На правах рукописи

Пермяков Петр Петрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника
03.00.16 – экология (физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Перм

Томск – 2004

Работа выполнена в Институте физико-технических проблем Севера Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н., профессор Воеводин Анатолий Федорович (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск)

д. ф.-м. н., профессор Матвиенко Олег Викторович (Томский архитектурно строительный университет, г. Томск)

д. ф.-м. н., Тимофеев Айал Михайлович (Якутский государственный университет, г. Якутск)

Ведущая организация –

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «16» декабря 2004 года в «_14_» часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Томском государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «_15_»__ноября____2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последние годы с потеплением климата и техногенным загрязнением гидрогеологической среды решение проблемы тепло- и массообмена криолитозоны стало одним из важных научных направлений современности. Источниками техногенного загрязнения являются:

-промстоки городов и поселков, горнодобывающих и перерабатывающих предприятий (Красноярского края, Магадана, Чукотки, Якутии и т.д.), которые выбрасываются в речную систему или утилизируются в хвостохранилищах и толщах многолетней мерзлоты (включая высокоминерализованные рассолы и выбросы сельскохозяйственных отходов);

-радионуклиды аварийных подземных ядерных взрывов в районах многолетней мерзлоты: «Кристалл» (пос. Удачный, 05.10.74) и «Кратон-3» (пос. Айхал, 24.08.78);

-нефтепродукты (Западно-Сибирской, Енисейско-Анабарской, Лено-Вилюйской, Анадырской нефтегазоносной провинций), которые попадают в мерзлые грунты при освоении и эксплуатации их месторождений, транспортировке, хранении, переработке и паводковом разрушении;

-засоление сельскохозяйственных угодий, их мелиорация.

Просачивание различных техногенно загрязненных растворов в деятельный слой грунта приводит к следующим нежелательным криогенным явлениям:

- появлению надмерзлотных таликов в основаниях сооружений, приводящих к заболачиванию огромных территорий;
- потере несущей способности грунтов оснований;
- миграции минерализованных рассолов, тяжелых металлов, радионуклидов, нефтепродуктов и других опасных веществ в речную систему и повышению вероятности попадания их в организм человека.

Принятие различных оптимальных инженерно-технических решений по управлению тепловыми и массообменными режимами в основаниях инженерных сооружений, меры по борьбе с загрязнением грунтов, обработка натурных данных геокриологических исследований, создание инженерно-геокриологического мониторинга требуют усовершенствования математических моделей с учетом реальных физических процессов и разработки новых программных средств для компьютерного решения задач тепло-, соле- и влагопереноса в многомерной области. Процессы теплосолевлагопереноса (ТСВП) в основном исследованы в аридной зоне без учета промерзания-протаивания порового раствора [С.Ф. Аверьянов, И.П.. Айдаров, Н.Н. Веригин, В.А. Ковда, Е.В. Мироненко, Я.А. Пачепский, T.-C. J. Yeh и др.]. Задачи теплосолевлагопереноса с фазовым переходом порового раствора относятся к классу нелинейных задач с сильноменяющимися коэффициентами и являются одними из главнейших проблем теплофизики. Это связано, прежде всего, с неопределенностью многих параметров в системе, а также несоответствиями допущений при вос-

становлении характеристик и построении математической модели. Традиционный подход с использованием значений характеристик, полученных из экспериментов, часто приводит к неверным результатам [Г.М. Фельдман, Л.В. Чистотинов, B.W. Grange и др.].

В связи с этим стали чрезвычайно *актуальными* вопросы математического моделирования тепломассообменных процессов при техногенном загрязнении мерзлых грунтов. Наиболее перспективным представляется комплексный подход к математическому моделированию с использованием методов решения прямых и обратных задач, базирующийся на современных теоретических и экспериментальных работах.

Целью диссертационной работы, исходя из вышеизложенного, является разработка методологии численного моделирования тепломассообменных процессов в мерзлых грунтах при техногенном загрязнении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка методики параметрической идентификации математических моделей (алгоритмов и программ):

- функции количества незамерзшей воды (порового раствора), определения теплоемкости и теплопроводности промерзающих–протаивающих дисперсных грунтов для различных образцов правильной геометрической формы;
- совместного определения коэффициентов теплопроводности и диффузии влажного дисперсного грунта при фазовом переходе;
- граничных условий теплообмена на поверхности мерзлых неоднородных грунтов.

2. Создание методологии численного моделирования тепломассообменных процессов в многомерной области, основанной на методике решения обратных и прямых задач при различных насыщениях грунта.

3. Моделирование малоизученных процессов техногенного загрязнения (промстоками, нефтепродуктами, радионуклидами) на базе разработанного комплекса программ и численное исследование при различных исходных данных с целью установления особенностей их влияния на тепломассообменные режимы мерзлых грунтов.

На защиту выносятся:

1. Методика идентификации параметров математической модели тепломассообмена (ММ ТМО) с использованием методов решения некорректных задач, включающая следующие алгоритмы:

- идентификации функции количества незамерзшей воды, определения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности при фазовом переходе;
- совместного определения коэффициентов теплопроводности и диффузии при промерзании-протаивании грунтов;
- восстановления граничных условий теплообмена на поверхности неоднородного грунта;

- результаты обработки данных лабораторных и натурных теплофизических исследований.

2. Методика численного исследования процессов тепломассообмена при техногенном загрязнении мерзлого грунта в различном насыщении, базирующаяся на функциональной зависимости восстановленных параметров («естественного метода сглаживания») и методов направленных разностей.

