

*На правах рукописи*

**КРЮЧКОВ**  
Геннадий Павлович

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника  
05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные  
системы охраны водных ресурсов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2007

Работа выполнена в ОАО «Трест Гидромонтаж» (Селятино, Московская область) и ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

**Кулагин В. А.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

**Турутин Б. Ф.**

доктор технических наук, профессор

**Степанов С. Г.**

Ведущая организация: **ООО «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс»**

Защита состоится 8 ноября 2007 года в 14 часов в ауд. Г-224 на заседании диссертационного совета Д 212.099.03 в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. Тел.: (8-3912) 49-79-90, факс: (8-3912) 91-21-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Автореферат диссертации размещен на сайте <http://www.sfu.krasn.ru/science/post-graduate/report>

Автореферат разослан 08 октября 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

**Сильченко П. Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью разработки и внедрения в практику проектирования водозаборных сооружений инфильтрационного типа новых методов расчета с учетом тепломассообмена, а также региональных особенностей формирования гидротермического режима речных долин и водохранилищ.

Хозяйственно-питьевое водоснабжение большинства населенных пунктов и крупных городов Сибири и Дальнего Востока основано на использовании подземных вод. Развитие системы инфильтрационного водоснабжения выдвинуло в области фильтрации качественно новые задачи, удовлетворительные решения которых могут быть получены лишь на основе теорий, учитывающих различные нелинейные комплексы (природно-климатические, гидротермические и гидрогеологические) и экономическую эффективность. В связи с этим все большее значение приобретает ускорение проектирования, строительства, ввода в эксплуатацию новых систем водоснабжения, улучшение их технических и экономических показателей.

Богатейшие водные ресурсы России и, в частности, Красноярского края и благоприятные технико-экономические перспективы их освоения играют важную роль в развитии производственных сил нашей страны. Одно из ведущих мест в их промышленном освоении занимает задача рационального использования гидроэнергоресурсов. В свете решения этой задачи исключительный практический и теоретический интерес представляет глубокое и всестороннее изучение проблемы рационального использования водных ресурсов бассейнов рек России.

Использование поверхностных вод многих рек для целей водоснабжения сопряжено с рядом затруднений, связанных со спецификой сезонного регулирования. Значительная амплитуда температурных колебаний и связанные с ними колебания уровня, сложные гидротермические условия строительства и эксплуатации из-за деформации берегов, тяжелые термоледовые условия, определяемые теплофизическими процессами в прибрежной зоне, дают основание полагать, что водоснабжение за счет подземных вод обширной прибрежной зоны перспективно и экономически выгодно.

В сложных климатических условиях России большинство водоисточников находятся в хорошо сформированных долинах с мощными аллювиальными отложениями, воды которых имеют прямую гидравлическую связь с открытыми потоками, что обеспечивает возможность применения систем водоснабжения инфильтрационного типа, как в районах уже освоенных, так и в зонах освоения.

Существующие методы подсчета запасов подземных вод не учитывают сложности и особенности температурных эффектов региональных условий, что ведет к ошибкам в оценке производительности инфильтрационных водозаборов. Решение таких сложных задач аналитическими методами связано с

большими трудностями. На данном этапе целесообразно развивать приближенные численные методы. Поэтому задача разработки методов, учитывающих влияние гидротермических региональных факторов и оптимизации водозаборов подземных вод по экономическим показателям является актуальной.

**Объект исследования** – водозаборные сооружения инфильтрационного типа.

**Предмет исследования** – технологические процессы водозаборов с учетом сложных теплофизических условий сибирских регионов.

**Цель диссертационной работы** – совершенствование методов расчета характеристик инфильтрационных водозаборов в зоне активного влияния гидрогеотермических факторов крупных водохранилищ.

**Задачи исследований:**

1. Установить теплофизические и гидрогеологические факторы, влияющие на производительность инфильтрационных водозаборов;
2. Разработать алгоритмы и комплексные программы расчета характеристик инфильтрационных водозаборов и провести численные эксперименты, выявляющие основные закономерности гидротермических процессов;
3. Разработать методики оптимизации основных параметров подрусовых инфильтрационных водозаборов с учетом их функционирования в суровых природно-климатических и сложных экологических условиях;
4. Реализовать рекомендации по проектированию водозаборных сооружений инфильтрационного типа с учетом теплофизических и гидрогеологических факторов их эксплуатации.

**Научная новизна работы и основные положения, выносимые на защиту:**

– впервые установлены зависимости расходных характеристик водозаборов инфильтрационного типа от температуры воздуха, речного и подрусового потоков, основанные на учете коэффициента динамической вязкости открытых и русловых потоков в зависимости от времени и температуры, которые оказывают существенное влияние на параметр производительности водозабора;

– разработаны и реализованы математические модели, алгоритмы и комплексные программы расчета и численного моделирования процессов инфильтрации в реальных теплофизических и гидрогеологических условиях; предложена методика решения задач в условиях таликовой гидрокриозоны. В отличие от ранее известных в предлагаемой методике форма границ и неоднородность (анизотропность) пористой среды могут задаваться с учетом условий непрерывности их пространственного изменения по коэффициентам фильтрации и проницаемости в широком диапазоне от 10 до 1000 м/сутки;

– определены зависимости параметров процессов теплообмена и термокоагуляции руслового аллювия от характеристик потока при изменении концентрации взвешенных наносов и температурных полей открытых и подрусовых потоков с учетом нестационарной двухмерной фильтрации;

– предложена методика технико-экономического обоснования при решении задачи оптимизации характеристик инфильтрационных водозаборов с учетом гидрогеотермических, физических и конструктивных параметров водоисточников.

