

*На правах рукописи*

**СОЛЬСКИЙ СТАНИСЛАВ ВИКТОРОВИЧ**

**ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ВОД  
В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
НА ТЕХНОГЕННО-НАГРУЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

**Специальность 25.00.36 - Геоэкология**

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

**Санкт-Петербург - 2007**

Работа выполнена в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева».

Научный консультант, доктор технических наук, профессор – Штыков Валерий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор – Сметанин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор – Тарасов Борис Гаврилович

доктор технических наук, с.н.с. – Даишев Шамиль Талгатович

Ведущая организация – ФГУП «Российский научный центр «Прикладная химия»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. в \_\_\_\_\_ час.  
на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в ГОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гидрокорпус 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Орлов

В.Т.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Решение проблемы сохранения природного качества подземных и поверхностных вод может быть достигнуто двумя путями: созданием систем инженерной защиты природных вод от попадания в них загрязняющих веществ и развитие новых, прогрессивных технологий очистки использованных вод. Решению первой задачи и посвящена данная работа.

Недостаточное научное обеспечение в области разработки новых технических решений инженерной защиты природных вод на техногенно-нагруженных территориях, недостаточный учет многообразия природных факторов, характеризующих конкретный объект, приводит к ряду недостатков в практике изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации систем инженерной защиты.

Поэтому, проблема разработки и совершенствования научного обеспечения инженерной защиты природных вод от загрязнения на техногенно-нагруженных территориях, которая позволила бы с учетом ее функционального назначения и природно-климатических условий создавать надежные, безопасные природно-технические системы, прогнозировать уровень негативного воздействия и обеспечить условия для проведения эффективной рекультивации территорий, является своевременной и актуальной.

**Целью диссертации** являлось решение важной хозяйственной проблемы по разработке научного обеспечения новых технических решений, конкретных методик оценок и расчетов, рекомендаций по проектированию, строительству и эксплуатации инженерной защиты природных вод от загрязнения в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях, а так же ряда новых конкретных схем инженерной защиты, обладающих высоким уровнем надежности и экологической безопасности по отношению к природным водам.

Таким образом, в число **основных задач исследований** были включены:

- анализ безопасности сложной природно-технической системы, позволяющий обосновать комплекс мероприятий, необходимый и достаточный для обеспечения экологической безопасности природных вод на территории, поверхностные и подземные воды которой могут подвергаться загрязнению;
- обоснование расчетных гидрологических характеристик на техногенно-нагруженной территории, определение коэффициентов стока для некоторых видов поверхностей, характерных для техногенно-нагруженных территорий, по данным экспериментальных исследований, проведенных в натуральных условиях;
- усовершенствование методики численного моделирования пространственных фильтрационных потоков в областях фильтрации сложной конфигурации, с кусочно-

неоднородными фильтрационными характеристиками и сложными условиями питания и разгрузки, характерных для природно-технических систем на техногенно-нагруженных территориях;

- разработка способа оценки величины риска загрязнения природных вод при использовании модели массопереноса для проведения прогнозных вероятностных расчетов распространения загрязняющих веществ в природно-технических системах;
- разработка метода оценки состояния систем инженерной защиты с целью обеспечения их мониторинга.

**Методическую базу** исследований составили основы теории анализа безопасности сложных природно-технических систем, методы расчетов гидрологических характеристик малых водосборов, математические модели фильтрации и процессов переноса загрязняющих веществ, численные методы решения уравнений, методы анализа случайных явлений, оценки надежности инженерных объектов и технической диагностики.

**Достоверность** и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, основана на:

- удовлетворительном совпадении расчетных величин стока по разработанной методике с имеющимися экспериментальными данными, полученными лично автором;
- хорошей сходимости рассчитанного водного баланса (невязка рассчитанного водного баланса не более 10%) с натурными данными, полученными лично автором;
- совпадении результатов численного моделирования, с результатами электрогидродинамического моделирования и данными натурных наблюдений, полученных лично автором, а также с результатами расчетов опубликованными другими авторами;
- использовании сертифицированного оборудования и программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований и численного моделирования.

**Научную новизну** работы определяют следующие элементы выполненных исследований по геоэкологии:

- предложен комплексный подход к изучению всех факторов, обуславливающих обоснованность технических решений по защите природных вод от загрязнения в сложных природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях;
- разработан порядок анализа безопасности сложной природно-технической системы, и на его основе принципы оптимизации проектных решений;
- прогнозирование, на стадии проектирования, влияния системы инженерной защиты на природные воды;
- экспериментально получены коэффициенты стока для ряда поверхностей, характерных для техногенно-нагруженных территорий;

- обоснован вероятностный подход к решению задач массопереноса;
- разработаны основные положения по оценке состояния и мониторингу инженерной защиты природных вод на техногенно-нагруженных территориях.

**Личный вклад автора** заключается в разработке комплексного подхода к решению задач научного обоснования проектирования и строительства систем инженерной защиты природных вод от загрязнения на техногенно-нагруженной территории в сложных природно-технических системах. В процессе решения этих задач автором:

- разработана процедура анализа безопасности сложной природно-технической системы при инженерной защите природных вод от загрязнения на техногенно-нагруженных территориях;
- предложена методика расчета основных гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий и в полевых условиях экспериментально определены коэффициенты стока для некоторых видов поверхностей, характерных для этих территорий;
- усовершенствована методика численного моделирования пространственных фильтрационных потоков в областях фильтрации сложной конфигурации с кусочно-неоднородными фильтрационными характеристиками и сложными условиями питания и разгрузки;
- предложен способ оценки величины риска загрязнения природных вод при использовании модели массопереноса. Выполнен сравнительный анализ вероятностных расчетов времени достижения фронта переноса загрязняющего вещества до определенного створа с учетом и без учета сорбции;
- разработан метод оценки состояния систем инженерной защиты с целью обеспечения их мониторинга применительно к ряду конкретных объектов.

**Практическая значимость диссертации** заключается в формулировке и реализации основных принципов обоснования технических решений инженерной защиты природных вод от загрязнения; выборе рациональной схемы дренирования техногенно-нагруженных территорий; повышении качества оценки надежности систем инженерной защиты природных вод от загрязнения. Все это должно повысить эффективность инженерных решений при проектировании и эксплуатации. Материалы исследований вошли в состав «Методических указаний по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений» СПб., 2000 г. и «Методики расчёта гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий» СПб., 2005 г. Разработки автора используются в учебном процессе в МГУП и СПбГПУ.

**Результаты работы внедрены** в проектной практике ООО НПК «ПРОЕКТВОДОСТОЙ», ФГУП «РНЦ «Прикладная химия», АО «Ленгидропроект», АО «СПБ Атомтеплоэлектропроект», АО ГИПРОСПЕЦГАЗ, Муниципальное предприятие – проектный инсти-

тут «Ленгипроинжпроект», ГИПРОНИИ РАН СПб НЦ, ГУ ГНПЦ «Ленводпроект», г. Санкт-Петербурга, ОАО «Мурманскпромпроект» г. Мурманск, АО «Уралтеплоэлектропроект» г. Екатеринбург, ОАО «ПечорНИПИнефть» г. Ухта, ОАО «СургутНИПИнефть» г. Сургут, а также еще в более чем 20 проектно-изыскательских организациях г.г. Белгорода, Владивостока, Мурманска, Омска, С.Петербурга, и др.

Научные разработки и технические решения предложенные и обоснованные автором положены в основу около 30 проектов инженерной защиты природных вод в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях, из которых к настоящему времени 26 проектов получили положительные заключения соответствующих надзорных органов – Роспотребнадзора, Ростехнадзора, Управления государственной вневедомственной экспертизы, и др., 15 построены и введены в эксплуатацию, 5 находится в стадии строительства. Результаты мониторинга, ведущегося на построенных объектах, свидетельствуют о высокой экологической эффективности принятых решений.

**Апробация работы.** Результаты исследований доложены на более чем 50 конференциях, семинарах и совещаниях (международных, всероссийских, отраслевых и др.: Москва, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003; Челябинск, 1996, 1997; Санкт-Петербург, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006; Ташкент, 1997; Мурманск, 1997, 1998; Иркутск, 1997, 2003; Сыктывкар, 1998; 2005, Томск, 1998; Екатеринбург, 1999; КНР, 1999; Яремче, 2000; Петрозаводск, 2000; Севастополь, 2001; Коктебель, 2001; Львов, 2002; Ялта, 2003; Душанбе, 2003; Пятигорск, 2004.