3. Результаты прогноза тепломассообменных процессов при различном техногенном загрязнении грунтов с учетом природно-климатических и мерзлотных условий местности и влияния надмерзлотных и паводковых вод, полученные вышеуказанной методологией:

- теплосолевлажностного взаимодействия двух инженерных сооружений с мерзлым грунтом при периодическом поступлении минерализованных вод;

- тепломассообменного режима с учетом неоднородности грунта территории нефтебазы при различных мерзлотных условиях;

- миграции радионуклидов аварийных подземных ядерных взрывов (АПЯВ) и оценка эффективности заградительных мер.

Научная новизна заключается в разработке методики идентификации параметров модели тепломассообмена с учетом реального процесса промерзания-протаивания порового раствора загрязненных грунтов. Основные результаты работы получены, используя современные методы решения обратных задач, «естественного сглаживания» и направленных разностей.

Работоспособность алгоритмов идентификации недостающих параметров показана на методических примерах с контрольными значениями искомых параметров. Достоверность предложенных математических моделей тепломассообмена проверена на модельных задачах и путем сравнения полученных результатов с данными других авторов и натурных наблюдений.

Теоретическая и практическая значимость. Методика решения обратных задач тепломассообмена предназначена для обработки экспериментальных и натурных данных геокриологических мониторинговых наблюдений. Предложенные математические модели применимы для прогноза, управления и разработки основ защиты территорий криолитозоны от техногенного загрязнения. Математически обоснованы вопросы работоспособности предложенных разностных схем. Решены экологические задачи применительно к сельскому хозяйству и строительству, осуществлен прогноз нефтяного и радиоактивного загрязнений в районах криолитозоны.

Реализация результатов исследования. Материалы и результаты, составившие основу работы, были получены в процессе выполнения научно- исследовательских работ в отделе теплофизики и теплоэнергетики ИФТПС СО РАН с 1975 по 2004 гг. (шифры тем 1.9.1.1 и 2.1.1): “Исследование тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий и криогенных процессов в строительных материалах” (1988-1992), “Исследование тепло- и массообменных процессов в дисперсных средах при промерзании–протаивании и разработ-

ка математических моделей” (1993-1997), “Влияние фазовых переходов воды и водных растворов на прочностные и переносные свойства дисперсных материалов” (1998-2000) и "Трансформация энергии и вещества в дисперсных средах и инженерных сооружениях с фазовыми переходами с учетом техногенных воздействий" (2001-2005).

Практические рекомендации, полученные в работе, нашли применение в различных проектно-изыскательных организациях Республики Саха (Якутии): ЯкутПНИИС (ЯО ВНИИОСП им. Н.М. Герсеванова), Сахапроект (Якутгражданпроект), Якутагропромпроект, Якутгипроводхоз и т.д.

Алгоритмы моделирования тепломассообменных процессов в мерзлых грунтах использовались при проектировании нулевого цикла зданий и сооружений различного строительного принципа и типа фундаментов: домостроительного комбината (1984), зданий микрорайона 202 (1985), с. Октемцы Хангаласского улуса РС(Я) (1989), канализационного коллектора г. Якутска (1997), а также круглогодичной теплицы Института биологии СО РАН (1982) и комбикормового завода с сезонно охлаждающим устройством с. Хаптагай Мегино-Кангаласского улуса РС(Я) (1993).

Результаты математического моделирования использованы при разработке: способа возведения сваи в вечномерзлом грунте (авторское свидетельство № 14927925 от 08.03.89); региональной рекомендации по проектированию оснований фундаментов животноводческих зданий в условиях Якутии (1992); температурного режима многолетней мерзлоты при складировании дренажных вод Удачнинского ГОКа ПНО «Якуталмаз» (1992); рекомендации по устранению загрязнений нефтепродуктами грунтовых вод и реки Лена в нефтебазе г. Ленска (1999), прогноза миграции выноса радионуклидов в речную систему криолитозоны и оценке эффективности заградительных мер (АК «АЛРОСА», 2000; ВНИПИпромтехнологии Минатома РФ, 2000), методики прогнозирования и расчета динамики мерзлых грунтов на трассах ВЛ (Якутагропромпроект, 2002).

Апробация и публикация работы. Основные результаты доложены на следующих совещаниях и конференциях: “Математическое моделирование гидрогеологических процессов (процессы геофильтрации, тепло-, влаго- и солепереноса в почвогрунтах)” (Душанбе, 1988); Международном симпозиуме “Геокриологические исследования в Арктических районах” (Воркута, 1985; Надым, 1989); 2-ой Российской Национальной конференции по Теплообмену (Москва, 1998); V-ой научной конференции “Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф” (Красноярск, 1999); Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, 1992, 2000, 2004); «Экологическая безопасность реки Лена» (мониторинг, природные и техногенные катаклизмы) (Якутск, 2001); «Крайний Север: проблемы и перспективы применения малых АЭС и радиационная безопасность населения» (Якутск, 2001, 2003); Научно-технической конференции, посвященной памяти профессора Н.С. Иванова (Якутск, 1996, 1999, 2001, 2003); V международном

симпозиуме по проблемам инженерного мерзлотоведения (Якутск, 2002); Международной конференции “Проблемы криологии Земли (фундаментальные и прикладные исследования)” (Пущино, 1992, 1997, 1998, 2000, 2001, Тюмень, 2004); Международной конференции по математическому моделированию (Якутск, 1997, 2001, 2004); Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и конструкций для регионов холодного климата (Якутск, 2002, 2004);

Содержание диссертационной работы освещено в 40 научных трудах, в том числе в трех монографиях: “Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах”(1989), “Тепло- и солеперенос в мерзлых ненасыщенных грунтах”(2000) и “Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне” (2003).