**Практическая ценность.** Разработанные алгоритмы и составленные на их основе комплексы программ расчета с использованием ЭВМ могут найти широкое применение в проектных и научно-производственных организациях для решения актуальных инженерных задач тепломассообмена и гидрологии инфильтрационных сооружений в нестационарных природно-региональных условиях. Этим создаются предпосылки к проектированию, строительству и эксплуатации экономически обоснованных и надежных систем водоснабжения.

**Использование результатов работы.** Программы расчета производительности инфильтрационных водозаборов внедрены в ВСО «Росводоканал-проект», институте «Красноярскгражданпроект», тресте «Водстрой», Главводстрое (г. Красноярск) и ООО «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс».

По данным программам также выполнялись расчеты водоочистных полупромышленных установок в системах оборотного водоснабжения на крупных строительных и промышленных объектах Красноярского края (по заказу УПП Главкрасноярскстроя и проектно-технологического треста «Оргтехводстрой» Главводстроя (г. Красноярск).

Выводы и рекомендации использованы в поисковых работах в ОАО «Трест Гидромонтаж» (Селятино, Московская область).

Теоретическая часть диссертации включена в программу курса «Водозаборные сооружения», читаемого для студентов специальности «Водоснабжение и водоотведение» на Инженерно-экологическом факультете Института архитектуры и строительства ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

**Достоверность результатов** подтверждена сопоставлением численных и аналитических решений с большим объемом натуральных и экспериментальных наблюдений.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на Всероссийской НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения» (Красноярск, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2005, 2006, 2007); I и II Совещаниях руководителей служб инженерного обеспечения Ассоциации сибирских и дальневосточных городов (АСДГ) (Красноярск 1995, Иркутск 1996); Всероссийском семинаре МАГ по проблемам водоснабжения крупных городов (Красноярск 2007).

**Личный вклад автора.** Автору принадлежат постановка и реализация задач исследований, обоснование и формулировка основных положений научной новизны и практической значимости, внедрении полученных результа-

тов совместно со специалистами ООО «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс», института «Красноярскгражданпроект» и другими, которым автор выражает глубокую благодарность за помощь в работе.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из которых 2 монографии, 7 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК, 3 – в сборниках научных трудов и материалов научно-технических конференций различного уровня.

**Объем и структура работы.** Материалы диссертации изложены на 166 страницах основного текста, включающего 43 рисунка и 7 таблиц. Работа состоит из введения, 7 разделов, основных результатов и выводов и списка использованной литературы из 88 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Вопросом номер один в настоящее время называют проблему обеспечения населения и промышленности питьевой и технической водой. Бурный рост городов и населения Сибири и Дальнего Востока, а также создание в этих районах многих важных производств, в технологическом цикле которых применяется исключительно чистая вода, требуют решения задач по водоснабжению и водоснабжению с учетом специфических условий регионов. Положение осложняется тем, что за последние годы в составе сточных вод, сбрасываемых в реки Сибири и Дальнего Востока, резко увеличилась доля таких стойких и вредных примесей, как новые виды моющих средств, продуктов органического синтеза. По этой причине возникли затруднения в подаче питьевой воды таким крупным городам, как Тюмень, Томск, Барнаул, Красноярск, Омск и др. Как свидетельствуют последние литературные данные, загрязнение рек коснулось и районов Дальнего Востока, где запасы пресных вод незначительны.

Системы водоснабжения населенных пунктов Восточной Сибири используют главным образом подрусовые подземные воды, забираемые с помощью инфильтрационных водозаборов. Работа таких водозаборов отличается высокой надежностью подачи воды потребителю и ее высокой экономичностью.

Прогрессирующее ухудшение качества воды заставляет обращать особое внимание на выбор типов водозаборных сооружений и во многих случаях отдавать предпочтение инфильтрационным водозаборам, дающим чистую воду питьевого качества без применения сложных и дорогостоящих очистных сооружений. К этому следует добавить, что инфильтрационные водозаборы в летнее время дают воду пониженной температуры, что имеет большое значение для целого ряда промышленных производств.

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность проблемы, поставлена цель и определены задачи исследования. Сфор-

мулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первом разделе** дается оценка существующим системам инфильтрационного водоснабжения с позиции их надежности и эффективности, приводятся натурные данные по работе инфильтрационных водозаборов.

Расчет и проектирование водозаборов подземных вод – весьма сложный и трудоемкий процесс инженерной деятельности. Ставится задача разработать документацию, которая на основе гидротермической, гидрогеологической, топографической, экологической и экономической информации позволяет реализовать технический объект, обеспечивающий потребителя водой в требуемом количестве и заданного качества. По существу эта задача сводится к прогнозированию условий функционирования объекта и нахождению такого сочетания параметров, которое обеспечивает его эксплуатацию в режимах, близких к оптимальным.

Методы расчета производительности инфильтрационных водозаборов, разрабатываемых на основе общей теории фильтрации, получили отражение в фундаментальных трудах Н. Н. Павловского, Л. С. Лейбензона, П. Я. Полубариновой-Кочиной. Для расчета инфильтрационных водозаборов исключительную ценность представляют исследования И. А. Чарного, М. А. Гусейн-Заде, Ю. П. Борисова и многих других специалистов в области нефтяной и подземной гидравлики. Широко используются для этих целей также работы по теплофизическим и фильтрационным расчетам в гидротехнике и в области водопонижения и дренажа. К ним относятся работы С. К. Абрамова, В. И. Аравина, Н. Н. Веригина, В. М. Григорьева, В. П. Недриги, С. Н. Нумерова, Л. Н. Павловской, А. В. Романова, В. М. Шестакова, В. С. Усенко и многих других. Однако, наряду с общностью проблем подземной гидродинамики, в различных областях необходимо иметь в виду и специфические особенности гидротермических и гидрогеологических задач, возникающих в связи с применением инфильтрационных водозаборов.

