – М.: Наука, 1987. – С. 376.
256. Сологаев В.И. Прогнозы повышения уровня грунтовых вод под влиянием строительства Омского метрополитена // Природа и экономика Омской области. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1989. – С. 183-184.
257. 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.
258. Сологаев В.И. Разностные схемы компьютерного моделирования фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 242-247.
259. Сологаев В.И. Расчет подтопления застраиваемых территорий с учетом влияния свайных оснований: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 242 с.
260. Сологаев В.И. Расчет подтопления застраиваемых территорий с учетом влияния свайных оснований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. – 23 с.

261. Сологаев В.И. Уточнение фильтрационных параметров водоносных пластов при наличии свайных фундаментов // Гидрогеологические исследования при разведке и освоении месторождений полезных ископаемых в связи с охраной геологической среды; ВИОГЕМ. – Белгород, 1986. – С. 18-19.
262. Сологаев В.И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование защиты от подтопления в городском строительстве: Монография. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. – 416 с.
263. Сологаев В.И. Фильтрационный расчёт двухлинейного ряда водосбросных колодцев / Деп. ВНИИНТПИ № 10683. Библиографический указатель деп. рукописей ВНИИНТПИ. – М., 1990. – Вып. 9. – 7 с.
264. 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.
265. Сотников А.Б. Гидрогеологические прогнозы при строительстве в суровых климатических условиях. – М.: Недра, 1984. – 80 с.
266. Спорышев В.С. Влияние пластового включения круглой формы на однородный фильтрационный поток // Труды Всесоюзного нефтегазового НИИ. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – С. 10-22.
267. Справочник по климату СССР. Ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 72 с.
268. Справочник по климату СССР. Ч. I. Температура воздуха. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Метеорологические данные за отдельные годы. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 256 с.
269. Справочник по климату СССР. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Вып. 17. Омская и Тюменская обл. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 260 с.

270. 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.
271. Справочник по осушению горных пород. – М.: Недра, 1984. – 572 с.
272. Справочник по проектированию инженерной подготовки застраиваемых территорий / Под ред. В.С. Нищука. – Киев: Будівельник, 1983. – 192 с.
273. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
274. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. – Л.: Недра, 1979. – 512 с.
275. Строительная механика / Под ред. А.В. Даркова. – М.: Высшая школа, 1976. – 600 с.
276. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. – Кн. 2.
277. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 508 с.
278. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958. – 608 с.
279. Технология городского строительства / Под ред. П.Х. Бесценного. – М.: Высшая школа, 1975. – 336 с.
280. Технология строительных процессов / Под ред. Н.Н. Данилова. – М.: Высшая школа, 2000. – 464 с.
281. 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.
282. Тихомолова К.П. Электроосмос. – Л.: Химия, 1989. – 248 с.
283. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. –

- М.: Наука, 1986. – 288 с.
284. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
285. Тулаев А.Я. Осушение земляного полотна городских дорог. – М.: Стройиздат, 1983. – 132 с.
286. Тулаев А.Я., Авсеенко А.А., Малицкий Л.С. Строительство улиц и городских дорог. Ч. 1. Сооружение земляного полотна / Под ред. А.Я. Тулаева. – М.: Стройиздат, 1987. – 480 с.
287. Тюменцева О.В. О развитии процесса подтопления в городе Омске // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 67-73.
288. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / ГГИ гидрометслужбы СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 84 с.
289. Усенко В.С. Вопросы теории фильтрационных расчетов дренажных и водозаборных скважин. – М.: Колос, 1968. – 302 с.
290. Уэллс Э., Харшбаргер С. Microsoft Excel 97. Библиотека разработчика / Пер. с англ. – М.: Изд-во «Русская редакция», 1998. – 536 с.
291. Федоров В.И. Активная защита сооружений и фундаментов в обводняющихся пучинообразных грунтах. – Владивосток: Дальпресс, 1995. – 156 с.
292. Флорин В.А. Вопросы консолидации земляных масс // Известия ВНИИГ. – Л., 1947, т. 34. – С. 133-146.
293. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. I. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. – М.: Госстройиздат, 1959. – 358 с.
294. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. II. Деформация и устойчивость оснований сооружений. – М.: Госстройиздат, 1961. – 544 с.
295. Флорин В.А. Расчеты оснований гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1948. – 188 с.