Структура и объем работы определены проблематикой и задачами исследования.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, библиографического списка и приложения. Объем её составляет 366 страниц, в том числе 251 страниц текста, 95 иллюстраций, 30 таблиц и списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПРОМЕРЗАЮЩИХ-ПРОТАИВАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ

В настоящее время существует около 30 теорий миграции влаги, которые усовершенствуются и уточняются. Довольно подробно они изложены в специальных обзорных работах Э.Д. Ершова, Г.М. Фельдмана, Н.А. Цытовича, Л.В. Чистотинова и др., где отмечено, что мерзлые дисперсные грунты являются многокомпонентной и многофазной системой. Ключевым моментом при построении математических моделей (ММ) тепломассопереноса в промерзающих и протаивающих грунтах являются: способ локализации области фазового перехода и выбор формы представления уравнения влагопереноса (потенциальная или влажностная). Известны два (структурных) подхода: согласно первому (ММ-1) из них - фазовый переход локализован на поверхности раздела фаз (или при определенной температуре); второму (ММ-2) - фазовое превращение происходит в протяженной области (так называемая модель фазового перехода в спектре температур).

В потенциальной форме записи уравнения влагопереноса требуется функциональная зависимость объемной влажности от капиллярного давления, что трудно восстановить, особенно, в зоне промерзания–протаивания. С другой стороны, влажностная форма математической модели ТСВП-1 учитывает процесс солевлагопереноса только в талой зоне и поэтому невозможно оценить,

сколько воды переходит в лед при промерзании (или, наоборот, при протаивании). Также неизвестно, сколько соли захватывается льдом при промерзании порового раствора грунта [B.W. Crange]. В связи с этим возникает “проблема задания граничного условия” для влаги и соли на подвижном фронте фазового перехода со стороны талой зоны. [Г.М. Фельдман, Л.В. Чистотинов, С.Е. Гречищев, Т.И. Жесткова, B.W. Crange, и др.].

Для решения задач теплосолемассообмена в насыщенных средах В.М. Ентов, А.М. Максимов, Г.Г. Цыпкин [1986] успешно применили второй подход (с зоной промерзания–протаивания). При этом проблема граничных условий первого подхода автоматически снимается, но вместе с тем возникает проблема неопределенности массообменных характеристик в зоне промерзания–протаивания. В связи с этим они с большим удивлением писали: «Почему все это не было детально изучено ранее?». Причиной этого считаем отсутствие методов идентификации параметров модели и соответствующих приборов и установок для экспериментального изучения.

ММ второго подхода можно применить, если восстановлены функции количества незамерзшей воды, а также заданы теплофизические и массообменные характеристики (ТФ и МОХ) грунтов с учетом процесса промерзания–протаивания порового раствора. На практике, используя замеры температур, сравнительно легко восстановить теплофизические характеристики. Теоретические аспекты определения ТФХ дисперсных сред рассмотрены в работах А.В. Лыкова, А.Ф. Чудновского, А.А. Алексашенко, В.В. Власова и др. Для мерзлых грунтов данную проблему развили Н.С. Иванов, Р.И. Гаврильев, Э.Д. Ершов и его ученики, П.И. Филиппов, А.В. Степанов, А.М. Тимофеев и др. В последние годы появился ряд работ с техногенно загрязненными грунтами [Ю.Я. Велли, Э.Д. Ершов и его ученики, Я.А. Кроник, С.Г. Лосева, А.Д. Фокин, М.Г. Харина, А.П. Яркин, В.А. Батурин, А.С. Белицкий, Г.П. Бровка и др.].

Освоение новых районов криолитозоны с нарушением напочвенного покрова и техногенным загрязнением грунта, строительство зданий и сооружений по первому принципу, использование многолетней мерзлоты как могильник (резервуар) для хранения техногенных отходов (жидких, твердых, радиоактивных и т.д.), а также выбор соответствующих теплоизоляционных материалов для управления мерзлым состоянием грунта требуют идентификации граничных условий теплообмена на поверхности. *Идентификация граничных условий* является одной из важных задач теплофизики и инженерной экологии.

Сложно восстановить массообменные характеристики (коэффициенты диффузии, фильтрации, конвективной диффузии соли) промерзающих–протаивающих грунтов в связи с трудностью проведения замеров и малой информативностью экспериментов. Идет взаимосвязанный термодинамический процесс: происходит миграция незамерзшей воды, а часть тепла расходуется на фазовый переход. Также неизвестен процесс промерзания–протаивания порового раствора с техногенной примесью. Традиционные прямые методы определе-

ния характеристик (квазистационарные методы) работают только в талой зоне, и не пригодны в двухфазной зоне из-за нелинейности системы уравнений. Главный недостаток прямых методов идентификации параметров математической модели заключается в том, что в них не используется обратная связь между искомыми коэффициентами u и экспериментальными замерами. Например, температуры $T^э$, т.е. отсутствует управление решениями задачи по невязке [А.Н. Тихонов, Л.А. Коздоба, О.М. Алифанов]. Единственным методом восстановления являются экстремальные методы, которые пригодны для решения нелинейных задач, обладают наглядностью и универсальностью, достаточно легко обобщаются на различных типах обратных задач тепломассообмена [О.М. Алифанов]. В соответствии с этим возникает необходимость идентификации ТФ и МОХ с учетом промерзания и протаивания.