Результаты анализа проведенного обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки намеченных в диссертации задач и их поэтапного решения теоретическими и экспериментальными методами.

**Во втором разделе** дается анализ факторов, влияющих на формирование режима подземных вод в прибрежной зоне Красноярского водохранилища. Изучение влияния инженерной и хозяйственной деятельности человека, природных естественных и искусственных факторов на качественный и количественный режим водохранилища сопряжено с рядом объективных трудностей. Создание крупных водоемов в суровых климатических условиях оказало заметное локальное влияние на климат, привело к перестройке физико-химических и биологических свойств воды.

Неравномерность питания подземных вод в результате сезонного регулирования водохранилища, значительные различия режимобразующих фак-

торов, физико-химических и биологических процессов требуют выявления закономерности в восполнении запасов подземных вод в зоне активного температурного и гидрогеологического влияния Сибирских регионов.

В результате анализа существующих экспериментальных и расчетных работ в области проектирования, строительства и эксплуатации инфильтрационных водозаборов сформулирована цель данной диссертационной работы.

Для получения прогнозных методик расчета геотемпературного поля нет необходимости рассматривать дифференциальные уравнения теплопереноса в общей постановке, так как из всех физических процессов для каждого конкретного случая только некоторые будут иметь определяющее значение. Так, скорость фильтрации в пластах на участках расположения водозаборов в среднем составляет 0,5–5,0 м/ч. Число Пекле, характеризующее соотношение величин переноса тепла конвекцией и теплопроводностью, при данных скоростях фильтрации имеет величину порядка 100, что говорит о преимущественном переносе тепла конвективным путем. Поэтому при рассмотрении переноса тепла вдоль направления движения потока величиной переноса тепла теплопроводностью можно пренебречь. Градиенты температуры в кровле и подошве в течение года изменяются в значительных пределах, достигая величин порядка 2–5 °С/м. В горизонтальном направлении пласта в кровле и подошве градиент температуры редко превышает 0,001–0,005 °С/м. Исходя из этого, передача тепла в горизонтальном направлении в водоупорных породах в формировании геотемпературного поля играет подчиненную роль.

**В третьем разделе** проведен анализ уровенного режима подземных вод (рисунок 1) показывает, что он характеризуется четкой сезонной изменчивостью с неуклонным понижением уровня в течение холодного периода и его подъемом с наступлением теплого периода, в то время как уровень воды в реке остается относительно постоянным в связи с зарегулированностью р. Енисей. На сезонные колебания накладываются суточные колебания небольшой амплитуды уровня воды в реке, связанные с режимом работы Красноярской ГЭС (изменение расхода реки по часам суток, а также по рабочим и нерабочим дням недели). Изменение уровня подземных вод при их сезонных колебаниях приводит к изменению мощности подземного потока и коэффициента водопроводимости пласта по сезонам года. Постоянная величина дебита водозабора обеспечивается путем увеличения понижения уровня в водозаборных скважинах в холодный период года.

Данные о величине отрыва уровня подземных вод от уровня воды в реке по береговой кромке речного потока характеризуют степень взаимодействия поверхностных и подземных вод участка расположения водозабора. Исходя из характера временной зависимости этой величины, можно заключить, что тесная связь подземных и поверхностных вод наблюдается в теплое время года, тогда как в холодное время эта связь затруднена и условия питания подземных вод существенно ухудшаются. Сезонные изменения взаимосвязи поверхностных и подземных вод обуславливаются проявлениями различных



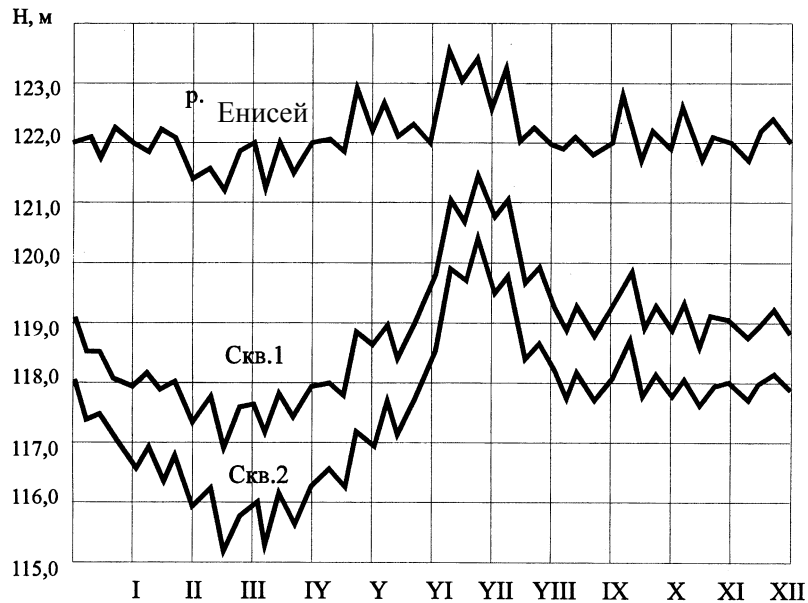


Рисунок 1 – Режимы уровня поверхностных и подземных вод на участке инфильтрационного водозабора

гидрогеотермических факторов в теле водовмещающих пород.