Отдельные результаты работы неоднократно рассматривались на Секции «Основания, грунтовые и подземные сооружения» и на Ученом Совете ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Основные положения диссертации отражены в монографии, научных статьях и изобретении автора объемом свыше 36 п.л., из которых автору принадлежит более 26 п.л.

**На защиту выносятся:**

- процедура анализа безопасности сложной природно-технической системы, рекомендации по оценке риска возникновения опасных ситуаций загрязнения природных вод и выработке управляющих воздействий, обеспечивающих нормативное качество природных вод;
- методика обоснования расчетных гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий;
- результаты комплексных полевых исследований по определению коэффициентов стока для некоторых видов поверхностей, характерных для техногенно-нагруженных территорий;

- методика численного моделирования пространственных фильтрационных потоков в неоднородных областях фильтрации сложной конфигурации со сложным расположением площадных, линейных и точечных зон питания и разгрузки и включающая процедуру оптимизации управляющих воздействий характеристиками фильтрационных потоков;
- вероятностная математическая модель распространения загрязняющих веществ с учетом гидрогеологического режима техногенно-нагруженных территорий;
- основные принципы обоснования технических решений систем инженерной защиты природных вод от загрязнения на техногенно-нагруженных территориях в природно-технических системах.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 352 наименований и 3-х приложений. Основной текст диссертации изложен на 272 страницах, содержит 30 иллюстраций и 30 таблиц.

### **Краткое содержание диссертации**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели исследований, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** охарактеризовано современное состояние проблемы сохранения качества природных вод в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях и дается характеристика проблемы промышленных и бытовых отходов в РФ, с точки зрения их потенциального воздействия на природные воды.

Изучению разнообразных аспектов функционирования сложных природно-технических систем, выражающихся во взаимодействии техногенно-нагруженных территорий и природных вод районов их размещения посвящены труды отечественных и зарубежных авторов, среди которых особое место занимают исследования Алексеевой Т.Е., Арефьева Н.В., Айдарова И.П., Васильева Ю.С., Венцюлиса Л.С., Голованова А.И., Гордиенко С.Г., Даишева Ш.Т., Далькова М.П., Кветной И.А., Кирейчевой Л.В., Корытовой И.В., Ласкина Б.М., Масликова В.И., Пантелеева В.Г., Попова А.Н., Самофалова Д.П., Семина Е.Г., Скорика Ю.И., Сметанина В.И., Соломина И.А., Стефанишина Д.В., Сухарева Ю.И., Тарасова Б.Г., Федорова М.П., Финагенова О.М., Фролова А.Н., Черняева А.М., Штыкова В.И., Шульмана С.Г., и ряд других работ, в которых рассматриваются проблемы генезиса процессов загрязнения поверхностных и подземных вод районов функционирования техногенно-нагруженных территорий, а также рассматриваются методические подходы к обоснованию путей решения проблемы обеспечения безопасности природных вод.

В РФ к настоящему времени сложилась ситуация, при которой поверхностные и подземные воды вовлекаясь в хозяйственную деятельность, подвергаются загрязнению,

засорению и истощению, и качество более трети их не соответствует требованиям государственных стандартов.

Охрана водных объектов от загрязнения осуществляется посредством регулирования деятельности как стационарных, так и других, в т.ч. диффузионных (загрязнение через поверхность земли и воду) источников загрязнения доля которых может составлять 50-80% суммарного загрязнения.

В наибольшей мере источником как сосредоточенного, так и диффузного загрязнения природных вод являются техногенно-нагруженные территории, в частности места размещения отходов, как санкционированные, так и несанкционированные.

Наряду с широко известными, наиболее распространенными видами негативного воздействия на водные объекты, которые с известной долей условности можно отнести к перманентным, в соответствии с Водным Кодексом РФ выделяется аварийное загрязнение водных объектов, которое возникает при залповом сбросе вредных веществ в поверхностные или подземные водные объекты.

Ограничим область рассмотрения инженерной защиты природных вод по водным объектам – поверхностными и подземными водными объектами, а по виду воздействия на природные воды – их загрязнением.

Наиболее радикальным способом борьбы с загрязнением природных вод в сложившихся природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях является рекультивация.

При организации новых мест размещения промышленных и бытовых отходов должно осуществляться рациональное обеспечение условий, препятствующих загрязнению грунтовых и поверхностных вод.

Анализ показал, что для решения этих сложнейших проблем не существует единого, цельного подхода, который бы позволил объединить в одной концепции научно-методические, технические, организационные и административные решения и воздействия, обеспечивающие управление экологической безопасностью природных вод.

Несмотря на обширный круг публикаций, посвященных данной тематике можно выделить ряд вопросов не нашедших должного освещения, к их числу в первую очередь относятся:

- проблема комплексной оценки обстановки с загрязнением природных вод на техногенно-нагруженных территориях в части определения причин и основных путей поступления загрязняющих веществ;



- проблема получения достоверных исходных данных и выполнения соответствующих прогнозов режимов поверхностных и подземных вод, в части влияния на них управляющих воздействий, направленных на обеспечение их качества;
- проблема оптимизации технических решений на основе прогноза и оценки их эффективности, с учетом многообразию взаимодействующих факторов, присущих системам инженерной защиты природных вод в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях.

**Во второй главе** проработан вопрос обоснования управляющих воздействий, направленных на снижение уровня негативного влияния элементов техногенно-нагруженной территории на природные воды с привлечением аппарата анализа безопасности сложных природно-технических систем на техногенно-нагруженных территориях.

Различным аспектам решения проблем обоснования и разработки комплексов мероприятий (по сути управляющих воздействий) для защиты природных вод от загрязнения, основанных на результатах анализа безопасности и оценок риска, посвящены работы таких отечественных и зарубежных авторов как Арефьев Н.В., Фелл, Шульман С.Г., Мирцхулава Ц.Е., Финагенов О.М., Стефанишин Д.В., Добрынин С.Н., Пантелеев В.Г., Кoryтова И.В., Елохин А.Н., Хенли Дж. Э., Кумамото Х., Никитина Н.Я., Бондарева Н.Л., Иващенко И.Н., Маршалл В. и ряд других авторов.

Однако, поскольку задача защиты природных вод в природно-технических системах от загрязнения в этих работах являлась вторичной, и раскрывалась на фоне решения проблем обеспечения безопасности гидротехнических сооружений, некоторые проблемы анализа безопасности природных вод техногенно-нагруженных территорий, как реципиента риска, остаются исследованными недостаточно. В частности не отработана процедура анализа безопасности сложной природно-технической системы, где детально бы рассматривался процесс загрязнения природных вод; не систематизированы основные опасности и процессы, приводящие к загрязнению природных вод в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях; не отработана методика выбора и обоснования по результатам анализа безопасности управляющих воздействий, обеспечивающих приемлемый уровень загрязнения природных вод.

Ввиду специфики рассматриваемых процессов загрязнения природных вод на техногенно-нагруженных территориях и привлечение к детальному изучению элементов этой сложной природно-технической системы аппарата анализа безопасности вводится понятие «опасная ситуация» применительно к загрязнению природных вод.

Суть «опасной ситуации» заключается в создании на объекте условий либо сверхрасчетного перманентного поступления в природные воды загрязняющих веществ в виде

фильтрата; либо единовременного выхода за пределы контура отвала масс отходов в виде технологического селя, обусловленного чрезмерной его обводненностью; либо при возникновении аварийных ситуаций в технологических элементах обращения отходов на объекте, связанных с проливами загрязняющих веществ. Это понятие безусловно перекликается с термином «авария», где авария – опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного и транспортного процесса, а также нанесению ущерба окружающей природной среде.

Учитывая комплексность проблем, подлежащих решению при организации защиты природных вод на техногенно-нагруженной территории, многофакторность причин, порождающих проблему загрязнения вод, явную методологическую связь между термином «авария» и вводимым понятием «опасная ситуация», для разработки комплекса мероприятий по управлению экологической безопасностью системы «объект размещения отходов – природные воды» предлагается использовать аппарат системного *анализа безопасности сложной природно-технической системы (ПТС)*, адаптированного к кругу проблем, связанных с защитой природных вод от загрязнения.