Основные требования при математическом моделировании заключаются в обеспечении корректности модели [А.А. Самарский, А.П. Михайлов, И.П. Айдаров, О.М. Алифанов, С.Е. Гречищев и др.], т.е. адекватности, общности и точности и простоте решения практических задач. В данном случае система уравнений состоит из трех нелинейных уравнений, которые получены с учетом закона сохранения энергии, массы воды и примеси. На практике адекватность модели проверяется раздельно для каждого уравнения. Отсюда следует, что нужно проводить сравнения численных решений совместных уравнений с натурными замерами и приступить к разработке экономичных алгоритмов для компьютерного решения.

Процесс техногенного загрязнения в реальных условиях происходит при различных тепловлажностных режимах. При сезонном промерзании–протаивании грунта меняется направление скорости фильтрации (миграции), поэтому численные расчеты следует провести с учетом знака скорости миграции и фазового перехода порового раствора, т.е. с направленными разностями. Разностные методы с направленными разностями широко применяются в решении различных задач гидродинамики [А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич, В.М. Головизнин, С.С. Маханов, А.Ю. Семенов и др.]. В связи с этим возникает необходимость разработки методов решения прямых задач с фазовым переходом порового раствора с учетом скорости миграции (фильтрации).

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В данном разделе приводятся численные алгоритмы для определения ТФХ (удельной теплоемкости, теплопроводности и параметров функции незамерзшей воды) промерзающих и протаивающих дисперсных сред с учетом требований параметрической идентификации. Рассматривается процесс протаивания мерзлого влажностного образца в измерительном сосуде в виде пластины ($\nu = 0$) или цилиндра ($\nu = 1$). Как известно, процесс протаивания (промерзания) влажной мерзлой (талой) дисперсной среды сопровождается переносом влаги,

которая приводит к существенным изменениям ТФХ. При проведении эксперимента должны быть соблюдены условия, исключающие влагоперенос [А.Ф. Чудновский] и гарантирующие единственность решения обратной задачи теплопроводности Н.В. Музылева [1983].

Требуется восстановить параметры $(c_м, c_T, \lambda_м, \lambda_T, W_{нв}(T))^T = (u_1, u_2, \text{К}, u_{m_0})^T = u$ по известным замерам температуры $T_i^э = T^э(r_i, \tau)$ в точках r_i по времени τ $\left(i = \overline{1, n_T}\right)$.

Данную задачу сформулируем в виде задачи оптимального управления. В качестве оптимальности выберем целевой функционал среднеквадратического отклонения замеренных температур от расчетных значений:

$$J(u) = \sum_{i=1}^{n_T} \int_0^{\tau_m} p_i \left(T_i(u) - T_i^э\right)^2 d\tau = \left\| T - T^э \right\|_G, \quad u \in U \subset R^{m_0}, \tag{1}$$

где p_i – весовые множители; $T_i(u)$, $T_i^э$ - расчетные и замеренные температуры; n_T - число замеров по длине или радиусу образца.

<u>Алгоритмы для определения ТФХ и параметров функции количества незамерзшей воды</u>. Поиск минимума целевого функционала (1) осуществляется с помощью итерационного градиентного метода. Нами рассмотрены четыре вида итерационных алгоритмов [Ф.П. Васильев, О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин]: метод проекции градиента (I), скорейшего спуска (II), сопряженных градиентов (III) и модифицированный метод скорейшего спуска (IV). Отличие модифицированного метода скорейшего спуска от остальных состоит в том, что по каждому направлению находится собственный шаг β_s^i. Итерационная последовательность строится аналогичным образом (III), но вектор $\beta_s = (\beta_s^1, \beta_s^2)$ определяется из решения системы линейных алгебраических уравнений [П.П. Пермяков, 1989]:

$$\sum_{j=1}^{m_0=2} \beta_s^j J'\left(u^s\right)_j \left(Af_i, Af_j\right)_G = \left(A_i(u^s) - T^э, Af_i\right)_G, \qquad i = 1,\ 2\ , \tag{2}$$

которая получается из условия минимума целевого функционала (1). Где $(\Delta c, \Delta\lambda) = \Delta u \quad - \quad const$, Af_i - возмущение температуры, которое находится из решения соответствующей краевой задачи возмущения.

Разработаны алгоритмы совместного определения удельной теплоемкости и теплопроводности дисперсных грунтов при различных значениях параметра ν (0 – пластина; 1 – цилиндр).

Работоспособность предложенных алгоритмов проверена на тестовых задачах.На рис. 1 представлена сходимость итерационного процесса на модельной задаче при точных и возмущенных входных данных.

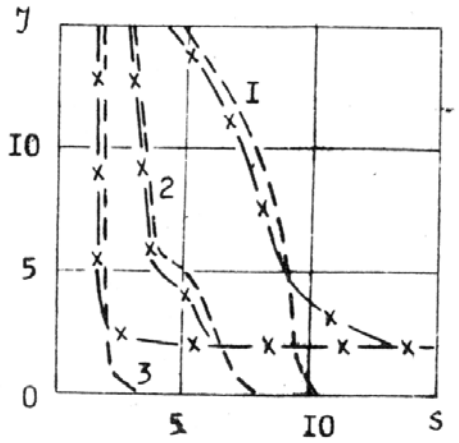

Рис. 1 Сходимости итерационных последовательностей:
— — — - на точных данных;
—x— - на возмущенных данных;
1, 2, 3 - по II, III, IV методам