Сезонные колебания эксплуатационных запасов (количество подземных вод, которое может быть получено рациональным в технико-экономическом отношении режиме их эксплуатации с помощью водозаборного сооружения) подземных вод того или иного участка речной долины можно наглядно представить изменениями удельного дебита размещенного здесь водозабора. На рисунке 1 приводятся графические данные изменения удельного дебита водозабора рассматриваемого участка острова. Эти данные свидетельствуют о значительных сезонных колебаниях эксплуатационных запасов подземных вод речных аллювиальных отложений долины р. Енисей, когда отношение максимального к минимальному значений удельного дебита за год составляет 4 раза. Соответственно, во столько же раз изменяется величина эксплуатационных запасов участка.

**В четвертом разделе** методы расчета производительности инфильтрационных водозаборов разрабатываются на основе общей теории фильтрации. Количественные исследования задач теплообмена природных гидрогеотермодинамических системах имеет ряд особенностей, которые определяются главным образом тем, что при длительной и интенсивной эксплуатации данного вида сооружений происходит заиливание (кольматация) русловых отложений.

Инфильтрационные водозаборы (вертикальные скважины и колодцы, горизонтальные береговые и подрусовые дрены и галереи), см. рисунок 2, в практике водоснабжения городов Сибири и Дальнего Востока имеют большое распространение: аллювиальные воды, забираемые инфильтрацией из речных русел, составляют более половины. Красноярск, Абакан, Кызыл, Улан-Удэ, Хабаровск, Уссурийск, Находка, Арсентьев, Биробиджан, Большекаменск, Бикин, Сучан и многие другие сибирские и дальневосточные города снабжа-

ются хозяйственно-питьевой водой исключительно за счет подземного стока русловых отложений. Для отдельных районов целесообразность применения и перспективность инфильтрационных водозаборов объясняется также и тем, что использование для хозяйственно-питьевых нужд (водоснабжения) грунтовых вод подземного стока на водоразделах вблизи промышленных предприятий горнорудного профиля, например, на Алтае и в Восточной Сибири (Кемерово, Новокузнецк, Белов и др.), сильно затруднено. Глубокие рудники и шахты дренируют (осушают) территорию вокруг предприятий и жилых массивов, понижают статический уровень грунтовых вод. На Дальнем Востоке вода из речного аллювия, к тому же, более высокого качества, чем грунтовые воды на территории водоразделов с большим содержанием железа (8-60 мг/л) или гидрата его окислов.

В связи с этим инфильтрационные водозаборы, применяемые для водоснабжения районов Дальнего Востока, имеют особенно большое значение и весьма перспективны для дальнейшего использования.

В последнее время в гидрогеологическую практику, как и в другие отрасли, все шире внедряются методы моделирования на аналоговых приборах и расчетов на электронно-вычислительных машинах. Как показано ниже, такие методы могут быть применены и при расчетах производительности инфильтрационных водозаборов в условиях термокольматации для прогнозирования их дебитов на длительный период. Нужно, однако, иметь в виду, что точность и надежность гидрогеологических и гидротермических расчетов находятся в прямой зависимости от точности и достоверности исходных данных, которыми характеризуется природная гидрогеологическая обстановка. Это в равной мере относится и к аналитическим расчетам, и к моделированию.

Исключительное разнообразие естественных природных условий, крайне изменчивый в пространстве и во времени гидрологический режим рек-водоисточников, невозможность заранее предусмотреть, в каком направлении он будет изменяться, – все это обуславливает приближенность расчетов. Полностью избежать такой приближенности расчетов практически невозможно, так как подробное освещение естественной обстановки во многих случаях связано с необходимостью значительных затрат на изыскательские и гидрометрические работы.

В этих условиях вполне справедливы приближенные прогнозы на основе схематизации природной обстановки и соответствующих аналитических решений. Вместе с тем следует подчеркнуть, что аналитические решения даже при неизбежной схематизации природной обстановки дают возможность в более полной мере выявить основные закономерности и относительную роль различных природных и эксплуатационных факторов, сопутствующих работе водозаборов. Они служат также и для разработки самой методики моделирования.

Очень слабая кольматация, практически не сказывающаяся на работе

водозабора, может иметь место при малой мутности речных вод, интенсивных процессах переформирований русла и малых скоростях инфильтрации. Сильной и быстрой кольматации способствуют, наоборот, большая мутность речных вод, вялый ход руслообразующих процессов, большие скорости инфильтрации. В неблагоприятных для работы инфильтрационных водозаборов условиях их производительность может резко снизиться в первые годы эксплуатации.

Для оценки этого явления уместно воспользоваться предложенным М. А. Великановым безразмерным критерием устойчивости отложений деформируемого материала в речном русле:

$$K_n = \frac{1,38}{\varphi} \left[ \frac{D/J \cdot 1000}{H} \right]^{1/2},$$

где  $D$  – диаметр русловых фракций, мм;  $J$  и  $H$  – уклон и средняя глубина потока, м ( $D/J \cdot 1000$  – число В. М. Лохтина);  $\varphi$  – параметр турбулентности, определяемый, по В. Н. Гончарову, в зависимости от диаметра русловых фракций.