Задача анализа безопасности сложной природно-технической системы «экологически опасный объект – природные воды» в классической постановке сводится к идентификации опасностей, возникающих при строительстве, эксплуатации, рекультивации и консервации техногенного объекта по отношению к природным водам, определение характера и уровня этих опасностей, оценке приемлемости риска реализации возникающих опасностей, и установлению наиболее эффективных управляющих воздействий на объект, с целью уменьшения риска загрязнения природных вод.

Систему «экологически опасный объект – природные воды» следует рассматривать как сложную природно-техническую систему, характеризующуюся дополнительными факторами риска взаимного влияния элементов этой системы, как при нормальном их функционировании, так и при возникновении опасных ситуаций в системе в процессе строительства, эксплуатации, консервации и рекультивации.

Разработана следующая процедура анализа опасностей и риска сложной природно-технической системы:

- определение природно-технической системы и характеристика ее основных элементов;
- декомпозиция системы на характерные подэлементы, участки, блоки и узлы;

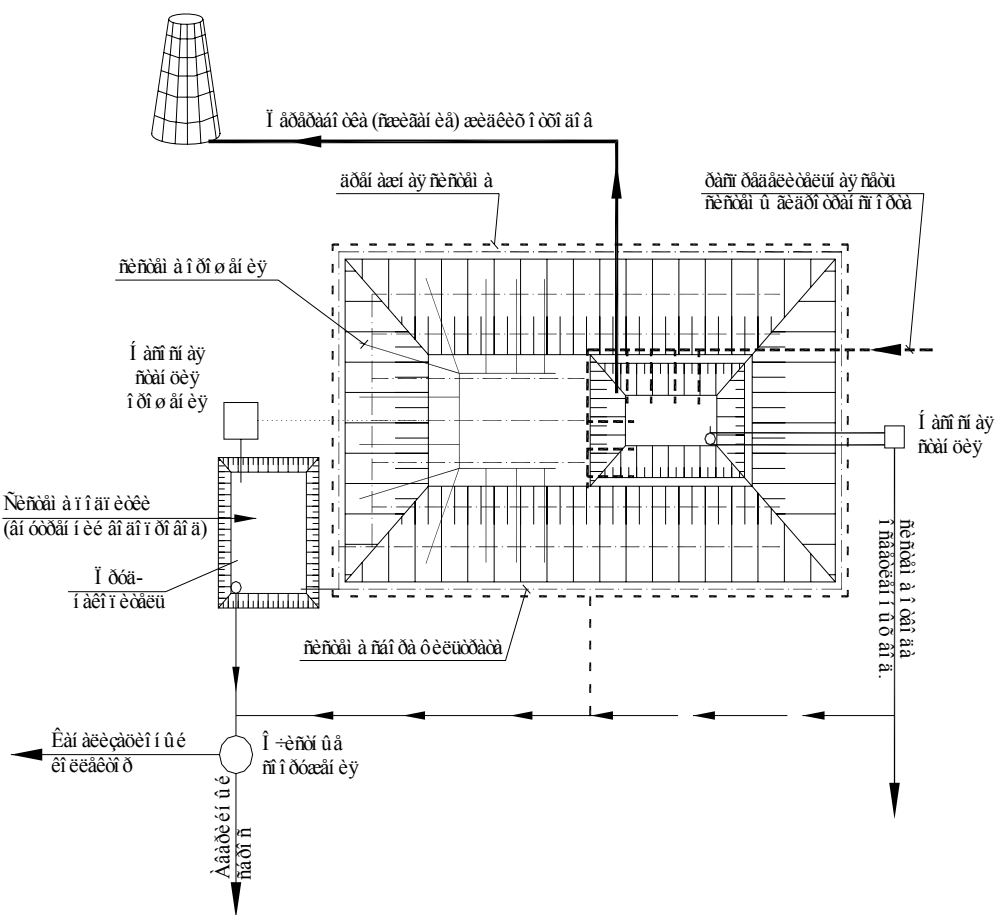
- прогноз характера и уровней дополнительных факторов риска – отрицательных воздействий подэлементов экологически опасного объекта на природные воды территории его размещения, возможных в штатных режимах и при аварии;
- анализ и оценка риска возникновения опасной ситуации на территории размещения объекта обращения с отходами;
- разработка мероприятий по обеспечению безопасности природных вод в условиях размещения на данной территории экологически опасного объекта.

Определение природно-технической системы выполняется путем идентификации ее основных элементов и системообразующих связей между ними, а также пространственных границ системы.

Декомпозиция системы на характерные подэлементы, участки, блоки, узлы выполняется с учетом природных факторов (климата, рельефа, инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрологических условий и др.) территории размещения экологически опасного объекта, компоновки самого объекта, свойств и состояния буферной зоны. Критерий разбиения – однородность свойств подэлементов и характера опасностей, возникающих при сближении потенциально способных к взаимодействию объектов. Декомпозиция системы позволяет обеспечить полноту и детальность анализа безопасности.

Для идентификации опасностей возникновения неблагоприятных ситуаций, влекущих за собой сверхрасчетное перманентное или аварийное загрязнение природных вод территорий и мест размещения отходов, нами предложен подход, аналогичный подходу идентификации опасностей сложных природно-технических систем, с тем отличием, что рассматриваемая сложная ПТС формируется на базе сложившегося ландшафта, инфраструктуры территории и объекта, загрязняющего природные воды. При этом в качестве реципиента риска рассматриваются природные воды – поверхностные и подземные. Контролируемый показатель воздействия на природные воды – изменение показателей качества природных вод в замыкающем (замыкающих) створе и/или точке сброса для поверхностных вод и в контрольных скважинах в водоносных горизонтах по границе землеотвода рассматриваемой территории – для подземных вод.

Так же на основе анализа и обобщения многих параметров нами разработан обобщенный план мест размещения экологически опасного объекта с различными видами обустройства (рис. 1).



**Рис. 1. Обобщенный план территории размещения отходов с различными видами обустройства**

На этом плане показаны основные виды сооружений (насыпные отвалы и намывные накопители отходов – положительные формы рельефа, наливные – отрицательные формы рельефа), а так же основные виды водотранспортирующих сетей, предназначенных для нормальной эксплуатации подобных объектов. Учет этих факторов в разработанной нами обобщенной блок-схеме анализа возникновения и развития опасных ситуаций в природно-технических системах в местах размещения отходов позволяет наиболее полно выполнить прогноз характера и уровней дополнительных факторов риска – отрицательных воздействий подэлементов экологически опасного объекта на природные воды.

Вычисление и оценка риска в общем виде должны включать анализ частоты, анализ последствий, выявленных на этапе идентификации опасных событий, и анализ неопределенностей полученных результатов.

В диссертации рассмотрена задача оценки риска возникновения опасной ситуации, ведущей к загрязнению природных вод.

Определим  $i$  – й риск в системе как произведение вероятности нежелательного события (неисправности, отказа, аварии)  $E_i$  в системе, события, которое связано с опреде-

ленным ущербом либо потерей, и величины этого финансового ущерба (потери)  $D(E_i)$ . Тогда полный (суммарный, обобщенный) риск в системе  $R_E$  в классическом выражении может быть представлен как сумма частных  $i$  – х рисков:

$$R_E = \sum_{i=1}^n P(E_i)D(E_i). \quad (1)$$

Здесь  $P(E_i)$  – вероятность реализации нежелательного события (повреждения, неисправности, аварии, ущерба и пр.)  $E_i$  в системе.

Таким образом, в классической постановке, задача оценки риска возникновения опасной ситуации, ведущей к загрязнению природных вод, рассматриваемого в виде системы, сводится к оценке вероятностей наступления нежелательных  $i$  – х событий в соответствующей системе  $P(E_i)$  и оценке связанных с этими событиями ущербов  $D(E_i)$ .

Пусть событие  $E_i$  является одним из сценариев реализации аварийного события  $A$  в системе (например, одним из сценариев возникновения аварии накопителя, ведущей к загрязнению природных вод). Рассмотрим вероятность  $P(E_i | A)$  – условную вероятность реализации сценария  $E_i$ , при условии, что состоялось событие  $A$  (произошло разрушение накопителя). Если вероятность  $P(E_i | A)$ , а также вероятность события  $A$  известны или же их можно определить, то безусловная вероятность реализации сценария  $E_i$ :

$$P(E_i) = P(A)P(E_i | A), \quad (2)$$

где  $P(A)$  – вероятность возникновения события  $A$ .