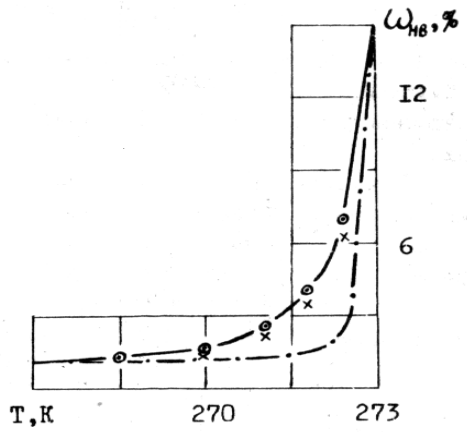

Рис. 2. Восстановление функции незамерзшей воды при различных возмущениях входной информации: ——— - точное значение;
° - по нормальному закону ($\delta_i = 1^0$K);
• - по равномерному закону ($\delta_i = 1^0$K);
x - ± 0,05 % от текущего значения $T_i^Э$;
— · — - начальное приближение

Погрешности трех алгоритмов совместного определения удельной теплоемкости (c) и теплопроводности (λ) почти одинаковы и составляют 2-5 % для определения c; 1-4 % - λ. Из рисунка видно, что высокую скорость сходимости по сравнению с другими методами имеет модифицированный метод скорейшего спуска (IV). Численный эксперимент произведен с соблюдением критериев выбора шагов дискретизации по пространственной переменной и времени.

Квазистационарные методы для определения функции количества незамерзшей воды [З.А. Нерсесова, Н.С. Иванов, Р.И. Гаврильев, А.В. Степанов, С.С. Ефимов], используемые на практике, не обладают вычислительной устойчивостью. Поэтому разработаны алгоритмы (программы) восстановления данной функции, которые обладают высокой точностью по сравнению с прямыми методами, благодаря управлению по невязке. Достоверность алгоритмов проверена на модельной задаче. Проведена серия расчетов с целью проверки эффективности алгоритма при трех видах возмущений в замеренных значениях температур (рис.2). Характер возмущений не оказывает существенного влияния на качество восстановления функции незамерзшей воды и достаточно хорошо согласуется с другими квазистационарными методами (рис.3).

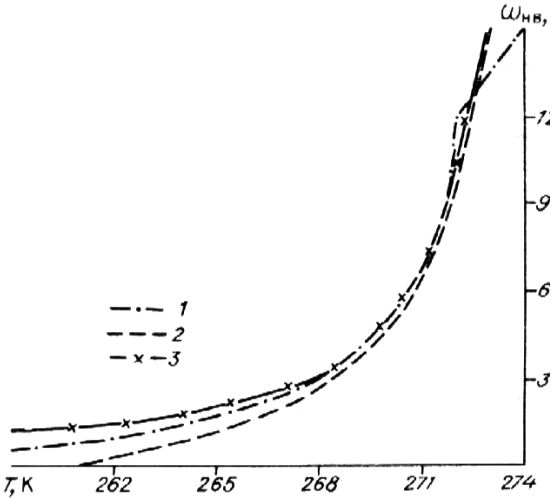

Рис. 3.Сравнение результатов восстановления функции количества незмерзшей воды, полученные численным (1) и квазистационарным (2, 3) методами

В результате обработки данных теплофизических исследований по засоленным грунтам нами восстановлены функции количества незамерзшей воды от температуры, засоленности и порового давления рис. 4,5.

С повышением засоленности содержание незамерзшей воды увеличивается. Обычно для численного решения задачи теплосолевлагопереноса пользуются приближенной линейной аппроксимацией функции количества незамерзшей воды, которая дает большое расхождение, особенно в диапазоне естественных температур многолетней мерзлоты.

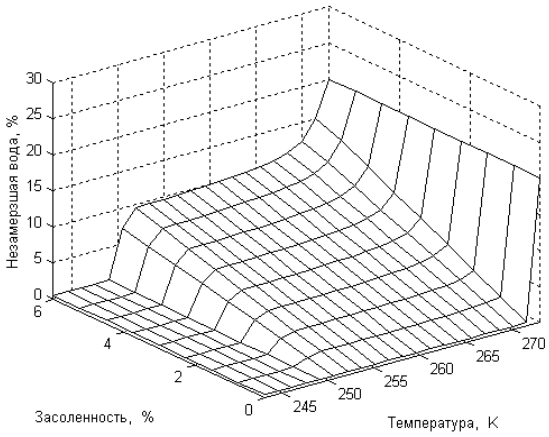

Рис. 4. Зависимость функции количества незамерзшей воды от температуры и засоленности

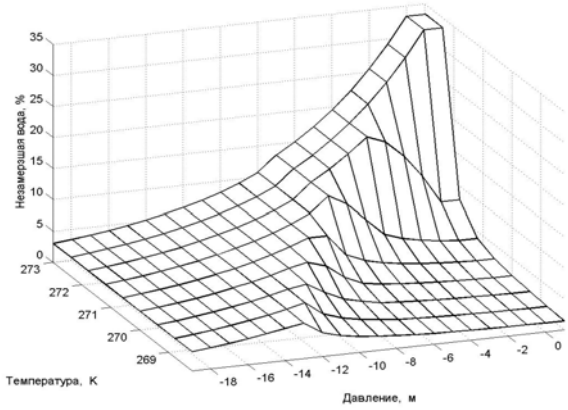

Рис. 5. Зависимость функции количества незамерзшей воды от температуры и давления при S = 0,4 %

3. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрим алгоритм решения коэффициентной обратной задачи тепломассообмена в промерзающих–протаивающих дисперсных грунтах. Трудности при решении коэффициентной обратной задачи ТМО с фазовыми переходами связаны с тем, что в промерзающих-протаивающих дисперсных средах происходит сложный взаимосвязанный термодинамический процесс: идет миграция

незамерзшей воды (порового раствора) в более холодную часть образца, а часть тепла расходуется на фазовый переход воды в лёд (или наоборот). При этом взаимосвязанность и нелинейность уравнений усиливаются, а коэффициент диффузии (фильтрации) определяют только в талой зоне [В.Д. Ермоленко, А.В. Лыков, В.Б. Георгиевский, А.А. Алексашенко, В.В. Власов, Э.Д. Ершов и др.]. Нами для решения данной задачи выбраны универсальные экстремальные методы, которые учитывают весь спектр температурного диапазона.

