

На правах рукописи

**Сологаев Валерий Иванович**

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

**05.23.16 – гидравлика и инженерная гидрология**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Москва 2003**

Работа выполнена в Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ).

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор А.Ж. Муфтахов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Алексеев Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор Дегтярев Борис Михайлович

доктор технических наук, профессор Дзекцер Ефим Семенович

Ведущая организация:

Инженерный научно-производственный Центр по водному хозяйству, мелиорации и экологии «Союзводпроект»  
(г. Москва)

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2003 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.045.02 при Московском государственном университете природообустройства (МГУП) по адресу:

127550, Москва, ул. Прянишникова, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУП.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Евдокимова И.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, изменения 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 результатов теоретических исследований автора подтверждена их многократными проверками с помощью численного эксперимента, натурными обследованиями объектов защиты от подтопления и обеспечена 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 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 [11], 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:

— 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 [24] «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 [6]. 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» [7], всероссийской международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири» [13], международной научно-технической конференции «Город и транспорт» [14], международной научной конференции «Роль России в развитии экологии на пороге XXI века» [15], II международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири» [16].

#### Личный вклад автора.

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

#### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 25 работ [1–25]. В их числе монография [25], содержащая основные результаты работы, справочное пособие к СНиП [11] с участием автора в разделах 2—5, учебное пособие [24], статьи в центральных журналах [9, 12], научных сборниках [2–5, 17–23], тезисы докладов на всесоюзных и международных научно-технических конференциях [6, 7, 13–16], депонированные работы [1, 8].

#### 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 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 Жалаяевичу Муфтахову, направлявшего автора по теории фильтрации, а также своим добрым родителям — Наталье Алексеевне и Ивану Ивановичу Сологаевым за постоянное внимание, помощь и поддержку в ходе кропотливой исследовательской работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены краткие сведения об актуальности, цели, задачах, объекте, предмете, методах исследований, достоверности, научной новизне и практической значимости представленной работы.

### **Глава 1. Проблема и защита от подтопления в городском строительстве**

Подтопление в городах — это повышение уровня подземных вод (УПВ), приводящее к аварийно-катастрофическому, антисанитарно-дискомфортному и экономически-убыточному состоянию зданий, сооружений, коммуникаций и других элементов городской территории [11, 24, 25].

Показателями подтопления и дренирования городских территорий является изменение УПВ относительно норм осушения для соответствующих функциональных зон города, регламентированных СНиП 2.06.15-85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления». 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.

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, Ф.М. Бочеввер, И.К. Гавич, Д.М. Кац, Н.Н. Лапшин, В.А. Мироненко, П.Я. Полубаринова-Кочина, Г.А. Разумов, В.К. Рудаков, В.Г. Румынин, В.С. Усенко, В.М. Шестаков, Ц.Н. Шкинчис, Д.Ф. Шульгин, Е.Н. Эмих и др.

2. Техногенно-гидрогеологический подход (С.К. Абрамов, В.С. Алексеев, В.Е. Анпилов, В.И. Аравин, В.А. Барон, Н.Н. Веригин, Н.П. Куранов, А.Ж. Муфтахов, В.П. Недрига, С.Н. Нумеров, Г.И. Покровский, А.В. Романов, В.С. Саркисян, Г.Б. Шабер, 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 в ГС дополняет перечисленные известные подходы.

Основной целью городского строительства (ГС) является комплексная застройка городов, возведение зданий и сооружений. 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 к защите от подтопления 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 автором в табличной форме (табл.).

Составлению данной классификации предшествовали многолетние исследования автора [1–25] 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).

Базовым объектом авторских исследований выбран один из крупнейших городов Сибири — г. Омск. В городе интенсивно ведется строительство в условиях подтопленных и потенциально подтопляемых территорий (последний термин принадлежит Е.С. Дзекцеру, 1982). В Омске представлены большинство факторов, усложняющих прогнозы и моделирование подтопления и дренирования: грунтовые воды малой мощности, близкие водоупоры, слабопроницаемые водоносные грунты и др. Город имеет большой опыт гидронамыва, устройства свайных фундаментов.

Термин «конструктивно-технологический метод» встречен у В.И. Воронцова и Г.Б. Шабера (1984), однако данные авторы придавали ему иной смысл, чем в нашем конструктивно-технологическом подходе, имея в виду соблюдение технологических режимов вскрытия и освоения водоносных горизонтов и правильный выбор параметров водоприемных частей дрен и скважин, а также другие мероприятия, направленные против осадкообразования и кольматажа дренажных устройств.

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

Разновидность городского строительства	Территория (степень подтопления)			
	Подтопленная		Потенциально подтопляемая	
	Подтопление	Дренирование	Подтопление	Дренирование
1	2	3	4	5
<b>I. Цикл инженерной подготовки территорий</b>				
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
<b>II. Нулевой (подземный) цикл строительства зданий и сооружений</b>				
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
<b>III. Надземный цикл строительства зданий и сооружений</b>				
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).

Обзор публикаций показал, что в существующей методологии прогнозов подтопления и дренирования у различных авторов фактически отсутствует учет влияния конструкций и технологий городского строительства. С большой степенью условности к данной тематике можно отнести отдельные работы А.Ж. Муфтахова, В.К. Рудакова, В.П. Пилатовского, В.С. Спорышева, G. Schneider, R.G. Pope и C.S. Ho — они посвящены изучению неоднородных в плане водоносных пластов. Существующие методики фильтрационных расчетов при малой мощности потоков грунтовых вод и в первоначально необводненных грунтах П.Я. Полубариновой-Кочиной, Г.И. Баренблатта, Н.Н. Веригина и др. охватывают не все важные случаи подтопления и дренирования. Например, неизвестно точное решение о радиальном растекании языка по водоупору в необводненных грунтах, а также другие случаи, которые рассмотрены в нашей работе. Новейшие публикации по верховодкам и потокам грунтовых вод малой мощности содержат решения в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации (Н.П. Куранов, А.В. Расторгуев, П.В. Кумов, 2002) либо носят частный характер с идеализированными постановками о бесконечно удаленной границе влияния (D.A. Lockington, J.Y. Parlange, M.V. Parlange, J. Selker, 2000), то есть с весьма приближенными решениями.

Разработанная автором классификация разновидностей городского строительства (ГС), влияющих на подтопление и дренирование территорий (см. табл.) 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.

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

Цель исследований определена выше в общей характеристике работы. Она неразрывно связана с главной практической целью защиты от подтопления, состоящей в обеспечении положения уровня подземных вод (УПВ) не менее норм осушения, регламентированных действующими СНиПами. Для подвалов строящихся зданий пониженный УПВ должен находиться ниже отметки пола подвала не менее 0,5 метра. 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. Главная практическая цель даёт чёткий ориентир для прогноза и моделирования УПВ при определении влияния городского строительства (ГС). Кроме того, находят притоки подземных вод в котлованы, траншеи, системы водоотлива, водопонижения и дренажа. Дополнительно оценивают негативные последствия (последствие) ГС при подтоплении и дренировании территории застройки, например, барражный эффект от влияния разных конструктивных решений. Перечисленные практические цели можно обосновать лишь с помощью законов движения жидкости и газа в пористых средах — теории фильтрации.

Далее в главе приведен краткий обзор закономерностей фильтрации воды, воздуха, фильтрационной консолидации грунтов, влаготеплопереноса, электроосмоса, записаны их дифференциальные уравнения движения. Они необходимы в качестве основы для аналитических прогнозов и моделирования подтопления и дренирования территорий под влиянием ГС (см. гл. 3–5).