Формула (2) позволяет нам решить задачу оценки риска аварии на накопителе, используя при этом классическую модель (1). Решение сводится к оценке обобщенной (полной) вероятности аварии на накопителе  $P(A)$  с учетом различных сценариев ее возникновения и условных вероятностей  $P(E_i | A)$  – вероятностей реализации сценариев  $E_i$ , при условии, что произошло «обобщенное» событие  $A$ . При этом событие  $A$  представляет собой «обобщенную» аварию на накопителе, включающей различные сценарии  $E_i$ .

Рассмотрим теперь способ оценки вероятностей  $P(E_i | A)$  в рамках подхода Байеса.

Сущность подхода Байеса при оценке условных вероятностей заключается в использовании новой информации (после опыта, эксперимента) для уточнения априорных вероятностей, которые имеются в распоряжении исследователя до опыта (эксперимента). Эксперимент (опыт) здесь выступает в роли условия.

Введем понятие условной вероятности аварии накопителя как системы  $P(A | E_i)$  при условии реализации сценария  $E_i$ . Пусть  $P(A | E_i) = P(E_{i,0})$ .

Соответственно, выражение для вероятности  $P(E_i | A)$  может быть записано следующим образом:

$$P(E_i | A) = \frac{P(E_i)P(E_{i,0})}{\sum_{i=1}^n P(E_i)P(E_{i,0})}, \quad (3)$$

где  $P(E_i | A)$  – искомая нами условная вероятность реализации сценария  $E_i$ , при условии, что состоится событие  $A$ .

Таким образом, в результате преобразования априорных вероятностей в зависимости от характера системы, который проявляется через логическое взаимодействие элементов, мы можем оценить условные апостериорные вероятности реализации каждого из сценариев  $E_i$  (при условии, что состоится событие  $A$ ) и перейти к оценке риска по формулам (1) и (2).

Рекомендации по уменьшению риска возникновения опасной ситуации в природно-технической системе разрабатываются на заключительном этапе анализа риска. Автором показано, что учет последовательности реализации возможных годовых ущербов и времени реализации событий, приводящих к аварии на накопителе, приводит к значительному снижению обобщенной вероятности аварии и обобщенного риска.

Разработка конкретных мероприятий по обеспечению безопасности природных вод на территории размещения экологически опасного объекта выполняется согласно выбранным приоритетам и с учетом особенностей основных элементов природно-технической системы – объекта, буферной зоны и природных факторов, присущих данной территории. Цель мероприятий – наиболее эффективное снижение опасностей для природных вод как перманентных, так и залповых (аварийных) от экологически опасного объекта.

**В третьей главе** приводится анализ существующих методов расчета поверхностного стока с естественных и испытывающих влияние хозяйственной деятельности территорий; состояния и проблем современной нормативной базы расчета основных гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий; рассматриваются особенности условий формирования поверхностного стока этих территорий; приводятся результаты натурных исследований автора по определению коэффициентов стока некоторых видов поверхностей, характерных для техногенно-нагруженных территорий, предложена методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий, разработанная на основе обобщения и модификации рассмотренных методов.

При разработке и реализации комплексов мероприятий по инженерно-экологическому обустройству техногенно-нагруженных территорий (водообустройству и управлению качеством стока, обоснованию технических решений по защите природных вод районов их размещения, выбору технологии производства работ и др.) возникает необходимость решения ряда проблем, связанных с получением исходных данных для проведения подобного рода разработок. В первую очередь это сведения:

- о путях, объемах и характере поступления загрязнений в природные воды на техногенно-нагруженной территории и за ее пределами;
- о гидрологических условиях техногенно-нагруженной территории, в том числе об особенностях и генезисе гидрографической сети, расчетных гидрологических характеристиках;
- о специфике водного режима территории места размещения отходов, учитывающей наличие нескольких стокоформирующих комплексов и техногенных факторов, связанных с возможными утечками из водотранспортирующих коммуникаций, перекачками некоторых объемов жидкости, участвующих в водном балансе на рассматриваемой территории, за ее пределы и/или извне;
- о величине и режиме инфильтрационной составляющей поверхностного стока.

Решению этих проблем посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых, к основным из которых можно отнести работы Будыко М.И., Водогрещкого В.Е., Куприянова В.В., Самофалова Д.П., Скакальского Б.Г., Соколовского Д.Л., и др.

Анализ результатов исследований упомянутых и других авторов показывает, что при расчетах поверхностного стока вод с техногенно-нарушенных территорий используются подходы, применимые или для естественных природных ландшафтов, иногда нарушенных вспашкой, или для речных бассейнов с невысокой долей урбанизированных площадей, или для городских территорий (расчет объемов стока, сброшенных в ливневую канализацию) или для различных их комбинаций. При таком подходе не учитываются многие специфические особенности техногенно-нагруженных территорий, оказывающие значительное воздействие на формирование поверхностного стока, что влияет на точность получаемых результатов.

Следует отметить, что существует целая группа поверхностей, характерных именно для техногенно-нагруженных территорий. Из анализа литературных источников следует, что ранее коэффициенты поверхностного стока для некоторых видов поверхностей никогда не определялись. Возникла необходимость получения этих коэффициентов опытным путем, что и было осуществлено в период 1995-1996 гг., когда проводились наблюдения за гидрологическим режимом полигона промышленных токсичных отходов «Крас-

ный Бор» и прилегающей к нему территории. Наблюдения включали измерение стока, осадков, температуры, снежного покрова, оценки увлажненности водосбора и динамики промерзания почвы.

Характеристика водосборов, выделенных на территории полигона «Красный Бор», в замыкающих створах которых производились наблюдения за поверхностным стоком, приведена в табл. 1.

На основании результатов комплексных гидрологических исследований получены численные значения коэффициентов поверхностного стока (табл. 2).

В результате анализа рассмотренных методов и данных натуральных наблюдений за поверхностным стоком на полигоне промышленных токсичных отходов «Красный Бор» разработана методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий (далее - методика).

В методике предпринята попытка на основе обобщения ранее разработанных многочисленных аналитических и эмпирических модифицированных методов расчета гидрологических характеристик естественных ландшафтов и урбанизированных территорий адаптировать их к расчетам гидрологических характеристик сложных композиций стокоформирующих комплексов, свойственных техногенно-нагруженным территориям.

Разработанная методика позволяет, выделив в пределах определенной водосборной площади ряд типовых стокоформирующих комплексов и рассчитав для них гидрологические характеристики, получить обобщенные гидрологические характеристики для каждого заданного расчетного створа, а соответственно, и для конкретной площади и для конкретной территории в пределах выделенных границ (рис. 2).

*Таблица 1*

***Характеристика водосборов, выделенных на территории полигона «Красный Бор», в замыкающих створах которых производились наблюдения за поверхностным стоком***

№ водосбора	Местоположение	Вид подстилающей поверхности	Стокоформирующие комплексы	Площадь, км <sup>2</sup>
1	Участок водосбора кольцевого канала на юго-востоке полигона	Откосы насыпей, отвалов, дамб	Крутые склоны приканальной полосы	0,004
2	Небольшой участок между картами на юге полигона, открытый в сторону кольцевого канала	Грунтовые поверхности (спланированные)	Рекультивируемая часть полигона	0,007
3	Участок в северо-западном углу полигона	Асфальтобетонные покрытия	Территория, занятая зданиями, покрытая асфальтом или бетоном	0,003



**Результаты наблюдений за поверхностным стоком за период  
с октября 1995года по сентябрь 1996 года**

№ водосбора	Осадки, мм	Сток поверхностный, мм	Коэффициент поверхностного стока
1	427,9	155,2	0,36
2	427,9	65,8	0,15
3	427,9	303,8	0,80

Полученные характеристики могут быть использованы в качестве исходных данных как при дальнейших водохозяйственных расчетах, разработке комплексов мероприятий по рациональному водообустройству техногенно-нагруженной территории, разработке комплексной гидролого-гидрогеодинамической модели территории, так и при создании или оптимизации инженерной защиты природных вод в геоэкологической системе от загрязнения.

С 1995 г. методика апробирована на ряде объектов, обладающих всеми чертами техногенно-нагруженных территорий – полигонах промышленных токсичных отходов, площадках размещения радиоактивных отходов, полигонах твердых бытовых отходов, накопителях осадка сточных вод, золошлакоотвалах тепловых электростанций, хвостохранилищах и шламонакопителях, загрязненных токсичными веществами территориях, вовлекаемых во вторичный оборот, промплощадках энергетических объектов, объектов размещения сельскохозяйственных отходов и др

**В четвертой главе** представлена методика расчета характеристик фильтрационных потоков на территориях с системами инженерной защиты.