**В пятом разделе** рассматриваются задачи фильтрации в подземном пласте которые формулируются путем задания дифференциального уравнения, устанавливающего связь между временным и пространственным изменениями уровней подземного потока, с соответствующими граничными условиями.

Временное изменение и пространственное распределение уровней  $H(x, y, \tau)$  в безнапорном фильтрационном потоке в нестационарном режиме, задается уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( KH \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( KH \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu^* \left( \frac{\partial H}{\partial \tau} \right),$$

где  $x, y$  – декартова система координат;  $\tau$  – время, сут.;  $K$  – коэффициент фильтрации водоносных пород, м/сут.;  $\mu^*$  – коэффициент водоотдачи.

Приведенное дифференциальное уравнение является нелинейным относительно искомой функции, поскольку в левой его части величина водопроницаемости зависит от величины напора. Для получения конечного решения, пригодного для практического использования, это уравнение обычно линеаризуют по одному из двух способов. Линеаризация по способу Ж. Буссинеска заключается в осреднении величины напора по области фильтрационного движения под знаком производной. Более эффективной считается линеаризация по способу Багрова – Веригина, когда осредняется дополнительный множитель  $H$  перед знаком производной. Линеаризация по данному способу сводит нелинейное уравнение к виду:

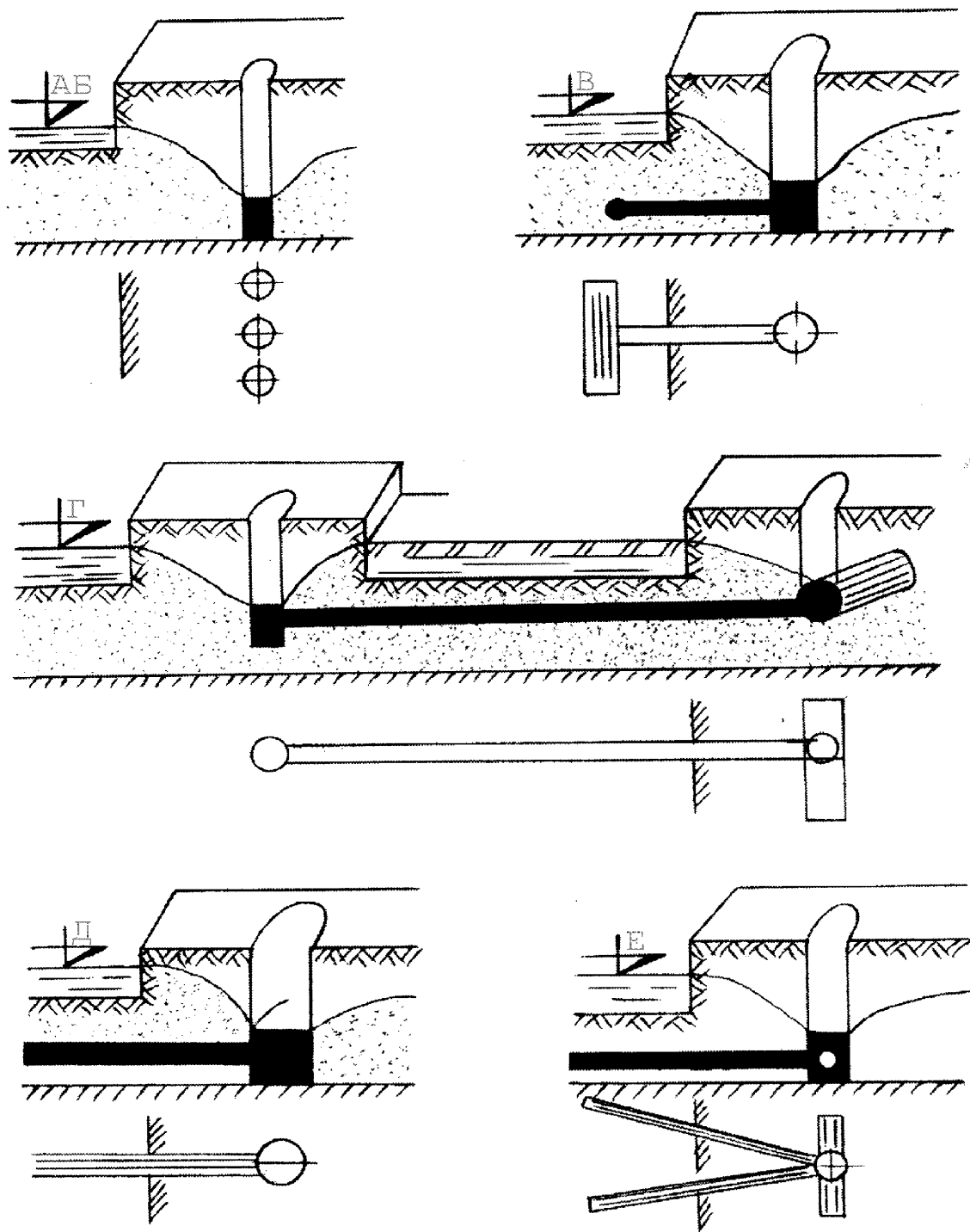


Рисунок 2 – Схемы инфильтрационных водозаборов: *a* – одиночные несовершенные шахтные колодцы (вертикальные скважины) с питанием только через дно и боковые стенки; *б* – ряд близкорасположенных взаимовлияющих береговых несовершенных шахтных колодцев (вертикальные скважины); *в* – береговые несовершенные горизонтальные дрены, параллельные оси движения речного потока; *г* – подруловые несовершенные горизонтальные дрены, параллельные оси движения речного потока; *д* – подруловые несовершенные горизонтальные дрены, нормальные оси движения речного потока; *е* – лучевые водозаборы – береговые и подруловые несовершенные горизонтальные дрены, радиально сходящиеся к шахтному колодцу

$$a \left( \frac{\partial^2 H^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H^2}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial H^2}{\partial \tau},$$

где  $a = \frac{KH_{cp.}}{\mu}$  – коэффициент уровнепроводности, м/сут.