Требуется найти распределения температуры $T(x,\tau)$, суммарной влажности $W(x, \tau)$, воды $W_в(x, \tau)$, льда $W_л (x, \tau)$, параметры a_i (i = 1,2,3,4) коэффициентов теплопроводности. Также необходимо восстановить параметры функции $k_м(T,W_л)$, которые входят в коэффициенты диффузии $k(T,W_в,W_л)$. Эксперимент нужно провести с учетом монотонности температуры по пространству и времени, что гарантирует выполнение теоремы единственности решения коэффициентной обратной задачи влагопереноса.

Искомые параметры $u=(a_1,a_2,a_3,a_4,k_м(W_л))^T$ можно рассмотреть как m_o – мерный вектор, который определяется из минимизации среднеквадратичной невязки:

$$\inf_{u\in R^{m_0}} J(u) = \inf_{u\in R^{m_0}} \left(J_1(u)+J_2(u)\right), \tag{6}$$

где

$$J_1(u)=\sum_{i=1}^{n_T}\int_0^{\tau_m} p_i(\tau)(T_i(u,\tau)-T_i^э(\tau))^2\,d\tau, \qquad J_2(u)=\sum_{j=1}^{n_W}\int_0^{L} p_j(x)(W_j(u,x)-W_j^э(x))^2\,dx,$$

Здесь $T_i^э(\tau)$ – замеры температуры по времени в i –й точке образца; $W_j^э(x)$ – замеры суммарной влажности по длине образца в j – й момент времени; $n_т$ – число датчиков для замера температуры по длине образца; n_w – число замеров суммарной влажности по времени; $p_i(\tau)$, $p_j(x)$ – весовые множители соответственно с размерностями $К^{-2}с^{-1}$, $(\%)^{-2}м^{-1}$; $T(u,\tau), W(u,\tau)$ – расчетные значения температуры и влажности.

Использование различных данных о температуре и влажности не обусловлено существом задачи, а связано с практической трудностью проведения замеров суммарной влажности, непрерывных по времени.

Нами рассмотрены два способа параметризации искомой функции. В первом случае она аппроксимируется показательной функцией $\exp(-k_3W_л)$ (таблица), где точное решение искомого параметра $u=(a_1,a_3,k_3)^T=(0,5;0,7;0,23)^T$. Во втором — ищется в виде линейной комбинации B-сплайнов (рис.6).

Поиск минимума среднеквадратичной невязки осуществлен модифицированным методом скорейшего спуска и сопряженных градиентов. Как видно из таблицы, точность восстановления не зависит от способа задания начальных

значений искомых параметров. Возмущения в $T_i^э$ и $W_j^э$ не сильно влияют на точность восстановления искомых параметров.

Более предпочтительным с точки зрения практического проведения экспериментальной работы является первый способ аппроксимации, так как для него достаточно иметь один замер суммарной влажности по длине образца в конце эксперимента. Распределение влажности обычно снимается в конце эксперимента $\tau = \tau_m$ весовым способом (разбирая образец с исследуемым дисперсным грунтом).

Таблица

Восстановление параметров коэффициентов теплопроводности и диффузии

номер итерации s	Без возмущений			
	a_1	a_3	k_3	J
0	0,0300	0,0400	0,1300	0,5587
2	0,0379	0,0682	0,1472	0,1180
3	0,0399	0,0762	0,1738	0,0692
5	0,0439	0,0782	0,1764	0,0288
7	0,0461	0,0782	0,1939	0,0261
	С возмущениями			
0	0,1000	0,1000	0,3000	1,0362
2	0,0736	0,0738	0,1554	0,6740
3	0,0648	0,0719	0,2026	0,6264
5	0,0560	0,0648	0,1866	0,4666
7	0,0499	0,0676	0,1739	0,4463

4. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА

Для восстановления граничных условий нужны дополнительные замеры температуры внутри исследуемого образца. С учетом этого, данную задачу сформулируем как задачу оптимального управления – найти функцию $u(\tau)$ из минимума целевого функционала:

$$J(u) = \sum_{i=1}^{n_T} \int_0^{\tau_m} p_i(\tau)\left(T(r_i\ ,\tau) - T^э(r_i\ ,\tau)\right)^2 d\tau + \int_0^{\tau_m} p(\tau)\left(T(\xi^э(\tau)) - T_ф(\xi^э)\right)^2 d\tau\ ,\ R_{\beta-1} \le \xi^э(\tau) \le R_\beta\ , \qquad (7)$$

где $p_i(\tau)$, $p(\tau)$ – весовые множители с размерностью $К^{-2}\cdot с^{-1}$; $T(r_i,\tau), T^э(r_i,\tau)$ - расчетные и замеренные температуры в i-й точке горного массива; $T(\xi^э(\tau)), T_ф(\xi^э(\tau))$ -соответственно расчетные и заданные температуры на фронте

фазового перехода $\xi^э(\tau)$, $\xi^э(\tau) = \sup\limits_{\tau\in[0,\tau_m]}(T(u,\tau))$; R_β - координаты слоев массива $(\beta = \overline{0,n})$, м.