При постановке задачи фильтрации на техногенно-нагруженных территориях должны быть учтены как их особенности, которые характерны для природных, ненарушенных ландшафтов, так и техногенная составляющая природно-технической системы.

Методика расчета характеристик фильтрационного потока на территориях, подверженных техногенной нагрузке, усовершенствована в рамках данной работы в части комплексного учета специфических факторов присущих техногенно-нагруженным территориям и включает в себя следующие элементы фильтрационных исследований на основе численного моделирования:

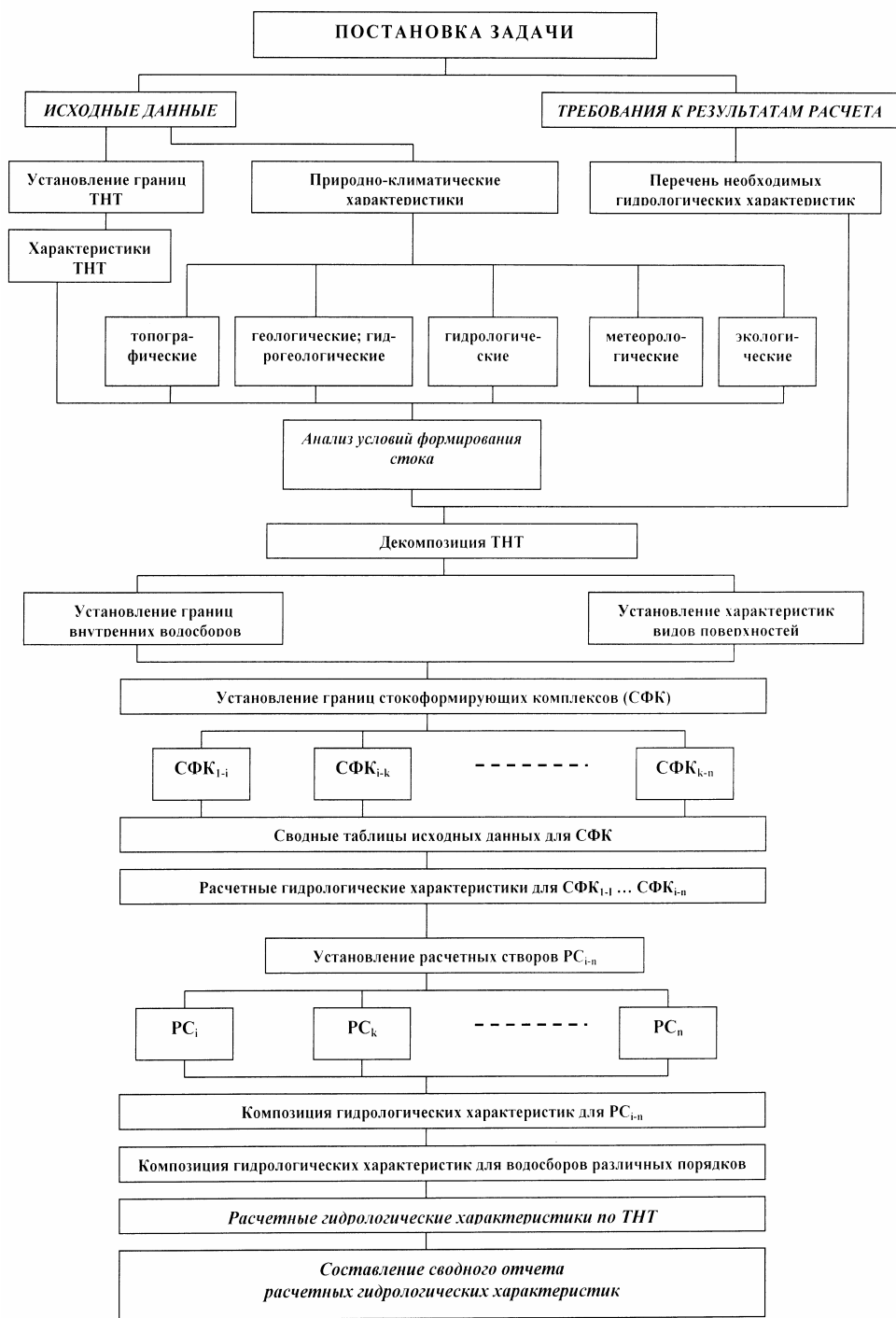
- построение геофильтрационной модели с требованиями к исходным данным и рекомендациями по заданию естественной и техногенной инфильтрации и моделированию дренажных и противофильтрационных устройств;

- планирование численного эксперимента, с рекомендациями по оптимизации объема расчетов, учитывающих наиболее существенные природно-технологические особенности техногенно-нагруженной территории;
- порядок и правила моделирования, гарантирующие устойчивость и сходимости численного метода, а также рекомендуемый перечень результатов расчетов и форм их представления, достаточный для комплексной оценки уровня и направленности возмущений, вносимых в фоновую гидрогеодинамическую обстановку различными конструктивными элементами системы инженерной защиты природных вод при различных водных нагрузках.

Методика реализована в программном комплексе DRENA и успешно используется для решения подобных задач во ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева с 1995 г. При проведении численного моделирования построение геофильтрационной модели, задание начальных и граничных условий, планирование вариантов расчетов и анализ результатов расчетов выполнялось автором лично.

Прогнозирование качества подземных вод возможно путем математического моделирования распространения загрязняющих веществ с учетом гидрогеологического режима рассматриваемой территории.

Миграция вещества, как правило, сопровождается физико-химическими преобразованиями, которые оказывают влияние на интенсивность миграции, а также способны изменять исходный состав раствора. При этом выделяются процессы межфазного взаимодействия и внутрифазные процессы. Процессы межфазного взаимодействия реализуются



**Рис. 2. Блок-схема методики расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий**

на границе раздела жидкости и скелета грунта. К ним относятся сорбция, ионный обмен, выщелачивание. Внутрифазные процессы протекают в объеме поровой жидкости. К ним относятся реакции комплексообразования, деструкции и радиоактивного распада.

Текущее соотношение между концентрацией в растворе  $c$  и на твердой фазе  $c_s$  определяет вид изотермы сорбции. Сорбция из малоconцентрированных растворов обычно подчиняется линейной изотерме Генри:

$$c_s = k_d c, \quad (4)$$

где  $k_d$  - безразмерный коэффициент распределения.

Рассмотрим уравнение массопереноса в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Phi S_w \tilde{D}_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i c) = \frac{\partial}{\partial t} [\Phi S_w c + \rho_s (1 - \Phi) c_s] - q c_u^* + \lambda [\Phi S_w c + \rho_s (1 - \Phi) \cdot c_s] \quad (5)$$

$i, j=1,2,3$

где  $\Phi$  - пористость;  $S_w$  - водонасыщение;  $V_i$  - компоненты вектора скорости;  $\rho_s$  - плотность твердой фазы грунта;  $\tilde{D}_{ij}$  - компоненты тензора гидродинамической дисперсии;  $c_u^*$  - концентрация источника;  $\lambda$  - константа распада.

Концентрация загрязняющего вещества  $c$  является функцией следующих параметров: скорости распространения вещества  $V$ , пористости грунта  $\Phi$ , водонасыщения  $S_w$ , коэффициентов молекулярной диффузии  $D^*$  и гидродинамической дисперсии  $D_v$ . В общем случае эти параметры нельзя считать детерминированными, и поэтому необходимо проводить расчеты с учетом их случайности. Для расчетных целей эмпирические функции распределения этих величин целесообразно аппроксимировать подходящим аналитическим выражением.

Наиболее целесообразно сводить распределения указанных величин к нормальному.

Таким образом, концентрация загрязняющего вещества  $c$  считается нормально распределенной случайной величиной с математическим ожиданием  $E(c)$  и дисперсией  $\sigma^2(c)$ .

Разработки теории надежности конструкций и сооружений основаны на представлении, что под воздействием внешнего случайного возмущения характеристики состояния системы (в рассматриваемом случае - концентрация загрязняющего веще-

ства) изменяются как случайные функции. Предельное состояние представляется в виде случайного выброса из области допустимых состояний.