Большинство фильтрационных потоков происходит в ламинарном режиме (В.И. Аравин, С.Н. Нумеров, 1953). Такие потоки достаточно точно описываются эмпирическим законом Дарси. Например, все расчётные формулы фильтрации в справочном пособии к СНиП [11] основаны на законе Дарси. Многолетние лабораторные опыты В.М. Павилонского (ВНИИ ВОДГЕО) с разнообразными глинистыми грунтами (1964–1987) показали, что закон Дарси соблюдается даже в глинах, а начальный градиент напора отсутствует. Известный австралийский геолог Р.Е. Чепмен (R.E. Chapman, 1983), ссылаясь на работы Х.В. Олсена (H.W. Olsen, 1965–1966), пришел к тем же выводам, что и В.М. Павилонский.

Упомянутые авторы сошлись на мнении, что закон Дарси не имеет нижнего предела, то есть он действителен для любых глинистых и песчаных грунтов. Верхний предел закона Дарси (турбулентность) имеет место

для крупнообломочных материалов и грунтов (В.И. Аравин и С.Н. Нумеров, 1953). В нашей работе рассмотрены фильтрационные процессы в пределах применимости закона Дарси в песчаных, глинистых грунтах и искусственных материалах.

Теории, применяемые для фильтрационных прогнозов и моделирования (Я. Бэр, С.П. Поздняков, П.Я. Полубаринова-Кочина, М.И. Швидлер и др.) при детерминированном или стохастическом подходах:

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

Детерминированный подход в описании проницаемости фильтрующих сред доминирует в производственной практике, поэтому он принят и у нас. 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 [25]. Поэтому для прогнозирования влияния ГС по теме исследований потребовалось критерияльно разграничить области применения линеаризованной и нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации (по Буссинеску).

Автор уточнил критерий С.Ф. Аверьянова (1956, 1982) по линеаризации уравнения Буссинеска для грунтовых вод [25]:

1) при обеспечении фильтрационного расчета с погрешностью не более 5 % линеаризованные гидравлические решения можно применять, если

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

2) при ошибке расчета не более 10 % критерий:

$$\Delta h/h_e \leq 0,25, \quad (2)$$

где  $\Delta h$  — возмущение уровня грунтовых вод (УГВ) при подтоплении или дренировании;  $h_e$  — естественная мощность грунтовых вод.

Дополнительные исследования автора с помощью численного моделирования (по его методу МЭТ) фильтрации грунтовых вод со свободной поверхностью позволили найти новый критерий линеаризации:

$$h_e / \xi \leq 0,01, \quad (3)$$

согласно которому уравнение Буссинеска можно линеаризовать при любых соотношениях  $\Delta h/h_e$ . Здесь  $\xi$  — характерный размер области фильтрации в плане.

Автором разработан новый метод автомодельных движений в сочетании с численным моделированием — метод АДЧМ [25]. Метод позволяет получать точные гидравлические решения нелинейного уравнения фильт-

рации грунтовых вод. Достоверность метода проверена на решении одномерной задачи П.Я. Полубариновой-Кочиной о длине языка подтопления в первоначально необводненном грунте при плоскопараллельной фильтрации по горизонтальному водоупору (1952). Формула, полученная нашим методом АДЧМ, полностью совпала с формулой П.Я. Полубариновой-Кочиной

$$L_{\text{яз}} = 1,616 (kH_0t/\mu)^{1/2}, \quad (4)$$

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

Обоснование нашего метода АДЧМ показано на упомянутой классической задаче П.Я. Полубариновой-Кочиной.

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

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (5)$$

где  $H$  — напор и мощность грунтовых вод; остальное оговорено выше.

Граничное условие слева при  $x = 0$  выражает постоянство напора в вытянутом источнике подтопления:

$$H(0, t) = H_0. \quad (6)$$

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

$$H(L_{\text{яз}}, t) = 0. \quad (7)$$

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

$$H(x, 0) = 0. \quad (8)$$

Введем две подстановки (безразмерные переменные):

$$U = H/H_0; \quad (9)$$

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{2kH_0t/\mu}}. \quad (10)$$

Величину  $\xi$  можно назвать автомодельной переменной.

Тогда уравнение (5) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 U^2}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dU}{d\xi} = 0, \quad (11)$$

которое можно переписать в развернутом виде так:

$$UU'' + (U')^2 + \xi U' = 0, \quad (12)$$

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

Если в (12) положить  $U = 0$ , то считая  $U'' \neq \infty$ , имеем

$$U'(U' + \xi) = 0,$$

откуда, если  $U' \neq 0$ , получается

$$U' + \xi = 0.$$

В точке  $\xi = C$  имеется пересечение интегральной кривой с абсциссой, то есть  $U = 0$ ,  $U' = -C$ .

Далее П.Я. Полубаринова-Кочина нашла решение уравнения (12) в виде ряда, разложив  $U$  по степеням разности  $\xi - C$ , откуда определила коэффициент  $C = 1,143$ .

Из (10) при  $x = L_{яз}$  и  $\xi = C$  П.Я. Полубаринова-Кочина вывела длину языка подтопления в виде (4), ставшем классической формулой теории фильтрации и неоднократно цитированной различными отечественными и зарубежными авторами.

Мы находим  $C$  по-своему, объединив численное моделирование языка грунтовых вод и аналитику, для чего переписываем (11) в конечных разностях в виде

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

Из этого уравнения получаем формулу автомодельного безразмерного моделирования

$$U_i = \left[ (U_{i+1}^2 + U_{i-1}^2) / 2 + \xi_i \Delta\xi (U_{i+1} - U_{i-1}) / 2 \right]^{1/2}. \quad (13)$$

Эту формулу применим на динамической модели по нашему методу МЭТ. 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, с помощью нашей информационной технологии МЭТ [25], применяя формулу (13), производим итерационный расчет модели для первого приближения  $C = \xi = 1$ . Затем сдвигаем вправо правую границу модели на несколько шагов и находим следующее приближение коэффициента  $C$ . При каком-то значении  $C$  расчет на модели становится неустойчивым. Значит предыдущее значение  $C$  есть искомое значение.

Таким путем на модели было найдено точное значение коэффициента

$$C = 1,143,$$

что полностью совпало с результатом аналитического способа нахождения  $C$  по П.Я. Полубариновой-Кочиной. Далее коэффициент  $C$  подставляется в формулу (10), откуда вытекает формула точно такая же как и (4). 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 при решении прикладных задач.

Выводы по 2-й главе:

- 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, 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 автомодельных 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.

### Глава 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. Это достигается применением активных технологий защиты от подтопления (строительного водоотлива, водопонижения и дренажа), но может быть достигнуто и с помощью других технологий и конструктивных решений (см. табл.). Прогнозирование их эффективности с точки зрения защиты от подтопления наиболее достоверно реализуется с помощью компьютерного моделирования. Однако предварительные прогнозы лучше производить аналитическим методом расчета процессов фильтрации по формулам (см. рис. 1).

Прогноз подтопления нужно начинать 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. Разновидности прогнозов подтопления следующие [11, 25]:

- прогноз равномерного подъёма УПВ (метод аналогий);
- прогноз верховодки и куполов УПВ;
- прогноз подпора УПВ из котлованов, траншей и выработок;
- прогноз подпора УПВ зданиями и сооружениями.