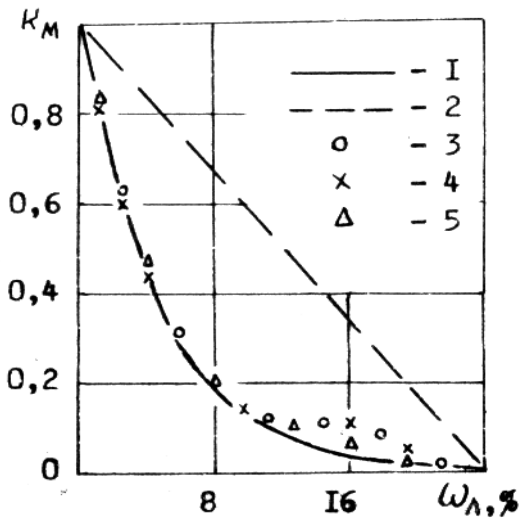

Рис. 6. Восстановление функции $k_м(W_л)$:
1 - точное решение; 2- начальное приближение;
3, 4 - решение обратной задачи на точных и возмущенных данных ($n_w = 4$);
5 - $n_w = 2$ ($\tau_m = 2{,}6$ ч; $\tau_m = 5$ ч)

Разработаны алгоритмы решения граничных обратных задач теплопроводности с фазовым переходом и учетом неоднородности грунта. Решение задачи выполнено для параметризации искомой функции с помощью В-сплайна. Осуществлена проверка работоспособности предложенных алгоритмов на методическом примере с точным решением. Расчеты показывают, что возмущение входной информации существенно не влияет на качество восстановления искомой функции, а увеличение числа замеров повышает скорость сходимости итерационных процессов и устойчивость алгоритма.

С помощью предложенной методики идентификации недостающих параметров установлены температурные зависимости теплофизических характеристик горных пород Куранахского и Мало-Ботуобинского месторождений, некоторых грунтов пойменных почв рек Амги и Лены. Определены параметры функции количества незамерзшей воды грунтов при различном техногенном загрязнении. Проведено восстановление плотности теплового потока на поверхности грунта при различном техногенном нарушении почвенно-растительного покрова (рис. 7), используя многолетние круглогодичные данные наблюдения [А.В. Павлов, М.К. Гаврилова]. Нами рассмотрены три ключевых участка: открытая местность с нарушениями растительного и напочвенного покровов, сосновый и лиственничный леса. Полученные результаты были использованы при прогнозировании тепловлажностного режима оснований линий электропередач в районах Центральной Якутии.

В целом, все предложенные алгоритмы идентификации параметров модели (функции количества незамерзшей воды, удельной теплоемкости и теплопроводности, коэффициента диффузии, граничных условий теплообмена) обладают хорошим регуляризирующим свойством при оптимальном выборе шагов дискретизации по времени и пространству и применимы для компьютерной обработки данных теплофизических и массообменных экспериментальных и натурных исследований.

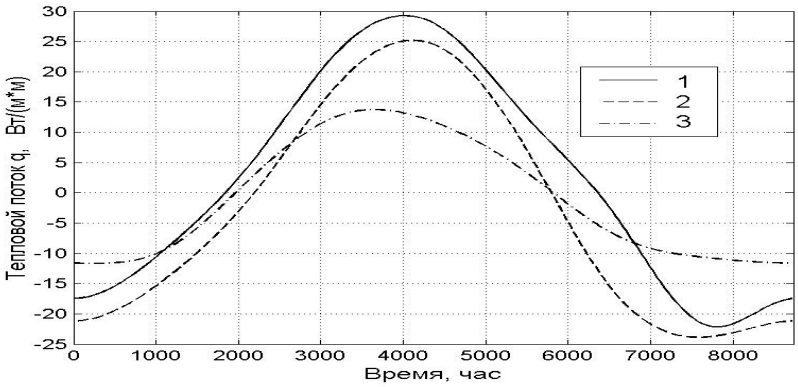

Рис. 7. Зависимость теплового потока от времени:
1 - открытый участок с нарушениями растительного и напочвенного покровов;
2 - сосновый лес; 3 - лиственничный лес

5. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Совместный тепломассоперенос при техногенном загрязнении деятельного слоя описывается системой трех уравнений с учетом сорбции в почвенно-поглащающем комплексе [В.М. Ентов, Г.Г. Цыпкин, Р.И. Нигматулин, П.П. Пермяков, В.И. Сабинин, J.L. Nieber и др.]:

$$c\frac{\partial T}{\partial \tau} = div(\lambda\, grad T) - (c_в V, grad T) + L\frac{\partial \theta_л}{\partial \tau}, \tag{8}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \theta_в}{\partial \tau} = div(k_ф\, grad\, H) - \dfrac{\partial \theta_л}{\partial \tau}, & (9) \\ \quad или & \\ \dfrac{\partial W_в}{\partial \tau} = div(k\, grad\, W_в) - \dfrac{\partial W_л}{\partial \tau} & (9^*) \end{cases}$$

$$\frac{\partial (W_в C_в)}{\partial \tau} = div(D\ grad\, C_в - VC_в) - \frac{\partial W_л C_л}{\partial \tau} - \frac{\partial N}{\partial \tau} \tag{10}$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \beta\left(C - \frac{N}{k_d}\right), \qquad 0 < z < H, \qquad \tau_m \geq \tau > 0 \tag{11}$$