296. Флорин В.А. Теория уплотнения земляных масс. – М.: Госстройиздат, 1948. – 284 с.
297. Форхгеймер Ф. Гидравлика. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 616 с.
298. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне (гидрологические аспекты). – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 240 с.
299. Холопов О.В. Расчет времени затопления грунтовыми водами линейных подземных сооружений // Гидрогеологические прогнозы при защите территорий от подтопления: Тр. ин-та ВОДГЕО. – М., 1988. – С. 77-83.
300. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. – М.: Недра, 1966. – 304 с.
301. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 196 с.
302. Чекалюк Э. Б. Об эффективном радиусе влияния скважины // Нефтяное хозяйство. – М., 1950. – № 4. – С. 33-36.
303. Чепмен Р.Е. Геология и вода. Введение в механику флюидов для геологов. – Л.: Недра, 1983. – 160 с.
304. 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.
305. Черный Г.И. Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. – Киев: Наукова думка, 1979. – 132 с.
306. 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.
307. Швидлер М. И. Фильтрационные течения в неоднородных средах. –

- М.: Гостоптехиздат, 1963. – 136 с.
308. Швидлер М.И. Решение плоских фильтрационных задач методом Монте-Карло // Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. – М., 1963. – № 1. – С. 141-145.
309. Швидлер М.И. Статистическая гидродинамика пористых сред. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
310. Шевчик А.П. Исследование вентиляционного и пневмонагнетательного способов дренирования слабопроницаемых грунтов и других пористых сред: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – 19 с.
311. Шепелев Н.П., Шумилов М.С. Реконструкция городской застройки. – М.: Высшая школа, 2000. – 271 с.
312. 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.
313. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 368 с.
314. Шестаков В.М., Кравченко И.П., Пашковский И.С. Практикум по динамике подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 224 с.
315. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Соيفер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. – М.: Недра, 1982. – 245 с.
316. Шкиннис Ц.Н. Гидрологическое действие дренажа. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 312 с.
317. Шнейдерман Б. Психология программирования: Человеческие факторы в вычислительных и информационных системах. – М.: Радио и связь, 1984. – 304 с.
318. Шоу Р.Х. Модель компонентного объекта OLE // PC Magazin. – М.: Russian Edition, 1996. – № 6. – С. 145-150.

319. Шоу Р.Х. Основы технологии OLE // PC Magazin. -М.: Russian Edition, 1996. – № 2. – С. 145-150.
320. Эггельсманн Р. Руководство по дренажу: Пер. с нем. – М.: Колос, 1984. – 247 с.
321. Элбакидзе М.Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.
322. 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.
323. Яковлев С.В., Ласков Ю.М. Канализация. – М.: Стройиздат, 1987. – 319 с.
324. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
325. 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.
326. 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. Cont. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. — 3 Sept., 1987.Vol. 1. – Rotterdam; Boston, 1987. – P. 285-288.
327. Blower Tim, Simpson Brian. Rising ground-water levels beneath London // «Struct. Surv.», 1988. – 6, № 3. – P. 229—232.
328. 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.
329. Boussinesq J. Recherches theoriques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sources. – C.R. Acad. Sci. – Paris. – J. Math. pures et appl., 1903-1904. – 10, – P. 5-78, 363-394.
330. Darcy H. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. – Paris: Victor Dalmont, 1856. – 647 p.