Мы считаем целесообразным в условиях городского строительства перед вышеперечисленными прогнозами проводить дополнительный прогноз изменения проницаемости грунтов оснований по нашей методике, изложенной в работе [25]. К традиционному понятию прогноз подтопления надо добавить наш конструктивно-технологический подход (см. рис. 1 и табл.) и стремиться к тому, чтобы выбором соответствующих конструктивных решений и технологий строительства уменьшить подтопление или минимизировать воздействие на уровень грунтовых вод (УГВ).

Применяемые в настоящее время критерии схематизации области фильтрации для грунтовых вод со свободной поверхностью (УГВ) базируются на линеаризованной гидравлической теории фильтрации. Однако область применения нелинеаризованной гидравлической теории фильтрации (по Буссинеску) на самом деле достаточно широка. Например, в гидрогеологических условиях г. Омска в связи с малой мощностью потоков грунтовых вод прогнозы подтопления и дренирования должны использовать нелинеаризованную гидравлическую теорию фильтрации.

Для грунтовых вод и верховодок с малой и нулевой начальной мощностью потоков (например, при образовании нового техногенного горизонта на территории застройки) формулы линеаризованной гидравлической теории по нашим расчетам [25] неоправданно завышают величину зоны влияния (на 100–200 %). В этом случае следует применять наши формулы для зон влияния, полученные в виде решений нелинейного уравнения Буссинеска методом АДЧМ (приводятся ниже). По терминологии П.Я. Полубариновой-Кочиной, такие решения называют точными гидравлическими решениями.

Далее в главе рассмотрены прогнозы изменения проницаемости грунтов оснований вследствие применения различных конструктивных решений и технологий строительства.

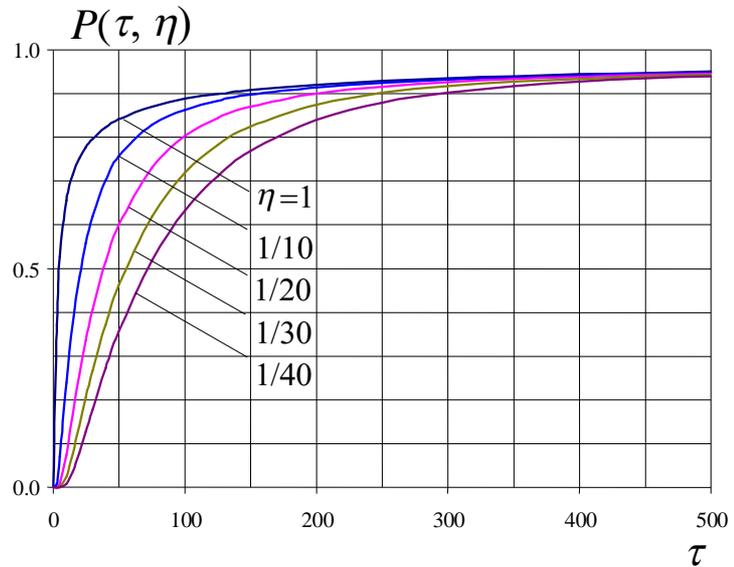
Проницаемость грунтов естественного и искусственного происхождения, получивших дополнительную нагрузку при строительстве, более склонна к уменьшению, чем к увеличению, так как деформации грунтов, уменьшение их пористости и коэффициента фильтрации обычно не обратимы (Н.М. Герсеванов, 1937; Б.В. Бахолдин, 1975; В.Н. Жиленков, 1983; Ю.К. Зарецкий, 1988; П.Л. Иванов, 1985; П.В. Коновалов, 1990; Е.М. Куприянов, 1954; В.Д. Ломтадзе, 1984; Н.Н. Маслов, 1982; С.Р. Месчан, 1985; К. Терцаги, 1960; В.А. Флорин, 1961; Г.И. Черный, 1979 и др.).

В нашей работе рассмотрено уменьшение проницаемости грунтов оснований в зависимости от нагрузки, степени сжимаемости и водонасыщения грунта, то есть вследствие физических причин.

Уменьшение проницаемости массивов грунтов оснований застраиваемых территорий может произойти по причинам внедрения слабопроницаемых и непроницаемых строительных конструкций в грунт (сваи, шпунт, подпорные стенки, тоннели, метрополитены, коллекторы и т.д.), динамического уплотнения грунта в процессе забивки свай, консолидационного уплотнения грунта после забивки свай, уплотнения грунта под фундаментами сплошного и ленточного типа, уплотнения грунта оснований дорог в процессе строительства и эксплуатации, уплотнения грунта при строительном водоотливе, водопонижении и дренаже, при замачивании грунта и др.

Наши расчёты показали [25], что в зоне уплотнения под ленточными фундаментами проницаемость глинистых грунтов уменьшается в среднем в 7-8 раз, а максимально — в супесях — в 10-20 раз. Проницаемость песков вследствие уплотнения под ленточными фундаментами уменьшается максимум в 1,5-2 раза. Эти изменения коэффициента фильтрации под фундаментами нужно учитывать при проектировании защиты от подтопления и прогнозах подтопления и дренирования в ГС.

Рис. 2. К прогнозу изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства по результатам динамических испытаний свай на несущую способность [9]. Обозначения см. по примечаниям к формулам (16) и (17).  $P(\tau, \eta)$  — относительное увеличение несущей способности свай в водонасыщенном грунте



Автором разработана методика прогноза изменения проницаемости грунта при строительстве на сплошных фундаментах с учетом положений теории фильтрационной консолидации (К. Терцаги, 1925), так как при подтоплении грунты оснований водонасыщенные.

Далее автор разработал прогноз изменения проницаемости грунта около забивных свай в процессе строительства (рис. 2). Наш анализ присвайного грунта в рамках теорий упругости и пластичности [12] показал, что его проницаемость в пределах радиуса уплотнения уменьшается более чем в 40 раз.

Автором разработана методика прогноза изменения проницаемости грунта под свайными, ленточными, отдельными и сплошными фундаментами при эксплуатации зданий как последствие соответствующей разновидности строительства. Например, к уплотнению присвайного грунта при строительстве (по причине забивки свай) добавляется влияние веса строящегося здания, так как фундамент передает нагрузку от здания на основание. Поэтому грунт еще более уплотняется и проницаемость его дополнительно уменьшается при эксплуатации здания. Уплотнение грунта рассмотрено с учетом теории фильтрационной консолидации. Уменьшение коэффициента фильтрации предложено рассчитывать по одномерной зависимости для широких фундаментов при близком плотном слое. Для ленточных, прямоугольных и круглых в плане фундаментов — по двух- и трехмерным формулам (при глубоком слое сжимаемого грунта).

Автором уточнены решения А.Ж. Муфтахова (1984) и Н.П. Куранова (1986) по прогнозированию стационарного уровня верховодок на слабопроницаемых техногенных и естественных геологических линзах. Данные прогнозы применимы для оценок последствий применения технологии гидронамыва на бывших в употреблении территориях (рыбацкие поселки, старые дороги и т.д.). Замечено, что гидравлическая предпосылка Дюпюи

о горизонтальных скоростях на слабопроницаемых линзах не соблюдается в их центральных частях (рис. 3). Поэтому гидравлические решения для неустановившейся фильтрации воды на слабопроницаемых линзах получаются грубыми. Вследствие этого прогнозирование неустановившейся фильтрации верховодки (например, от технологии гидронамыва) на слабопроницаемых линзах, а также образование новых техногенных горизонтов на строительных площадках целесообразно моделировать по технологии автора МЭТ (см. гл. 4–5).