Для полного описания процесса фильтрации необходимо к дифференциальному уравнению добавить условия однозначности, состоящие из начальных и граничных условий. Граничные условия задаются на границах потока в виде значений напора либо расхода.

На линии уреза водохранилища выполняются граничные условия I рода, выражающие равенство уровней подземных и поверхностных вод. В связи с сезонными колебаниями уровня водохранилища, подземные воды на контуре своего питания будут испытывать колебания, полностью повторяя ход изменения уровня открытого водотока. Следовательно, уровень подземных вод на линии уреза береговой кромки задается функцией времени. Эта функция будет периодической во времени с интервалом периода в один год. Периодические функции чаще всего выражают через функции  $\cos 2\pi\omega\tau$ ,  $\sin 2\pi\omega\tau$ . Поэтому аналитическое выражение этих условий удобнее представить в виде

$$H_{b(\tau)}^2 = H_0^2 + A \cos 2\pi\omega\tau,$$

где  $H_0$  – среднегодовой уровень воды в водохранилище, м;  $A$  – амплитуда колебаний, м;  $\omega$  – период колебаний;  $\omega = 1/365$  сут.

На границах входа подземных вод в водоприемные сооружения водозабора задаются граничные условия II рода, характеризующие величину притока воды к сооружениям. Режим работы водозабора определяется режимом водопотребления, который принимается постоянным во времени с объемом водоподдачи, задаваемым потребителем. Поэтому граничные условия на контурах водоприемных сооружений представляются в виде равенства расхода некоторой постоянной величине в виде

$$q = K \frac{\partial H^2}{\partial x} = const,$$

где  $q$  – производительность водозаборного сооружения, м/сут.

Основной задачей гидравлического расчета водозаборов является определение дебита водоприемных сооружений, и понижения уровня в процессе эксплуатации в данных гидрогеологических условиях на расчетный период времени. Гидравлический расчет водозабора может быть выполнен при той или иной степени схематизации гидрогеологических условий. Эта схематиза-

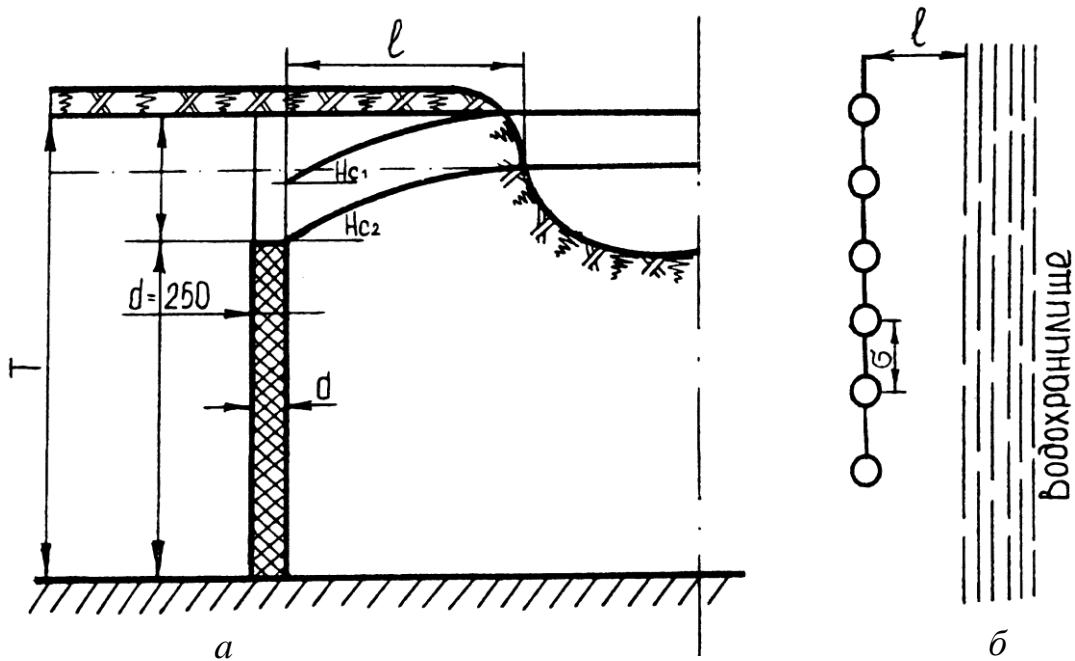


Рисунок 3 – Расчетная схема водозабора: *a* – разрез; *б* – план

ция основана на упрощении реальных условий и замене их на более простые, в рамках которых могут быть найдены решения.

В реальных условиях геологические разрезы участков размещения водозаборов представляют собой сложное сочетание геологических структур в вертикальном сложении и по площади распространения. При рассмотрении эксплуатируемый водоносный горизонт схематизируют в виде пласта постоянной мощности неограниченных размеров по области фильтрационного движения. За водоупор пласта принимают слои пород с относительно малой водопроницаемостью. Неоднородность фильтрационных и емкостных параметров водонасыщенных пород пласта приводится к условно однородным. Криволинейные очертания границ пласта спрямляются.