Трудность заключается в определении совместной плотности вероятности характеристик системы и воздействия. В связи с этим существует ряд приближенных методов, упрощающих процесс вероятностных расчетов. Одним из них является метод прямой линеаризации, который основан на следующих допущениях:

- параметры, характеризующие возмущение, описываются нормальным законом распределения;
- параметры, характеризующие возмущенные факторы, статистически независимы;
- между возмущениями и выходными параметрами существует линейная зависимость.

Считая скорость распространения вещества  $V$ , пористость грунта  $\Phi$ , водонасыщение  $S_w$ , коэффициенты молекулярной диффузии  $D^*$  и гидродинамической дисперсии  $D_v$  нормально распределенными случайными величинами с математическими ожиданиями  $E(V)$ ,  $E(\Phi)$ ,  $E(S_w)$ ,  $E(D^*)$ ,  $E(D_v)$  и дисперсиями  $\sigma^2(V)$ ,  $\sigma^2(\Phi)$ ,  $\sigma^2(S_w)$ ,  $\sigma^2(D^*)$ ,  $\sigma^2(D_v)$ , соответственно, получим выражения для математического ожидания  $E(c)$  и дисперсии  $\sigma^2(c)$  случайной величины  $c$

$$\begin{aligned}
 E(c) &= f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v)); & (6) \\
 \sigma^2(c) &= \left( \frac{\partial f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v))}{\partial E(V)} \right)^2 \sigma^2(V) + \\
 &+ \left( \frac{\partial f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v))}{\partial E(\Phi)} \right)^2 \sigma^2(\Phi) + \\
 &+ \left( \frac{\partial f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v))}{\partial E(S_w)} \right)^2 \sigma^2(S_w) + & (7) \\
 &+ \left( \frac{\partial f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v))}{\partial E(D^*)} \right)^2 \sigma^2(D^*) + \\
 &+ \left( \frac{\partial f(E(V), E(\Phi), E(S_w), E(D^*), E(D_v))}{\partial E(D_v)} \right)^2 \sigma^2(D_v).
 \end{aligned}$$

Вероятность загрязнения (превышения концентрации загрязняющего вещества некоторого допустимого значения  $c^*$ ) определяется через плотность распределения  $p(c)$  случайной величины  $c$

$$P(c > c^*) = \int_{c^*}^{\infty} p(c)dc. \quad (8)$$

Так как в описанном приближении концентрации загрязняющего вещества  $c$  распределена по нормальному закону, то окончательное выражение для вероятности загрязнения будет следующим

$$P(c > c^*) = 1/2 - 1/2 \operatorname{erf} \left( \frac{c^* - E(c)}{\sqrt{2}\sigma(c)} \right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{erf}(\cdot)$  - функция ошибок

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-z^2) dz. \quad (10)$$

В диссертации рассмотрен пример расчета миграции загрязняющего вещества из намывного золошлакоотвала (ЗШО).

Целью расчетов являлась оценка характера и времени распространения загрязняющего вещества (ЗВ) фильтрационным потоком в направлении области разгрузки (близлежащей реки), для чего рассматривалось поперечное сечение ЗШО и основания.

Расчетная схема, принятая в задачах, приведена на рис. 3.

При выполнении расчетов принимались следующие значения фильтрационных и миграционных характеристик ( $\tau$  - коэффициент извилистости фильтрационных ходов,  $D_0$  - коэффициент молекулярной диффузии,  $\alpha_L$  и  $\alpha_T$  - коэффициенты продольной и поперечной диффузии соответственно).

для песка дамб -

$E(\Phi) = 0,265$ ,  $\sigma(\Phi) = 0,040$ ,  $E(k) = 3$  м/сут,  $\sigma(k) = 0,75$  м/сут,  $\tau D_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/сут,  $\alpha_L = 1$  см,  $\alpha_T = 0,1$  см;



Рис. 3. Расчет распространения ЗВ в природно-технической системе. Расчетная схема

для песка основания -

$E(\Phi) = 0,342$ ,  $\sigma(\Phi) = 0,051$ ,  $E(k) = 2$  м/сут,  $\sigma(k) = 0,50$  м/сут,  $\tau D_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/сут,  $\alpha_L = 1$  см,  $\alpha_T = 0,1$  см;

для золы -

$E(\Phi) = 0,60$ ,  $\sigma(\Phi) = 0,09$ ,  $E(k) = 0,1$  м/сут,  $\sigma(k) = 0,025$  м/сут,  $\tau D_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/сут,  $\alpha_L = 10$  см,  $\alpha_T = 1$  см.

Рассматривались два расчетных случая:

а) сорбция не учитывалась ( $k_d = 0$ );

б) сорбция учитывалась ( $k_d \cdot \rho_s = 1$ ).

Результаты вероятностных расчетов времени достижения фронтом переноса ( $c = 0,5$ ) контрольного створа для этого случая представлены на рис.4. Они иллюстрируют изменение вероятности превышения концентрации ЗВ величины 0,5 в контрольном створе в 1000 раз в зависимости от изменения  $k_d$  от 0 до 1.

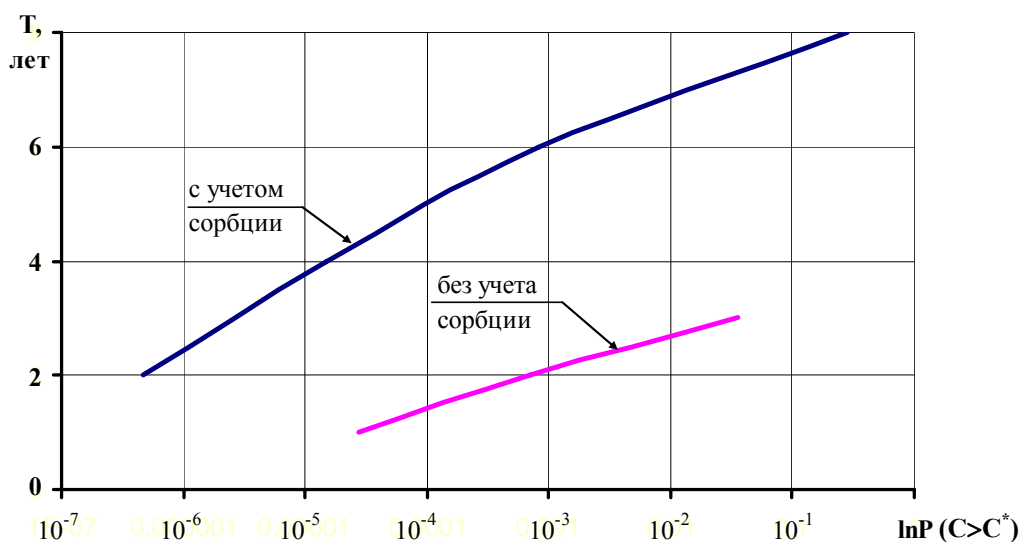


Рис. 4. Результаты вероятностных расчетов времени достижения фронтом переноса ( $c=0,5$ ) контрольного створа

**В пятой главе** приведены основные принципы обоснования технических решений систем инженерной защиты природных вод в природно-технических системах от загрязнения. Разработана процедура анализа опасностей и риска сложной природно-технической системы.

Кроме накопителей (хранилищ) отходов источниками загрязнения природных вод являются техногенно-нагруженные территории.

Для таких территорий можно выделить две проблемы:

первая проблема – комплексное загрязнение (и не только всего объема техногенных отложений и подстилающих грунтов, но и ореола распространения этих загрязнений за пределы рассматриваемой территории);

вторая проблема – низкие прочностные характеристики как техногенных отложений, так и, как правило, верхней части естественного инженерно-геологического разреза.

Локализация загрязненного массива на месте путем организации системы инженерной защиты рассматривается как один из самых комплексных, технически эффективных и экономически целесообразных методов.

Принципы построения инженерной защиты природно-технических систем основаны на создании надежных барьеров и целенаправленных воздействий на оказывающие влияние на загрязненный геотехнический массив элементы окружающей природной среды, предотвращающие их прямой контакт. Таким образом, загрязненный геотехнический массив системой горизонтальных, наклонных и вертикальных защитных противодиффузионных и дренажных экранов заключается в своеобразный «могильник», исключающий возможность поступления веществ (в первую очередь жидкой фазы) как из него в элементы окружающей природной среды, так и в его объем.