В качестве примера прогноза верховодки приводим одно из аналитических выражений, полученных автором [25] в рамках линеаризованной гидравлической теории фильтрации, для определения влияния последствий технологии гидронамыва на вытянутой в плане техногенной линзе (например, старой дороги) (см. рис. 3):

$$H(x) = \left\{ \frac{\omega m_0 h_c}{k_0} \left[ 1 - \frac{\text{ch}(\lambda x)}{\text{ch}[\lambda(L+l)]} \right] \right\}^{1/2}; \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0 h_c}}. \quad (14)$$

где  $H(x)$  — напор верховодки;  $x$  — горизонтальная координата;  $\omega$  — интенсивность инфильтрации влаги;  $m_0$  — толщина линзы;  $h_c$  — средняя мощность верховодки;  $L$  — полуширина линзы;  $l$  — ширина зоны стока;  $k$  — коэффициент фильтрации грунта намыва;  $k_0$  — коэффициент фильтрации линзы. Занижение напора по формуле менее 5 %.

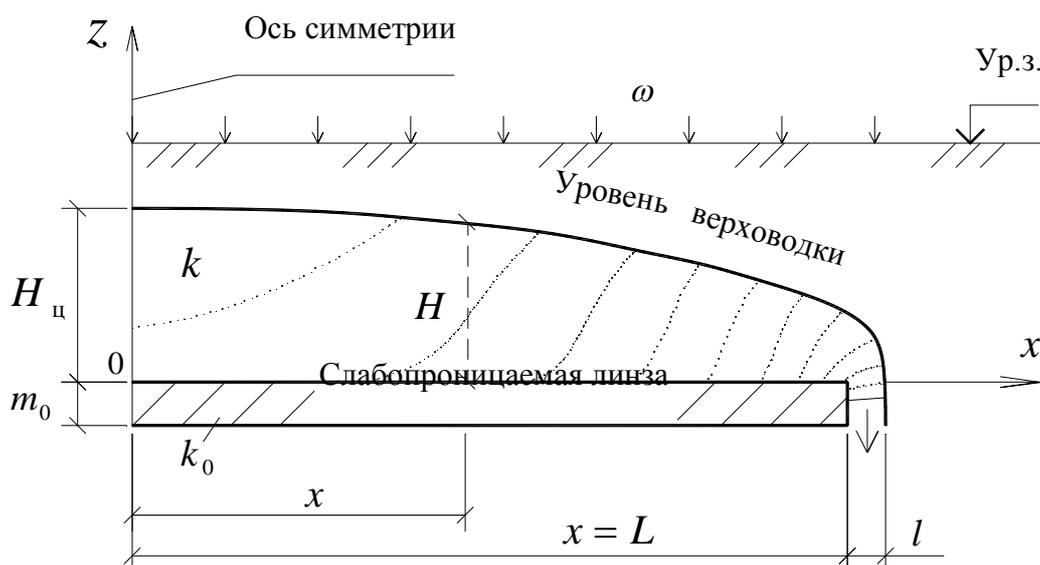


Рис. 3. К прогнозу техногенной верховодки под влиянием технологии гидронамыва (пунктиром показаны линии равных напоров, полученные на двумерной гидромеханической модели верховодки со свободной поверхностью по методу автора МЭТ)

Авторским методом АДЧМ найдено точное гидравлическое решение для радиуса языка грунтовых вод от очага подтопления с постоянным уровнем воды (строительного котлована или подвала здания при аварийном затоплении), распространяющегося по водоупору в первоначально необводненном грунте [25]:

$$R_{\text{яз}} = r_0 \left[ 1 + (1,5114 - 0,0461 \ln \tau) \sqrt{\tau} \right]; \quad \tau = kH_0 t / (\mu r_0^2), \quad (15)$$

где  $r_0$  — радиус в плане очага подтопления;  $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  $H_0$  — постоянный напор в очаге подтопления, отсчитываемый от поверхности горизонтального водоупора;  $t$  — время;  $\mu$  — недостаток (дефицит) насыщения грунта. Достоверность (15) подтверждена моделированием и натурными обследованиями подтопляемого объекта [25, с. 331].

При малой мощности грунтовых вод  $h_e$  условие Н.Н. Веригина (1951) на фронте языка подтопления при подпертой фильтрации не соблюдается, и градиент напора по горизонтали стремится к нулю. Расчет подпертой фильтрации при малой мощности потоков грунтовых вод актуален, например, при прогнозах подтопления в ходе строительства метантенков, септиков и других объектов водного хозяйства городов. Гидравлически точным методом интегрального баланса получено несколько решений нелинейной одномерной фильтрации грунтовых вод малой мощности для случая постоянного напора  $H_0$  в источнике подтопления.

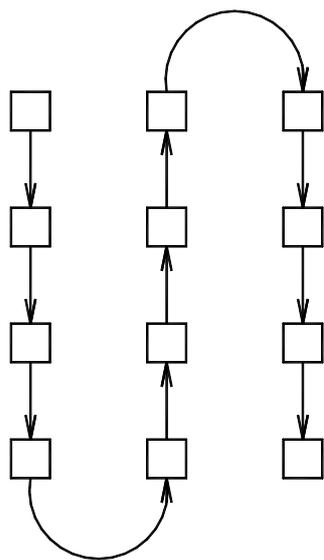


Рис. 4. Схема забивки свай (вид в плане)

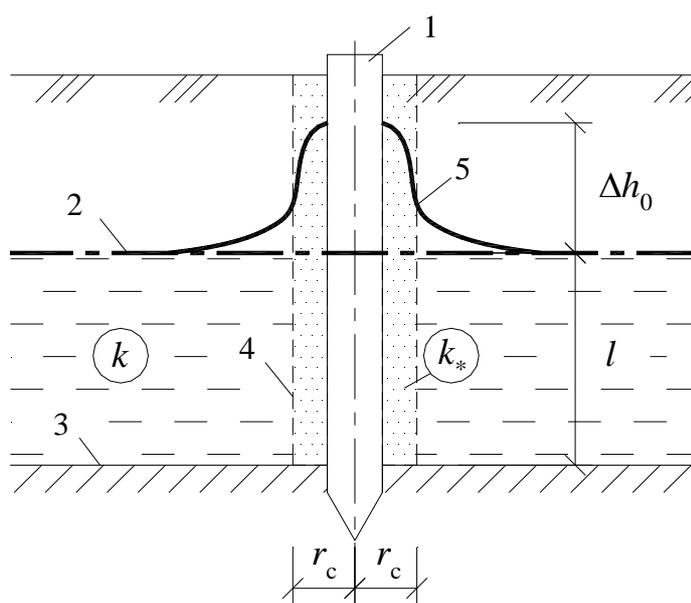


Рис. 5. Повышение уровня грунтовых вод (УГВ) при забивке свайного ряда: 1 — свая; 2 — естественный УГВ; 3 — водоупор; 4 — зона максимально уплотненного грунта; 5 — нарушенный УГВ

Прогнозы куполов грунтовых вод рассмотрены при наличии плановых неоднородностей: свайных фундаментов, зон уплотненного грунта и т.д. [25] Необходимой отправной базой служили исследования куполов, выполненные в нашей кандидатской диссертации при решении задач в линейризованных постановках. В настоящей работе эти задачи расширены: были заново пересчитаны точные решения в виде несобственных интегралов; уточнены области применения полученных зависимостей. Пользуясь формулами для куполов, приведенными в монографии [25], можно произвести приближенные расчеты подтопления с учетом конструктивных решений и технологий строительства. Например, при забивке свай в виде последовательных рядов (рис. 4) промежуточное повышение уровня грунтовых вод (УГВ) для каждого свайного ряда можно найти так (рис. 5):

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

$$\tau = 4a_y t / r_c^2; \quad \eta = k_* / k; \quad \alpha = (\sqrt{\eta} - 1) / (\sqrt{\eta} + 1), \quad (16)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  $k_*$  — коэффициент фильтрации грунта в уплотненной зоне радиусом  $r_c$  [9, 12], который можно определить по результатам динамических испытаний свай на несущую способность [9];  $t$  — время после забивки свай;  $a_y$  — уровнепроводность.