331. 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.
332. 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.
333. Forchheimer Ph. *Hydraulik.* – Leipzig, Berlin: Teubner, 1924. – 556 s.
334. 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.
335. Gerdes H. Grundwasserduker bei Tunnelbauwerken // «Wasser und Boden». – 1987. – 39, № 11. – S. 575-578.
336. Karacsonyi Sandor. A kozmuvesltes hatasa a telepules alatti talajvizszint alakulasara // *Közlekedéséptés mélyépitéstud. szem.*— 1988.—38, № 7. - S. 305—309, 334, 335, 336.
337. Kozeny J. *Hydrologische Grundlagen des Dranversuches.* – Wien: Acad. Wissensch, 1927. – 136 (2a). – S. 271-406.
338. 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.
339. Lockington D.A., Parlange J.Y., Parlange M.B., Selker J. Similarity of the Boussinesq equation // *Advances In Water Resources (USA).* – 2000. – N 23. – PP. 725-729.
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. Pavilonisky 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 Laszlo. Belteruleti talajviiproblemak // Mernokgeol. 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, N 11. - P. 25-27.
345. Schneider G. Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumabnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umstromungsmöglichkeit // 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 abschnittswisen Durchbruchen // 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 NOT-Vortrieben beim U-Bahn-Bau der Stadt Wien // «Berg- und Huttenmann. Monatsh.». — 1988. — 133, № 6. - S. 287—296.
350. Stallmann R.W. Effects of Water Tabel Conditions on Water Level Changes near Pumping Wells // Water Resources Research. — 1965. — Vol. 1, N 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 phreatique au droit des ouvrages metro// Groundwater Eff. Geotechn. Eng., Vol. 1. — Rotterdam; Boston, 1987. — P. 145-148.

Приложения

Приложение 1

Эмпирические зависимости по испаряемости

В трудах по климатологии [91; 92; 139; 140 и др.] содержатся в виде таблиц первичные данные по испаряемости (максимально возможному испарению с поверхности суши) ε_0 . Эту величину по-другому называют: «водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов климата». При прогнозе подтопления и дренирования испаряемость ε_0 входит в формулу С.Ф. Аверьянова (244). Для моделирования защиты от подтопления величину ε_0 удобнее выразить в виде формулы. Поэтому мы обработали первичные табличные данные ε_0 [91; 92; 139; 140] методом кусочной аппроксимации с помощью квадратичных полиномов [34]. Трудоемкие расчеты были автоматизированы в Excel. Таким образом, были получены эмпирические формулы по суточной испаряемости ε_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, j 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 j = 2 To numCols_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 j
```