Устройство дренажа относится к числу мероприятий, необходимых на подтопленных и потенциально подтопляемых территориях для предотвращения загрязнения природных вод. Предпочтение всегда следует отдавать горизонтальному дренажу как наиболее удобному и экономичному в эксплуатации, требующему достаточно простых технических средств и методов строительства.

Однако проблемой является создание рациональной конструкции системы инженерной защиты, при обосновании которой используются результаты численного моделирования фильтрационных потоков, при анализе которых оценивают эффективность различных схем дренирования, оказывающих влияние на формирование этих потоков.

Нами предложены критерии (в обобщенном виде представленные в табл. 3), которым должна удовлетворять рациональная схема дренирования, и которые также



учитывают технические требования по обеспечению необходимых параметров водного режима осушаемой территории.

Таблица 3

**Критерии выбора рациональной схемы дренирования**

№ п/п	Результаты моделирования	Требования к рациональной дренажной схеме	Общие принципы разработки рациональной схемы дренирования
1	Положение свободной поверхности	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Обеспечение понижения УГВ.</li> <li>- Перехват притока с соседних территорий.</li> <li>- Снятие многолетней неравномерности естественных водных нагрузок</li> <li>- Снятие локальных возмущений.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Систематический дренаж.</li> <li>- Нагорный / внешний кольцевой дренаж.</li> <li>- Локальные дренажи.</li> </ul>
2	Дренажные расходы	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Прием всего возможного стока с дренируемого массива.</li> <li>- Ограничение дренажных расходов предельными значениями.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зонирование дренажных расходов по высоте.</li> <li>- Гидроизоляция локальных источников утечек с помощью противодиффузионных элементов.</li> <li>- Организация системы поверхностного стока.</li> <li>- Организация самотечного отвода воды.</li> <li>- Организация бесполостного отвода воды, многокаскадного перетока в дренаж через фильтрующие пазухи котлованов.</li> </ul>
3	Поле напоров	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Сглаживание сгущений линий равных напоров.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Устройство дополнительных дрен или скважин вдоль линий тока.</li> <li>- Увеличение водоприемных площадей.</li> <li>- Устройство противодиффузионных элементов.</li> </ul>
4	Градиенты напора	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Обеспечение фильтрационной прочности нескальных грунтов.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Соблюдение правила обратного фильтра.</li> <li>- Предотвращение выпора снизу пригрузочным слоем грунта.</li> <li>- Устройство дополнительных разгрузочных скважин.</li> </ul>
5	Время понижения свободной поверхности	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Соблюдение нормативных сроков / обеспечение технологического режима производства работ.</li> <li>- Ограничение скоростей фильтрации по условию возникновения контактной суффозии.</li> <li>- Непревышение предельных допустимых дренажных расходов.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Регламенты водопонижения.</li> <li>- Регулирование скорости водопонижения.</li> </ul>

Для иллюстрации применения предложенных критериев приведен пример оценки эффективности различных схем дренирования основания Ляньюнганской АЭС по результатам комплекса фильтрационных расчетов на основе численного моделирования фильтрации. Цель моделирования – численное решение задачи фильтрации, заключающееся в нахождении напорной функции  $H(x, y, z, t)$ , которая удов-

летворяет граничным условиям и являются на расчетной области решением уравнения фильтрации:

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

где  $H$  – напор,  $k$  – коэффициент фильтрации,  $\eta$  – коэффициент упругости среды.

В данном случае на боковых границах расчетной области задавались граничные условия I рода, на нижней границе – условие неперетекания; на верхней (свободной) поверхности – кинематическое граничное условие:

$$\frac{\mu}{k} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{I}{k}, \quad (12)$$

$\mu$  – коэффициент водоотдачи/насыщения;

$I$  – интенсивность инфильтрации, мм/сут.

Использование предложенных критериев позволило целенаправленно изменять управляющие воздействия, на основе численного моделирования фильтрационных потоков, разработать эффективную схему дренирования площадки энергоблоков Ляньюнганской АЭС. В качестве иллюстрации результатов расчетов на рис 5. приведены зависимости значений суммарных дренажных расходов от различных интенсивностей инфильтрации на свободную поверхность в условиях нестационарной фильтрации.

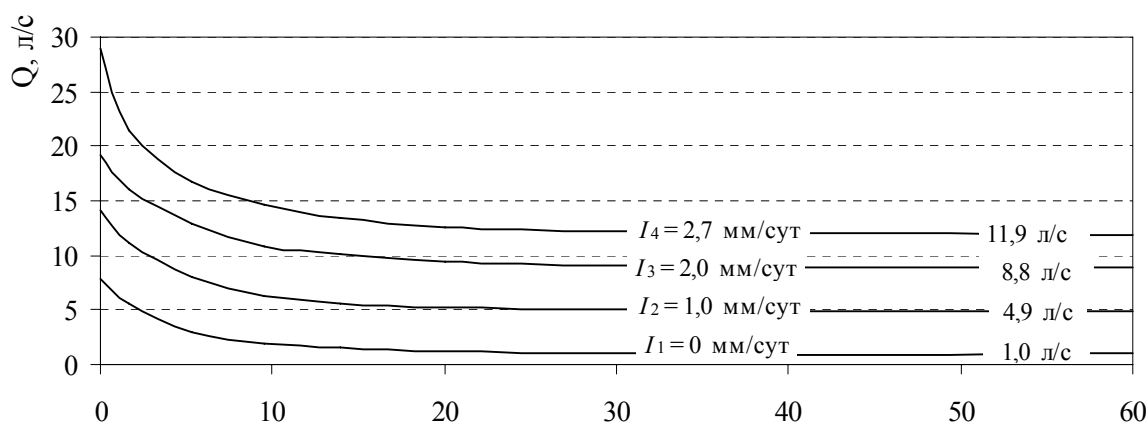


Рис. 5. Зависимость от времени суммарных расходов в дренажи энергоблоков Ляньюнганской АЭС при различных значениях интенсивностях инфильтрации от 0 до 2,7 мм/сут

Оценка состояния систем инженерной защиты представляет собой сложную задачу, ввиду многообразия факторов, определяющих их состояние.

При использовании классической модели риска в виде суммы произведений вероятностей событий и связанных с ними ущербов должно учитываться и то об-

стоятельство, что обобщенный риск в системе зависит от структуры системы и взаимодействия ее системных единиц. Если тот или иной объект моделируется в виде системы, то это обстоятельство непременно следует учитывать при количественной оценке риска. При простом суммировании «частных» рисков, без учета «системных эффектов», может оказаться, что чем больше элементов в системе (в том числе и из-за субъективных представлений исследователя относительно структуры системы), тем бóльшим может быть суммарный риск.

Мониторинг системы инженерной защиты природных вод от загрязнения предназначенный для комплексного контроля всех элементов природно-технической системы включающей конструктивные элементы системы инженерной защиты, массы отходов и природные воды позволяет на ранних стадиях выявить отклонение условий и режимов работы объекта от проектных и своевременно наметить превентивные мероприятия по их подавлению.

Концепция организации мониторинга системы инженерной защиты природных вод от загрязнения как мониторинга «объектов» природно-технической системы, образуемой в районе рекультивируемого места размещения отходов, заключается в организации и эксплуатации такой системы мониторинга, которая направлена на получение достоверных данных для оценки:

- технического состояния конструктивных элементов собственно системы инженерной защиты;
- качества природных вод в районе потенциального неблагоприятного воздействия;
- состояния изолированных отходов;
- состояния показателей окружающей среды, подверженных изменению под влиянием намечаемого (реализованного) воздействия.

Все это в совокупности позволит повысить уровень экологической безопасности природных вод в геоэкологических системах на техногенно-нагруженных территориях.