Величину начальной высоты купола грунтовых вод вдоль забиваемого свайного ряда (см. рис. 5) можно найти по следующей формуле

$$\Delta h_0 = \Delta P_k / (ul\rho g \operatorname{tg} \varphi_r), \quad (17)$$

где  $\Delta P_k$  — конечное приращение несущей способности сваи после ее «отдыха» в водонасыщенном грунте;  $u$  — периметр сваи;  $l$  — мощность водонасыщенного слоя грунта, примыкающего к боковой поверхности сваи;  $\rho$  — плотность грунтовой воды;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\varphi_r$  — угол внутреннего трения грунта. При превышении величиной  $\Delta h_0$  поверхности земли ее следует ограничить глубиной залегания естественного УГВ.

Строящиеся здания и сооружения могут перекрыть фильтрационные потоки подземных вод своими непроницаемыми или слабопроницаемыми подземными частями и фундаментами. Такое явление называют барражным эффектом, что аналогично действию плотин, подпирающих потоки воды. В результате барражного эффекта с верхней стороны потока уровень подземных вод (УПВ) повышается, а ниже по течению — понижается. Наиболее сильно подпор наблюдается вблизи подземной преграды

(здания, сооружения), перекрывающей фильтрационный поток. С удалением от возмущающей преграды УПВ выходит на естественный уровень.

В кандидатской диссертации автором 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 [25]. Аналитический метод подкреплён моделированием по методу автора без линеаризации исходных уравнений фильтрации грунтовых вод.

Наши исследования показали [25], что при строительном освоении городских территорий возникает барражный эффект потоков подземных вод (эффект подземных плотин) примерно в два раза больший, чем считалось ранее.

Методом автора АДЧМ получены точные гидравлические формулы для определения размеров кривых (воронок) депрессий и областей (радиусов) питания при применении строительного водоотлива, водопонижения и дренажа, в частности [25]:

а) длина кривой депрессии при водоотливе из траншеи или работе одноленточного пластового дренажа

$$L_{\text{вл}} = (4,5 - 0,625 h_{\text{т}}/h_{\text{е}}) \sqrt{at}; \quad a = kh_{\text{е}}/\mu, \quad (18)$$

где  $h_{\text{т}}$  — напор в траншее или дренаже, другие обозначения оговорены выше;

б) радиус воронки депрессии при водоотливе из котлована или работе круглого в плане пластового дренажа

$$R_{\text{вл}} = r_0 + (1 - 0,157 h_{\text{к}}/h_{\text{е}})(4,12 - 0,1 \ln \tau) \sqrt{at}; \\ a = kh_{\text{е}}/\mu; \quad \tau = at/r_0^2, \quad (19)$$

где  $h_{\text{к}}$  и  $r_0$  — напор и радиус котлована или дренажа;

в) расчетная длина области питания (по расходу) при водоотливе из траншеи или работе одноленточного пластового дренажа

$$L_{\text{т}} = (1,5 + 0,25 h_{\text{т}}/h_{\text{е}}) \sqrt{at}; \quad a = kh_{\text{е}}/\mu; \quad (20)$$

г) расчетный радиус питания (по расходу) при водоотливе из котлована или работе круглого в плане пластового дренажа

$$R_{\text{т}} = r_0 + (0,94 + 0,077 h_{\text{к}}/h_{\text{е}})(1,72 - 0,016 \ln \tau) \sqrt{at}; \\ a = kh_{\text{е}}/\mu; \quad \tau = at/r_0^2. \quad (21)$$

Автором уточнено дополнительное фильтрационное сопротивление по А.Ж. Муфтахову для гидродинамически несовершенных круглых в плане строительных котлованов и пластовых дренажей, которое выражено в табличной, графической форме и в виде аналитической зависимости [25]

$$\zeta_{\text{пл}} = \exp[-1,265 \ln(r_0/m) - 0,661], \quad (22)$$

где  $m$  — расстояние от водоупора до дна котлована или низа фильтрующей постели пластового дренажа.

Классическими методами фильтрационных сопротивлений, фрагментов, конформных отображений и последовательной смены стационарных состояний решены характерные задачи по движению подземных вод при применении водоотлива из траншей и котлованов с креплением «стена в грунте», траншей и котлованов со свайным креплением, подтоплении пазух строительных выемок.

Например, подтопление пазух траншей и длинных котлованов грунтовыми водами как последствие строительства можно рассчитать по формуле, полученной в ходе исследований автора при защите от подтопления Омского метрополитена в 1992 г. Повышение воды в пазухе шириной  $B_{\text{п}}$ :

$$z_{\text{п}} = h_{\text{е}} - (h_{\text{е}} - h_{\text{п}}) \exp\left[-\frac{2\tau}{2(\mu_{\text{п}}/\mu)(L_t/B_{\text{п}}) + (L_t/B_{\text{п}})^2}\right];$$

$$\tau = at_{\text{п}}/B_{\text{п}}^2; a = kh_{\text{е}}/\mu, \quad (23)$$

где  $L_t$  определяется в зависимости от продолжительности водоотливных работ по формуле (20); индекс «п» относится к пазухе. Погрешность формулы менее 5 % при  $\tau \leq 250$ , что проверено нелинейным моделированием по методу автора МЭТ. При  $\tau > 250$  формула начинает немного завышать подъем уровня воды в пазухе  $z_{\text{п}}$ , что однако идет в запас надежности прогноза подтопления пазухи.

Конструкции и технологии надземного цикла строительных работ слабо влияют на подтопление территорий (см. табл.). Влияние этих разновидностей строительства изучено прогнозом изменения водного баланса систем «грунтовые воды — зона аэрации — атмосфера» (инфильтрация и испарение) при возведении зданий и сооружений.

Климат и городское строительство совместно влияют на процессы подтопления и дренирования. Влияющими факторами являются солнечная радиация, альbedo поверхностей, затенение участков застройки зданиями и деревьями, температура воздуха, почвогрунтов и искусственных покрытий, их влажность, аэрация застройки, скорость ветра, инфильтрация атмо-

сферных осадков в грунты и дополнительная техногенная инфильтрация влаги, испарение воды с поверхности почвогрунтов, искусственных покрытий и уровня подземных вод и др.

Среднесуточную испаряемость при прогнозах и моделировании влияния ГС на подтопление и дренирование территорий предложено определять по нашим эмпирическим формулам [25], построенными обработкой данных В.С. Мезенцева и И.В. Карнацевича (1969-1993) для двадцати городов Сибири, Алтая, Урала и Казахстана (прил. 1).