```
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 5.01
```

```
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 5.01, 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
AppActivate "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

```

Сведения о внедрении

Перечень справок о внедрении и других документов

1. О внедрении научной методики: письмо территориального проектного института ОАО Омскгражданпроект № 74-42 от 28.01.2002 г. 332
2. Справка о внедрении: письмо ОАО «ОмскТИСИЗ» № 01/75 от 25.01.2002 г. 333
3. Договор о творческом содружестве СибАДИ — ОАО «ОмскТИСИЗ» 334
4. Письмо ОмскТИСИЗ Госстроя РСФСР № 05-119 от 16.01.1989 г. 335
5. О внедрении: письмо ОмскТИСИЗ Госстроя РСФСР № 05-436 от 06.10.1992 г. 336
6. О внедрении: письмо ОмскТИСИЗ Госстроя РСФСР № 01-141 от 05.04.1993 г. 337
7. О внедрении: письмо ОмскТИСИЗ Госстроя РСФСР № 01-142 от 05.04.1993 г. 338
8. Справка о внедрении в учебный процесс СибАДИ электронных курсов дистанционного обучения в Internet: от 15 июня 2000 г. 339
9. Рабочая программа по дисциплине «Защита от подтопления в городском строительстве»: титульный лист СибАДИ от 15.02.1999 г. 340
10. Справка Регионального центра повышения квалификации (РЦПК СибАДИ) от 10.04.2001 г. 341
11. Распоряжение Главы администрации города Омска от 11.08.93 г. № 515-р 342
12. Расширенная программа по борьбе с подтоплением грунтовыми водами г. Омска от 22.02.92 г. 343
13. Письмо проектного института Омскгражданпроект № 253-м/39 от 19.08.93 г. 346
14. Об устранении замечаний Главгосэкспертизы: письмо Дирекции строящегося метрополитена г. Омска от 29.03.94 г. № 717-м/9 347
15. Письмо фирмы МАК о направлении заключений № 05-3/94 от 24.02.94 г. 348
16. Перечень научно-исследовательских работ (НИР) канд. техн. наук, доцента Сологаева В.И. 349

ПЕРЕЧЕНЬ

научно-исследовательских работ (НИР)
канд. техн. наук, доцента Сологаева В.И.

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Разработка прогнозной карты гидроизогипс и гидроизопьез на период строительства 1 очереди 1 линии омского метрополитена: Отчет о НИР / СибАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. – № ГР 01940001692; Инв. № 03940001034. – Омск, 1993. – 28 с.
- 6) Разработка прогнозной карты гидроизогипс и гидроизопьез на период эксплуатации 1 очереди 1 линии омского метрополитена: Отчет о НИР / СибАДИ; Рук. и отв. исп. Сологаев В.И. – № ГР 01940001693; Инв. № 03940001033. – Омск, 1993. – 33 с.

Буквенные обозначения

- A и B — длина и ширина объекта, $м$.
- a — коэффициент пьезо- или уровнепроводности, $м^2/сут$.
- a — шаг свай в ряду, $м$.
- a_c — коэффициент сжимаемости грунта, $Па^{-1}$.
- a_y — коэффициент уровнепроводности грунтовых вод, $м^2/сут$.
- C_r — сцепление грунта, $Па$.
- D — коэффициент диффузии, $м^2/сут$.
- d — размер поперечного сечения свай, $м$.
- DL, Dx, Dy, Dz, Dr — пространственные шаги конечно-разностной сетки, $м$.
- Dt — шаг времени на конечно-разностной сетке, $сут$.
- Dt_{max} — максимально возможный шаг времени на одно-, двух- и трехмерных МКР-моделях по явным схемам (критерий устойчивости), $сут$.
- e — коэффициент пористости.
- F — площадь, $м^2$.
- G — степень влажности грунта.
- g — ускорение свободного падения, $м/с^2$.
- H — напор, $м$.
- h — мощность грунтовых вод, $м$.
- h_e — естественная мощность грунтовых вод, $м$.
- h_p — пьезометрическая высота или пьезометрический напор, $м$.
- h_k — высота капиллярного поднятия, $м$.
- h_c — средняя мощность грунтовых вод, $м$.
- I — пьезометрический уклон или градиент напора.
- i, j — индексы или номера.
- k — коэффициент фильтрации, $м/сут$.
- k_0 — газопроницаемость, $м^2$.
- $k_{Э}$ — коэффициент электроосмотической фильтрации, $м^2/(В \cdot сут)$.
- L — длина пути фильтрации, $м$.
- L — длина пути диффузии, $м$.
- L — длина области фильтрации, $м$.
- L_t — расчетная длина области питания траншеи или вытянутого котлована (для расчета водопритока), $м$.
- $L_{вл}$ — зона влияния откачки из траншеи или вытянутого котлована на УГВ (длина кривой депрессии), $м$.