## Заключение

1. Предложены теоретические основы процедуры анализа безопасности сложной природно-технической системы, позволяющие обосновывать комплекс мероприятий, необходимый и достаточный для обеспечения технической надежности и экологической безопасности природных вод на территориях, подвергающихся перманентному или аварийному загрязнению.
2. Предложены подходы к идентификации опасностей загрязнения природных вод района техногенно-нагруженной территории и методика определения величины риска возникновения опасной ситуации, ведущей к загрязнению природных вод.
3. Впервые в натурных условиях получены коэффициенты стока для некоторых видов поверхностей, характерных для техногенно-нагруженных территорий.
4. Разработана методика обоснования расчетных гидрологических характеристик на техногенно-нагруженной территории.
5. Усовершенствована методика численного моделирования пространственных фильтрационных потоков (в областях фильтрации сложной конфигурации, с кусочно-неоднородными фильтрационными характеристиками) в части задания внешних и внутренних источников питания, применительно к техногенно-нагруженным территориям.
6. Предложен способ оценки величины риска загрязнения природных вод при использовании модели массопереноса. По этому способу выполнены прогнозные вероятностные расчеты распространения ЗВ в дамбах и основании золошлакоотвала с учетом значения параметра сорбции.
7. Даны рекомендации по разработке систем инженерной защиты природных вод районов техногенно-нагруженных территорий, содержащих требования к техническим решениям и характеристику методик, используемых при их обосновании.
8. Впервые разработаны основные положения по оценке состояния и мониторинга системы инженерной защиты, включающей ее конструктивные элементы, массы отходов и природные воды, позволяющие на основе полученных данных выработать управляющие воздействия по обеспечению проектного уровня безопасности природных вод.
9. Разработаны и реализованы строительством конкретные современные системы инженерной защиты природных вод, обладающие высокой технической надежностью и экологической безопасностью.

Задачами дальнейших исследований являются:

- анализ и обобщение эффективности действия систем инженерной защиты природных вод, реализованных строительством, на техногенно-нагруженных территориях;
- дальнейшее совершенствование численных методов решения задач массопереноса на основе вероятностного подхода;
- дальнейшее совершенствование конструкций систем инженерной защиты природных вод при рекультивации техногенно-нагруженных территорий

**Основные положения диссертации освещены в следующих работах:**

1. Сольский С.В., Лоптев С.Л. Рекомендации по определению параметров закрытого дренажа. //ЛОП НТОСХ, 1988, С. 10.
2. Сольский С.В., Ковальчук Н.Н., Прокофьев В.А., Мироновский А.Л. Обоснование параметров дренажа для защиты от подтопления. // Мелиорация и водное хозяйство. Вып. №3, 1993, С. 27-30.
3. Сольский С.В., Гусакова И.Н. Применение численного моделирования для расчета фильтрационных полей в основании энергетических объектов. //Изв. ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. Т.231. Основания, фундаменты, грунтовые и подземные сооружения. Санкт-Петербург, 1996, С. 110-119.
4. Сольский С.В., Пантелеев В.Г., Глебов А.И., Корицова И.В., Готлиф А.А., Алексеева Т.Е., Чугаева Г.А., Фролов А.Н., Гольдина Т.М. Надежность и экологическая безопасность намывных золошлакоотвалов ТЭС. //Гидротехническое строительство №7, 1997, С. 35-41.
5. Сольский С.В., Беллендир Е.Н., Никитина Н.Я., Пантелеев В.Г. Анализ риска и декларирование безопасности золошлакоотвалов. //Безопасность энергетических сооружений. Научно-технический и производственный сборник. Вып.2 – 3 АО НИИЭС. Москва, 1998, С. 312, С. 44-45.
6. Сольский С.В., Гордиенко С.Г., Никитина Н.Я., Самофалов Д.П. Методические основы разработки технических решений по защите природных вод от загрязнения при проектировании, эксплуатации и консервации накопителей и хранилищ жидких, твердых и пастообразных отходов. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Т.235. Санкт-Петербург, 1999, С. 123-128.

7. Сольский С.В., Самофалов Д.П. Обоснование водообустройства и конструкций защиты от загрязнений поверхностных и грунтовых вод рекультивируемого полигона для хранения жидких токсичных промышленных отходов. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Т.235. Санкт-Петербург, 1999, С. 129-137.
8. Беллендир Е.Н., Сольский С.В., Никитина Н.Я. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. //Стандарт предприятия. СТП ВНИИГ. 230.2.001-00. Санкт-Петербург. Изд. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000, С. 87.
9. Сольский С.В., Никитина Н.Я. Николайчук Е.В. Обеспечение экологической безопасности буровых шламов при размещении их во внутрипромысловые дороги и площадки буровых. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000, Т.239, Санкт-Петербург, С. 216 –224.
10. Сольский С.В., Жиленков В.Н., Кветная И.А., Самофалов Д.П. Обеспечение защиты природных вод в районах размещения полигонов твердых бытовых отходов. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000, Т.239, Санкт-Петербург, С. 225 – 236.
11. Сольский С.В., Никитина Н.Я., Бондарева Н.Л. Обеспечение безопасности сложных природно-технических систем, включающих ГТС и опасные производственные объекты. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2001, Т.239, Санкт-Петербург, С. 206 – 212.
12. Сольский С.В., Никитина Н.Я. Николайчук Е.В. Надежность и экологическая безопасность буровых шламов при размещении их в тело внутри промысловых дорог и площадок. //Геотехника. Оценка состояния оснований и сооружений и сооружений. Труды международной конференции, Санкт-Петербург, 2001, С. 376-383.
13. Сольский С.В., Гуляев В.А., Никитина Н.Я., Бондарева Н.Л. Анализ безопасности природно-технической системы «газопровод - грунтовое ГТС». //Нефтяное хозяйство. № 6, 2001, С. 78 –81.
14. Сольский С.В., Самофалов Д.П. Применение воднобалансовых расчетов при обосновании мероприятий по защите природных вод от загрязнения стоком с полигонов твердых бытовых отходов (ТБО).// Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, сб.242, Том 1, 2003, Санкт-Петербург, С. 175-185.

15. Сольский С.В., Гордиенко С.Г., Николайчук Е.В., Орищук Р.Н., Крит П.И. Инженерно-экологическая подготовка территорий под жилую застройку // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, сб.242, Том 1, 2003, Санкт-Петербург, С. 196-201.
16. Сольский С.В., Крупнов О.Р., Белякова С.Н., Гинц А.В. Глава 18. Обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2002, Под ред. Д.А. Голубева, Н.Д. Сорокина, СПб, 2003, С. 468 с иллюстрацией С. 352-358.
17. Сольский С.В. Основные технические решения по ремонту и реконструкции дренажа грунтовых плотин. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т. 243. 2004, С. 193-203.
18. Сольский С.В. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений Санкт-Петербурга. //Гидротехническое строительство, № 4, 2004, С. 30-38.
19. Сольский С.В., Герасимова Е.В., Орлова Н.Л., Казарин А.М. Учет особенностей системы технического водоснабжения при анализе безопасности гидротехнических сооружений (На примере Ангарского электролизного химического комбината). // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т. 243, 2004,С. 209 - 215.
20. Сольский С.В. Региональные программы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений. // Сборник докладов семинара «Обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений Санкт-Петербурга на примере Курортного района», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», СанктПетербург, 2004, С. 59-74.
21. Сольский С.В. Практика разработки региональных программ безопасности гидротехнических сооружений. // Материалы научно-практической конференции «Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений и предотвращение вредного воздействия вод в период прохождения половодий и паводков», Пятигорск, 2005. С. 79-91.
22. Сольский С.В., Орищук Р.Н., Савельева Ю.Ю., Широков Д.А., Просветова Н.Н., Сафин С.З., Белова Н.Г. Оценка состояния и обоснование основных технических решений по реконструкции вертикального дренажа водосливной плотины Камской ГЭС. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т.244, 2005, С. 176-184.
23. Сольский С.В. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений Санкт-Петербурга.// Сборник докладов семинара «Организация безопасной эксплуата-

- ции гидротехнических сооружений водохранилищ», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, 2004, С. 59-74.
24. Сольский С.В. Проблемы расчетов характеристик стока с техногенно-нагруженных территорий. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т. 245, 2005, С. 128-138.
  25. Сольский С.В. Методика расчёта гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. // Стандарт предприятия. - СТП ВНИИГ. 210.01.НТ-05. СПб. Изд. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005, С. 108.
  26. Сольский С.В., Стефанишин Д.А., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов. Санкт-Петербург: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. С. 304.
  27. Сольский С.В., Николайчук Е.В. Практика рекультивации золошлакоотвала ТЭЦ-2 в Санкт-Петербурге. // Материалы международной конференции «Город и геологические опасности» 17-21 апреля 2006 г. Часть 2. СПб. 2006. С. 310 -316.
  28. Сольский С.В. Методы и практика инженерно-экологической подготовки техногенно-нагруженных территорий // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т. 246, 2007, С. 92-106.
  29. Сольский С.В., Жиленков В.Н., Оскотский М.Б., Лопатина М.Г. Заявка № 2002113608 приоритет 24.05.2002 г. «Инвентарная ячеистая перемычка».