Величины среднесуточной испаряемости для конкретного участка строительства автор предлагает уточнять [25], учитывая климатическо-техногенные факторы городской застройки (альбедо, затенение, продуваемость и др.). Испаряемость в городе на разных его участках  $\varepsilon_0$  может уменьшаться или увеличиваться относительно величины испаряемости  $\varepsilon_{\text{мст}}$ , измеренной на городской метеостанции.

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.

Выводы по 3-й главе:

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» (испарение и инфильтрация).
2. Данные авторские методики позволяют в первом приближении прогнозировать влияние разновидностей городского строительства (см. табл.) на подтопление и дренирование территорий отдельно по усложняющим факторам (см. рис. 1).
3. После аналитического прогноза подтопления и дренирования территорий под влиянием ГС автор рекомендует проводить моделирование по его методу МЭТ (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.

#### Глава 4. Авторский метод моделирования в электронных таблицах

Даны основы новой информационной технологии автора для компьютерного моделирования фильтрационных процессов подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства [15, 17–20, 22–25]. Технология наиболее подробно изложена в монографии [25] — моделирование в электронных таблицах (МЭТ).

Моделирование защиты от подтопления в России и СССР началось с работы Н.Н. Павловского 1922 г., предложившего метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Численный метод конечных разностей (МКР) в гидрогеологии начал применять Г.Н. Каменский с 1943 г. Значительный вклад в развитие моделирования фильтрации 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, И.С. Пашковский, А.В. Расторгуев, П.Ф. Фильчаков, В.М. Шестаков и другие.

За рубежом наиболее крупные 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. Конигов (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.

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 и др. 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.

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 и аспирантами легко и с большим интересом. Эти таблицы применяются во многих учебных курсах, что также повышает интерес к их использованию.

МЭТ 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.

Сборка модели в электронной таблице производится примерно так же, как если бы собиралась дискретная электрическая модель. Это обеспечивает преимущество развития фильтрационного моделирования, так как можно использовать:

- литературу прошлых лет по дискретному моделированию на электрических и гидравлических моделях (В.М. Шестаков и др.);

- старые, проверенные практикой руководства по численному моделированию, ориентированные на ручной счет (Д.Ю. Панов и др.).

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.

Отсутствие публикаций по использованию электронных таблиц для моделирования фильтрации позволяет автору заявить свой приоритет по разработанному методу, опубликованному в 1998 г. в [17–19]. В более поздней публикации В.Д. Орвиса (США) 1999 г. 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 [25], основанной на независимых исследованиях автора, проведенных с конца 1980-х годов, представлен метод моделирования в электронных таблицах целых классов задач фильтрации и аналогичных процессов применительно к защите от подтопления в городском строительстве.

Автор исследовал моделирование в большинстве распространенных электронных таблиц. Для таблиц разных производителей выявлены недо-

кументированные особенности, полезные для моделирования. Эффективность таблиц для моделирования может меняться с каждой новой версией таблицы. Поэтому автор разработал вспомогательные алгоритмы [25] на встроенных языках программирования наиболее распространенных таблиц (MS Excel, Lotus 1-2-3, SuperCalc) для автоматизации моделирования.

Моделирование в электронных таблицах (МЭТ) осуществляется в три этапа [17]:

- 1) визуальный монтаж модели в среде таблицы с использованием сборочных формул (формул моделирования);
- 2) итерационный расчётный процесс;
- 3) подключение дополнительных программных средств по технологии OLE Automation (ActiveX) и построение карт потенциальных полей уровней, напоров подземных вод, влажности и т.д.

Предлагаемая технология моделирования рассмотрена подробно, с многочисленными примерами [25]. Процесс картирования полей напоров, УПВ и т.д. реализован в известном пакете Surfer фирмы Golden Software. Исходными данными для карт служат численные результаты моделирования (матрицы). Передача данных производится автоматически по технологии OLE Automation (ActiveX) с помощью макропрограммы ForSurfer. Эта программа автора позволяет самогенерировать карты изолиний, используя численные модели. Она многократно проверена на многочисленных примерах производственного моделирования, реализованных автором. Программа ForSurfer рекомендуется к широкому использованию для автоматизации картирования результатов двух- и трехмерных моделей. Листинг ForSurfer приведен в прил. 2 диссертации и в монографии [25].

Далее в главе изложены недокументированные возможности электронных таблиц, позволяющие существенно ускорить процесс моделирования по методу автора. Это делает модели весьма эффективными, не уступающими по технологии сборки, скорости расчета и визуальным возможностям специализированным коммерческим пакетам.

С помощью метрик, применяемых в психологии программирования (Б. Шнейдерман, 1984), проанализировано качество нашей информационной технологии моделирования МЭТ. Сравнение показало высокие оценки МЭТ, поэтому автор рекомендует к широкому использованию свой метод моделирования.

Вслед за А.А. Самарским, интегро-балансовым методом конечных разностей (положен в основу МЭТ) получены обобщенные одно-, двух- и трехмерные формулы моделирования процессов по исследуемой теме. В качестве примера приводим одну из формул моделирования двухмерной плановой фильтрации грунтовых вод малой мощности

$$\begin{aligned}
H_0^{S+1} = H_0^S + \frac{Dt}{\mu_0} & \left[ \frac{k_{0-1}(h_1^S + h_0^S)(H_1^S - H_0^S)}{(x_0 - x_1)(x_3 - x_1)} + \right. \\
& + \frac{k_{0-2}(h_2^S + h_0^S)(H_2^S - H_0^S)}{(y_2 - y_0)(y_2 - y_4)} - \frac{k_{0-3}(h_0^S + h_3^S)(H_0^S - H_3^S)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)} - \\
& \left. - \frac{k_{0-4}(h_0^S + h_4^S)(H_0^S - H_4^S)}{(y_0 - y_4)(y_2 - y_4)} \right] + \frac{\omega_0 Dt}{\mu_0} - \frac{k_0^* Dt (H_0^S - H_0^H)}{\mu_0 m_0^*}, \quad (24)
\end{aligned}$$

где  $x, y$  — горизонтальные декартовы координаты;  $H$  — напоры;  $h$  — мощности грунтовых вод;  $k$  — коэффициенты фильтрации;  $\omega$  — инфильтрация;  $Dt$  — шаг времени;  $\mu$  — водоотдача;  $m^*$  — мощность слабопроницаемого прослоя. Индексы означают принадлежность к блокам конечно-разностной сетки, неравномерной по пространственным координатам.

Отметим, что в рекомендациях ПНИИИСа (В.С. Зильберг и др., 1983) записана близкая по виду формула, однако в ней, в отличие от формулы (24), использованы не коэффициенты фильтрации и мощности водоносного пласта, а комплексы в виде их произведения — водопроводимости пласта. Это придает получаемым результатам меньшую точность.

Далее в главе рассмотрены полезные технологические приемы моделирования процессов по теме исследования с помощью электронных таблиц, позволяющие существенно уточнить решение задач и увеличить производительность моделирования фильтрации при проектировании защиты от подтопления в городском строительстве. Приемы были получены в ходе исследований автора, часть их проиллюстрирована на примерах в данной работе, подробно они изложены в монографии [25].

Выводы по 4-й главе:

- 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 преемственность развития фильтрационного моделирования;
- новая информационная технология моделирования процессов фильтрации подземных вод многократно снижает трудоемкость моделирования в сравнении с традиционными принципами программирования компьютерных моделей.