На основании общепринятых принципов схематизации гидрогеологические условия береговых участков при решении фильтрационных задач можно свести к типовой схеме полуограниченного пласта с совершенным врезом русла и прямолинейной границей уреза берега. Расчетная схема водозабора показана на рисунке 3.

**В шестом разделе** рассматриваются процессы переноса тепла в горных породах, слагающих аллювиальные отложения, осуществляются посредством молекулярной теплопроводности, гидравлической дисперсии и конвективного переноса.

Молекулярная теплопроводность обусловлена тепловым движением микрочастиц вещества и осуществляется повсеместно при наличии градиента температуры. Перенос посредством молекулярной теплопроводности имеет решающее значение для водоупорных пород.

Конвективный перенос обусловлен перемещением относительно крупных частиц жидкости. Обладая большой подвижностью и высокой теплоем-

костью, частицы воды как носители тепла осуществляют перенос тепла из одной области в другую, причем этот перенос возможен как из области с низкой температурой в область высокой температуры, так и наоборот. В связи с этим процессы переноса тепла в водоносных горизонтах в значительной степени зависят от характера движения подземных вод, от направления движения и распределения скоростей по потоку.

Гидравлическая дисперсия тепла обусловлена неупорядоченностью размеров, длиной и ориентировкой поровых каналов. В связи с этим истинные скорости фильтрации воды отличаются от своих средних скоростей и их значения группируются с некоторой вероятностью от средних значений. Такое различие в скоростях потока приводит к рассеиванию тепла, как по пути фильтрации воды, так и поперек его направления движения.

Конвективный перенос тепла в водоносном пласте может быть описан уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x}(q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(q_y) + \frac{\partial}{\partial z}(q_z) + \omega = c \frac{\partial T}{\partial \tau},$$

где

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -(\lambda + D) \frac{\partial T}{\partial x} + c_e v_x T \\ q_y &= -(\lambda + D) \frac{\partial T}{\partial y} + c_e v_y T \\ q_z &= -(\lambda + D) \frac{\partial T}{\partial z} + c_e v_z T \end{aligned} \right\},$$

где  $q_x, q_y, q_z$  – составляющие вектора плотности теплового потока по направлениям координат;  $T$  – температура водоносного грунта;  $v_x, v_y, v_z$  – составляющие скорости фильтрации;  $\omega$  – распределение источников и стоков тепла;  $c_e$  – объемная теплоемкость воды;  $c$  – объемная теплоемкость грунта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды;  $D$  – коэффициент гидродисперсии тепла;  $\tau$  – время.

Теплообменные процессы между пластом и окружающими водоупорными породами происходят посредством конвективной отдачи тепла. Исходя из уравнения баланса тепла, на границе водоупорных пород с водоносным пластом должно выполняться условие

$$(\lambda + D) \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \bar{n}} \Big|_S,$$

где  $T_i$  – температура водоупорных пород;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности водоупора;  $\vec{n}$  – направление нормали к границе;  $s$  – поверхность границы контакта.

Кроме того, на границе должно соблюдаться условие неразрывности геотемпературного поля:

$$T = T_i|_s.$$

Если водоупорными породами являются криогенные водоупоры, то та или иная направленность теплообмена мерзлых и талых пород на границе их контакта неизбежно вызывает изменение физического состояния контактирующих сред. Происходит протаивание либо промерзание водовмещающих пород, обуславливающих подвижность границы раздела фаз.

**В седьмом разделе** рассматриваются основные положения и задачи разработки методики оптимизации инфильтрационных водозаборов с учетом их функционирования в сложных природно-климатических условиях Сибири и Дальнего Востока.

Целевая функция  $z$ , характеризующая минимум годовых приведенных затрат по  $j$ -элементам водозабора, может быть представлена в виде

$$z = \sum_{i=1}^k z_j \Rightarrow \min, k = 1, 2, 3, \dots, k,$$

где  $z_j$  – приведенные затраты по  $j$ -му элементу водозабора.

На современном уровне технико-экономические исследования предусматривают системный подход к изучению технических и экономических явлений, особенно при их математическом моделировании. С целью устранения субъективного характера назначения основных параметров инфильтрационных водозаборов в ходе их проектирования в различных природных и экономических условиях, ставится задача установления аппроксимирующих зависимостей между техническими и экономическими параметрами водозаборов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Основной причиной падения производительности водозаборных сооружений является процесс термокольматации, а также особенности формирования гидротермического режима речных долин. Изучение этих процессов с помощью шурфования руслового аллювия в непосредственной близости (в пределах 0,10–0,50 м) от уреза воды показывает, что гидравлическая разобщенность открытых и подземных вод приводит к резкому (в некоторых случаях в 5–10 раз) снижению дебитов сооружений. Полученные данные положены в основу методов расчета производительности водозаборов при учете



влияния концентрации взвешенных наносов. На основе комплексного анализа теоретических положений и обобщения натуральных данных многолетней работы обследованных водозаборов получены следующие результаты, составляющие в совокупности научную и практическую основу проектирования водозаборных сооружений в сложных гидрогеотермических условиях:

1. Установленные впервые зависимости расходных характеристик водозаборов инфильтрационного типа от температуры воздуха, речного и подруслового потоков носят нелинейный характер. Изменение коэффициента динамической вязкости открытых и русловых потоков, имеющих прямую гидравлическую связь, в зависимости от времени и температуры оказывает существенное влияние на параметр производительности водозабора. Изменение температур воздуха (в диапазоне от  $-20$  до  $20^{\circ}\text{C}$ ) и речного и руслового потоков (от  $10^{\circ}\text{C}$  до температур фазовых переходов) приводит к увеличению коэффициента динамической вязкости от 0,01 до 0,02, что сказывается на падении производительности до 20%. Эти результаты позволяют определить технико-экономическую целесообразность проектирования и постройки водозаборов на основании связи теплофизических, гидродинамических и производственных характеристик;

2. Разработанные математические модели процессов инфильтрации в реальных теплофизических и гидрогеологических условиях позволили предложить методику решения задач в условиях таликовой гидрокриозоны. В отличие от ранее известных в предлагаемой методике форма границ и неоднородность (анизотропность) пористой среды могут задаваться с учетом условий непрерывности их пространственного изменения по коэффициентам фильтрации и проницаемости, в широком диапазоне от 10 до 1000 м/сутки

3. Физическое моделирование фильтрации водных малоконцентрированных суспензий, подтверждает, что термокольматации подвергаются не верхние слои грунта, фильтрационная способность которых периодически восстанавливается русловыми деформациями во время паводков, а глубинные, где происходит осветление взмученной воды. Образование иловой пленки на дне водоисточника не происходит при наличии определенной величины донных скоростей;

4. Анализ данных многолетней работы инфильтрационных водозаборов показывает, что работа без риска снижения производительности из-за термокольматации возможна при наличии следующих условий: весьма умеренных режимах откачек инфильтрата из сборных колодцев – не менее, чем в 1,5–1,8 раза меньше тех дебитов, которые мог бы давать водозабор в период его эксплуатации при наличии гидравлической связи между поверхностными и грунтовыми водами; заложения водосборных частей ближе к подошве мощных – порядка 10–20 и более метров слоев руслового аллювия; достаточной удаленности – не менее, чем на 80–120 м – сооружений от уреза воды в реке при меженных горизонтах 75–90 %-ной обеспеченности. Наличие хотя бы двух из этих факторов или первого в отдельности обеспечивает преобладание

грунтовых вод в общем поступлении инфильтрата, эксплуатационная кольматация руслового аллювия при этом может не проявляться длительное время – порядка десятков лет;

5. При назначении степени откачек инфильтрата из сборных колодцев удобно принимать отношение искусственно регулируемых рабочих дебитов к максимально возможному в данных условиях, например, 0,25; 0,50; 0,75 и 1,0. Для русловых отложений с начальным коэффициентом фильтрации 800 м/сутки (енисейский аллювий в створе г. Красноярска по водопосту «Базаиха») и 0,11-ной мутности воды (1100 г/м<sup>3</sup>: 10-кратная гидрологическая обеспеченность) даже при отсутствии размыва русла степени 0,25 и 0,50 не вызывает снижение дебитов, а увеличение до 0,75 или 1,0 резко уменьшает дебиты в 3–5 раз;

6. Предложенная методика технико-экономического обоснования при решении задачи оптимизации характеристик инфильтрационных водозаборов с учетом гидрогеотермических, физических и конструктивных параметров водоисточников может быть использована при проектировании водозаборных сооружений в любых климатических зонах.

#### **Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

1. Энциклопедия обращения с отходами / А. И. Матюшенко, **Г. П. Крючков**, Т. А. Кулагина, Л. Н. Горбунова; ред. А. И. Матюшенко. – Москва – Смоленск: Изд-во «Маджента», 2007. – 496 с.

2. Азаров, В. Н. Промышленная экология / В. Н. Азаров, В. А. Грачев, **Г. П. Крючков** и др.; ред. член-корр. РАН В. А. Грачев. – М.: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. – 555 с.

3. **Крючков, Г. П.** Оценка экологической безопасности территории / Г. П. Крючков // Проблемы региональной экологии, 2006. – № 2. – С. 11–14.

4. **Крючков, Г. П.** Инженерно-экологическая особенность проектирования водозаборных сооружений Сибирских регионов / Г. П. Крючков, В. А. Кулагин // Экология урбанизированных территорий, 2007. – № 3. – С. 65–68.

5. **Крючков, Г. П.** Природные особенности исследования водозаборов Сибири из подземных источников / Г. П. Крючков, В. А. Кулагин // Экология урбанизированных территорий, 2007. – № 3. – С. 52–54.

6. **Крючков, Г. П.** Гидравлический расчет подрусловых инфильтрационных сооружений с учетом криогенных процессов и деформации пористой среды / Г. П. Крючков // Проблемы региональной экологии, 2007. – № 3. – С. 36–39.

7. **Крючков, Г. П.** Гидрогеотермический режим речных долин для прогнозирования условий инфильтрационного водоснабжения / Г. П. Крючков // Проблемы региональной экологии, 2007. – №4. – С.34–38.

8. **Крючков, Г. П.** Зарубежный опыт эксплуатации водозаборных сооружений инфильтрационного типа / Г. П. Крючков // Экология урбанизированных территорий, 2007. – № 4. – С.62–65.

**9. Крючков, Г. П.** Оценка экологического состояния природно-технической системы – открытого водозабора «Гремячий лог» на реке Енисей / О. Г. Дубровская, Г. П. Крючков // Экология урбанизированных территорий, 2007. – № 4 – С. 45–51.

Крючков Геннадий Павлович

**Теплофизические особенности водоснабжения  
из подземных источников регионов Сибири**

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 01.10.2007. Заказ

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПЦ Политехнического института СФУ  
660074, Красноярск, ул. Киренского, 28