- $L_{исп}$ — удельная теплота испарения воды, $МДж/(м^2 \cdot мм)$.
- $L_{яз}$ — длина языка подтопления, $м$.
- l — мощность водонасыщенного слоя грунта, примыкающего к боковой поверхности свай, $м$.

- l — ширина зоны стока с края вытянутой линзы, *м*.
- l — длина фильтра скважины, *м*.
- M — мощность напорного водоносного пласта, *м*.
- m — расстояние от водоупора до низа траншеи, котлована или дренажа, *м*.
- N — число пространственных измерений.
- $N_{\text{ш}}$ — число шагов конечно-разностной сетки.
- n — эмпирический коэффициент в формуле (244).
- n — пористость грунта.
- p — давление, *Па*.
- Q — расход (полный водоприток), $\text{м}^3/\text{сут}$.
- q — расход (водоприток) на 1 погонный метр длины траншеи, вытянутого котлована или дренажа, $\text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{м})$.
- R — радиус чего-либо, *м*.
- $R_{\text{мст}}$ — радиационный баланс (остаточная радиация), измеренный на городской метеостанции, $\text{МДж}/\text{м}^2$.
- r — радиальная или горизонтальная цилиндрическая координата, *м*.
- S — понижение (перепад) уровней воды, *м*.
- S — номер шага времени в МКР-модели.
- T — температура, $^{\circ}\text{C}$.
- t — время, *сут*.
- U — математическая подстановка.
- U — электрическое напряжение или потенциал, *В*.
- u — периметр сваи, *м*.
- V — объем, м^3 .
- V — скорость фильтрации, $\text{м}/\text{сут}$.
- W — массовая влажность грунта или материала, $\text{кг}/\text{кг}$.
- W_0 — объемная влажность грунта или материала.
- x, y — горизонтальные декартовы координаты, *м*.
- z — вертикальная декартова координата или вертикальная отметка точки, *м*.
- z — глубина залегания УГВ от поверхности земли в формуле (244).
- z_0 — критическая глубина залегания УГВ от поверхности земли в формуле (244).
- $\alpha_{\text{мст}}$ — альbedo поверхности земли на метеостанции.
- $\alpha_{\text{ст}}$ — коэффициент стока верховодки с края вытянутой линзы.
- α_y — альbedo поверхности земли на участке застройки.
- β — коэффициент.
- β_S — коэффициент уплотнения грунта под статической нагрузкой.
- β_D — коэффициент уплотнения грунта под динамической нагрузкой.
- γ — удельный вес воды, $\text{Н}/\text{м}^3$.
- γ_i — коэффициент анизотропии.

- γ, ξ — относительные координаты эллиптического цилиндра.
- Δ — разность чего-либо.
- δ — относительная ошибка или погрешность, %.
- δ — толщина «стены в грунте», м.
- ε — интенсивность испарения влаги с УГВ, м/сут.
- ε_0 — испаряемость, м/сут.
- $\varepsilon_{\text{мст}}$ — испаряемость, измеренная на городской метеостанции, м/сут.
- ζ — дополнительное фильтрационное сопротивление.
- ζ — коэффициент гидравлического сопротивления.
- $\zeta_{\text{пл}}$ — дополнительное фильтрационное сопротивление несовершенного котлована (пластового дренажа).
- η — обобщенная координата.
- η — относительная проницаемость грунта.
- $\eta_{\text{уп}}$ — коэффициент упругости, м⁻¹.
- Θ — объемная деформация грунта.
- λ — обозначение в формуле (98).
- μ — коэффициент гравитационной водоотдачи, недостаток насыщения.
- μ_y — коэффициент упругой водоотдачи.
- $\mu_{\text{уп}}$ — коэффициент упруго-пластической водоотдачи.
- $\mu_э$ — коэффициент электроосмотической водоотдачи.
- ξ — автомобильная переменная.
- ξ — коэффициент бокового давления грунта.
- ξ — обобщенная координата.
- ξ — характерный размер области фильтрации.
- ξ_1, ξ_2, ξ_3 — фильтрационные сопротивления.
- ρ — зона стока верховодки с края круглой в плане линзы, м.
- ρ — плотность жидкости (воды), кг/м³.
- $\rho_{\text{сух.гр.}}$ — плотность сухого грунта, кг/м³.
- σ — параметр в формуле (191).
- σ_r — нормальное давление грунта, Па.
- τ — безразмерный параметр времени — критерий Фурье.
- φ — относительная влажность воздуха, %.
- φ — переменная интегрирования.
- φ_r — угол внутреннего трения грунта.
- ω — интенсивность дополнительной инфильтрации влаги, м/сут.
- МЭТ — моделирование в электронных таблицах.
- УГВ — уровень грунтовых вод.
- УПВ — уровень подземных вод.