## Глава 5. Практика моделирования подтопления и дренирования в городском строительстве

Представлены примеры расширенного применения метода моделирования в электронных таблицах (МЭТ) фильтрационных процессов подтопления и дренирования под влиянием городского строительства.

Рассмотрено моделирование схематизационное и моделирование обратных фильтрационных задач. Показана взаимосвязь точных гидравлических решений типа (19) со схематизационным моделированием при использовании критериев линеаризации (1) и (2).

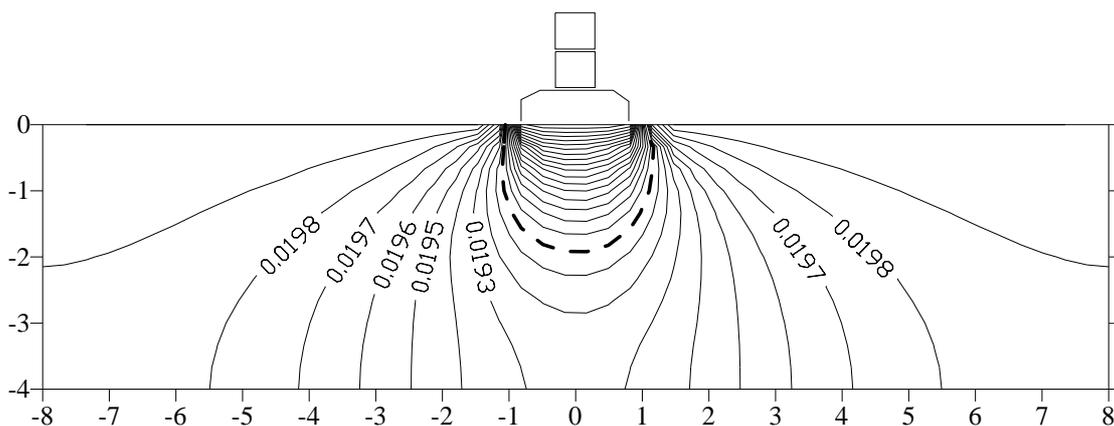


Рис. 6. Поле коэффициентов фильтрации грунта (м/сут), уплотненного фундаментом — результат моделирования методом автора (здесь и далее размеры в метрах)

Моделирование изменения проницаемости грунтов в сложных случаях неоднородных оснований и разнообразных конфигураций фундаментов рекомендуется выполнять по новой технологии автора. Обычно определяли начальное распределение поровых давлений  $p_0$  в водонасыщенном грунте основания с помощью метода ЭГДА. Теперь начальное распределение  $p_0$  в грунтовой воде под фундаментами проще и точнее находить с помощью метода автора, затем определяют изменение проницаемости грунта основания (рис. 6). Также несложно и надежно можно определить моделированием изменение коэффициентов фильтрации во времени, используя динамическое моделирование и теорию фильтрационной консолидации грунта. Изменение коэффициентов фильтрации легко моделируется и для слоистых грунтов.

При моделировании стационарных задач плановой фильтрации грунтовых вод малой мощности в нелинейной постановке в рамках гидравлической теории фильтрации 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 (Н.С. Бахвалов, 1987; Н.Н. Калиткин, 1978; А.А. Самарский, Е.С. Николаев, 1978). Эволюционный метод продемонстрирован на примере прогнозного моделирования влияния строительства на гидрогеологическую среду города (последствие строительства). С помощью метода автора промоделирована задача о барражном эффекте комплекса зданий как зон неоднородности с пониженной проницаемостью в потоке грунтовых вод малой мощности (рис. 7), результаты подтверждены натурными обследованиями.

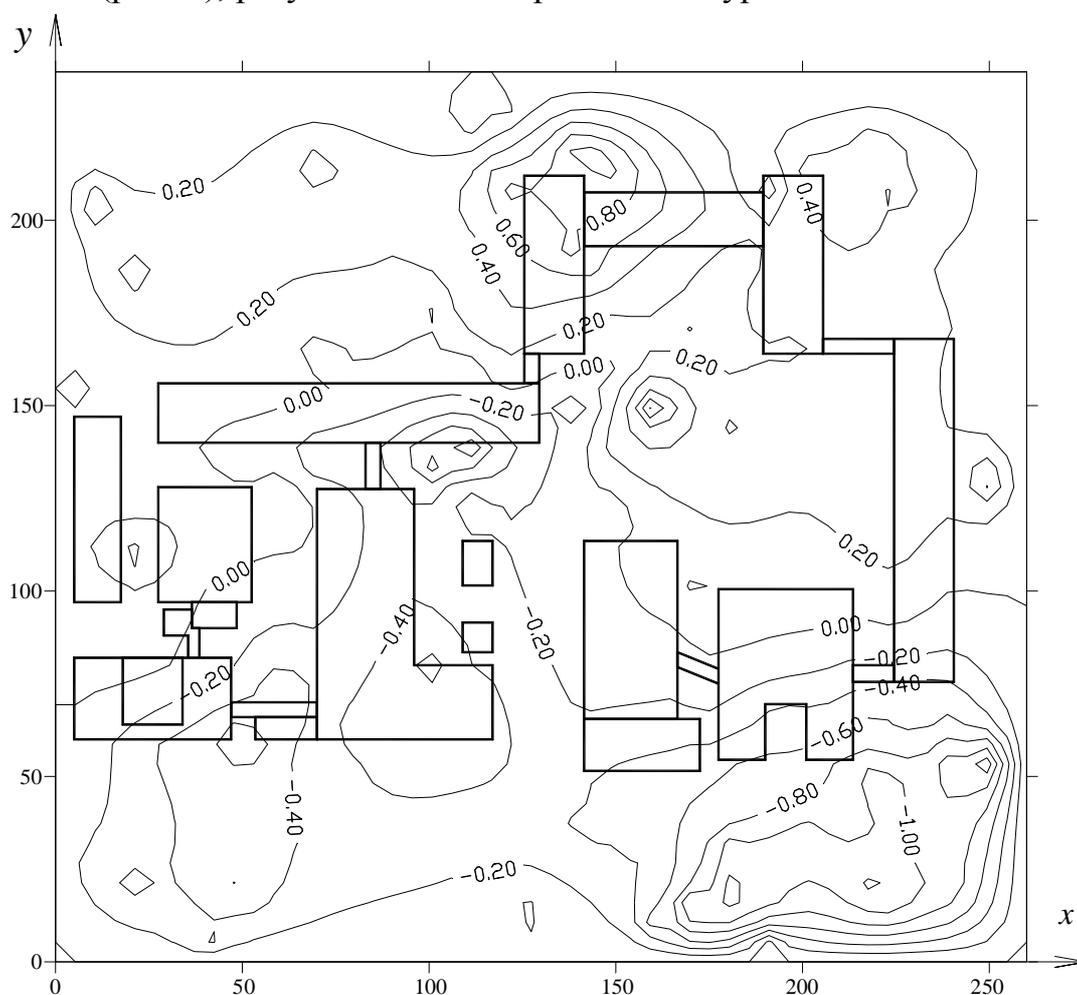


Рис. 7. Прогнозное повышение УГВ на территории застройки как последствие строительства (моделирование по автору)

Реализовано производственное моделирование установки вакуумного эжекторного водопонижения для Омского метрополитена, усиленной электроосмосом. Так как коэффициент фильтрации суглинка имел предельное значение для применения вакуумного водопонижения  $k = 0,01$  м/сут (В. Кнаупе, 1988), то решено усилить осушительные работы по вакуумированию в зоне щитовой проходки с помощью электроосмотического водопонижения, которое дополнительно закрепляет грунт (Г.Н. Жинкин, 1966).

При глубоком водопонижении в соответствии с критериями (1)–(2) и нестационарном фильтрационном процессе осушения грунта была применена нелинеаризованная гидравлическая постановка движения грунтовых вод. Влагоперенос в капиллярной зоне, следуя В.М. Григорьеву (1973), учтен 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. 8 (пусковая камера щита заштрихована).

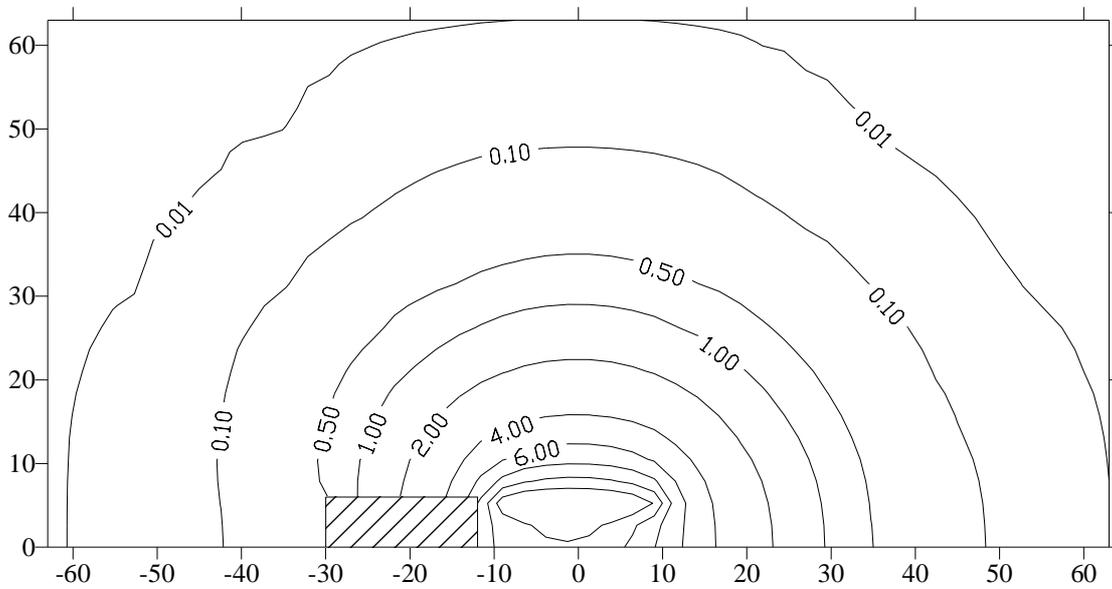


Рис. 8. Карта понижений УГВ через 12 суток работы совмещенной установки водопонижения (моделирование по автору)

Шаг на модели принят неравномерный по обеим горизонтальным координатам. Для удобства разбиения пространственного шага использована и переосмыслена применительно к методу автора МЭТ логарифмическая формула В.С. Усенко (1968), которая записана в экспоненциально-логарифмическом виде.

В процессе моделирования создано три файла: электрического поля; поля напоров (с вакуумом); случая аварийного отключения системы водопонижения. Результаты моделирования в виде табличных матриц обработаны макропрограммой автора ForSurfer и картированы (см. рис. 8).

Нестационарный фильтрационный процесс может быть реализован в электронной таблице тремя способами: 1) статическим (построчно вниз); 2) динамическим (в оперативной памяти с использованием логической функции ЕСЛИ); 3) с помощью автоматического добавления табличных листов. Последний способ автоматизирован специальной макропрограммой, опубликованной в [19]. В рассматриваемом примере строительного водопонижения применен самый эффективный способ моделирования — динамический, где шаги времени задаются через встроенные итерации электронной таблицы.

В главе приведены и другие примеры фильтрационного моделирования. В нашей монографии [25] технология МЭТ изложена весьма подробно, с 15-ю примерами, которые расположены последовательно в основном тексте.

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 [25].

Полученные моделированием результаты были сопоставлены с расчетными значениями напоров подземных вод и водопритокков, 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) фильтрационных процессов эффективен и полезен для определения подтопления и дренирования территорий под влиянием городского строительства, позволяет получать научно обоснованные технические решения по защите от подтопления городских территорий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны за счет предотвращения ущерба от подтопления.

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании выполненных автором исследований [1–25] 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.) 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 (1)–(2) и найден новый критерий (3) 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) фильтрационных процессов 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, влаготеплопереноса, 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 мо-

делирования, 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 [11], 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сологаев В.И. Влияние свайных оснований на фильтрацию подземных вод на застроенных территориях // Совершенствование методов инженерных изысканий в строительстве; ПНИИС. – Депонировано во ВНИИС 14 апреля 1986 г., № 6910. – М., 1986. – С. 78-88.
2. Сологаев В.И. Влияние свайных оснований на фильтрационный поток из водоемов // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению; Труды института ВОДГЕО. – М., 1986. – С. 69-74.
3. Сологаев В.И. Влияние несовершенных свайных фундаментов на фильтрацию грунтовых вод // Прогноз подтопления и проектирование мероприятий по его предотвращению; Труды института ВОДГЕО. – М., 1986. – С. 151-154.
4. 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; Институт ВИОГЕМ. – Белгород, 1986. – С. 18-19.
5. 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; Труды института ВОДГЕО. – М., 1987. – С. 94-100.
6. 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.
7. 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.
8. Сологаев В.И. Фильтрационный расчёт двухлинейного ряда водосбросных колодцев / Депонировано во ВНИИНТПИ № 10683. – Библиографический указатель депонированных рукописей ВНИИНТПИ. – М., 1990. – Вып. 9.
9. Сологаев В.И. К определению изменения проницаемости грунта около забивных свай // Изв. Вузов. Строительство и архитектура. – 1991. – № 1. – С. 110-112.
10. Балушкин 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.

11. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: Справочное пособие к СНиП / А.Ж. Муфтахов (разд. 1–6), И.В. Коринченко (разд. 3, 4, 6), Н.М. Григорьева (разд. 6), В.И. Сологаев (разд. 2–5), А.П. Шевчик (разд. 3–6); ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1991. – 272 с.

12. Сологаев В.И. Об изменении проницаемости грунта, уплотненного забивной свайей // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – № 1. – С. 112-114.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Сологаев В.И. Моделирование фильтрации с применением компьютерных ОЛЕ-технологий // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 229-236.

18. Сологаев В.И. Компьютерное моделирование трёхмерной нестационарной фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 236-242.

19. Сологаев В.И. Разностные схемы компьютерного моделирования фильтрации // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1998. – Вып. 2, ч. 1. – С. 242-247.

20. Сологаев В.И. Концепции моделирования защиты от подтопления территорий застройки // Труды СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – Вып. 3, ч. 1. – С. 17-22.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Сологаев В.И. Защита от подтопления в городском строительстве. Устройство и работа. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. – 56 с.

25. Сологаев В.И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: Монография. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. – 416 с.

\* \* \*

Подписано в печать 21.01.2003 г.  
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая  
Усл. печ. л. 2,2. Уч.-изд. л. 2,1.  
Тираж 120 экз. Заказ \_\_\_\_\_  
Отпечатано в типографии СибАДИ  
644099, Омск, ул.П. Некрасова, 10