Система уравнений замыкается равновесным уравнением количества незамерзшей воды и условием промерзания порового раствора:

$$W_в = W_{нв} = W_{нв}(T, W, C), \qquad C_л = k_{зх} C_в \quad . \tag{12}$$

где c, $c_в$ - объемная теплоемкость грунта и воды, Дж/(м^3·К); T - температура, К; λ - теплопроводность, Вт/(м·К); τ - время, с; L - объемная теплота фазового перехода, Дж/м^3; W - весовая влажность, %; θ – объемная влажность, %; $H = P - z$ – напор, м; P - всасывающее давление влаги,м; z - вертикальная ось, направленная вниз; k - коэффициент диффузии, м^2/с; $k_ф$ - коэффициент фильтрации, м/с; D - коэффициент конвективной диффузии примеси, м^2/с; V = (V_r, V_z) - скорость фильтрации, м/с; $C_в$, $C_л$ - концентрация примеси в воде и льду, %; N - концентрация примеси в твердой фазе, %; β - коэффициент скорости обмена, 1/с; k_d – коэффициент распределения вещества; $k_{зх}$ – межфазовый коэффициент распределения (захвата).

Уравнение (9) – потенциальная, (9*) – влажностная формы уравнения влагопереноса. Уравнение Ричардса (9) известно как уравнение ненасыщенно-насыщенной фильтрации в дисперсных грунтах с помощью единой математической модели.

Деятельный слой подвергается циклическому гидротермическому воздействию, при этом в зависимости от процесса промерзания-протаивания порового раствора меняется направление скорости инфильтрации, с учетом которой представлены численные методы с направленными разностями. Все теплофизические и массообменные характеристики модели при фазовом переходе сглаживаются через функции незамерзшей воды, что намного упрощает процесс численной реализации.

Решение системы нелинейных уравнений автор осуществил следующими конечно-разностными методами.

1. **Метод направленных разностей** (влажностная форма).

Для простоты изложения рассмотрим одномерные математические модели и систему уравнений аппроксимируем разностной схемой:

$$c_{эф} T_{\bar{\tau}} + D_1 T + c_B C_1 T = \varphi_1, \tag{13}$$

$$W_{\bar{\tau}} + D_2 W = \varphi_2, \tag{14}$$

$$S_{\bar{\tau}} + D_3 S + C_2 S = \varphi_3 \tag{15}$$

где $C_1 T = (V^- T_z + V^+ T_{\bar{z}})$, $C_2 S = ((V^- \eta_2 S)_z + (V^+ \eta_2 S)_{\bar{z}})$,

$$D_2 W = -\left(k(\eta_1 W)_{\bar{z}}\right)_{\hat{z}}, \quad D_3 S = -\left(D(\eta_2 S)_{\bar{z}}\right)_{\hat{z}}, \quad S = (W_в C_в + W_л C_л)/100, \quad W = W_л + W_в,$$

$$\theta = \theta_л + \theta_в, \quad V = V^+ + V^-, \quad i = i(T) = W_л / W, \quad C_в = \eta_2 S, \tag{16}$$

$$\eta_1 = \eta_1(T) = 1 - i(T) > 0, \quad \eta_2 = \eta_2(T) = 100/\left(k_{зх} W_л + W_в(T)\right),$$

η_1, η_2 - доли влажности и примеси, которые участвуют в процессе переноса. Здесь $D_1, D_2, D_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - соответствующие разностные аппроксимации.

При этом следует отметить, что разностные операторы D_2, D_3 имеют диагональное преобладание по столбцам, а операторы C_1, C_2 построены с учетом знака скорости фильтрации.

2. **Метод линеаризации.** Для численного решения уравнения влагопереноса в потенциальной форме (9) в левой части воспользовались методом линеаризации Ньютона. Разностный аналог имеет вид:

$$\overset{s}{\mu}\frac{\overset{s+1}{P_i}-\overset{s}{P_i}}{\tau}+\frac{\overset{s}{\theta_i}-\overset{\vee}{\theta_i}}{\tau}=\left(k_\phi(\overset{s}{1}-i)\overset{s+1}{P}_{\bar{z}}\right)_{\hat{z}}-\left(\overset{s}{k_\phi}\right)_{\hat{z}}, \qquad (17)$$

где s – номер итерации; $\mu = \partial\theta_в / \partial P$ - функция водоудерживания.

Численная реализация трехдиагональной матрицы проводится методом прогонки.

3. **Метод с двусторонним ограничением решения**. В реальных условиях влажность мерзлого грунта меняется в пределах от прочносвязанной влажности (максимальная гигроскопическая влажность) $W_{пс} = W_1$ до полного насыщения $W_п = W_2$ (полная влагоемкость). Особенность предлагаемого численного метода – строгое выполнение для решения $W(x,\tau)$ неравенства $W_1 \le W(x,\tau) \le W_2$ при любых режимах фильтрационных течений. Для решения уравнения во влажностной форме (9*), основываясь на идеи работы А.Ю. Семенова, предложен следующий метод.

Численная реализация состоит из трех этапов:

$$(\varsigma_i^{s+1}-\overset{\vee}{\varsigma}_i)/\tau+D_4^s(\overset{s+1}{\varsigma})-C_3^s(\overset{s+1}{\varsigma})=\varphi_4^s, \qquad i=\overline{0,N}, \qquad (18)$$

$$(\eta_i^{s+1}-\overset{\vee}{\eta}_i)/\tau+D_5^s(\overset{s+1}{\eta})+C_4^s(\overset{s+1}{\eta})=\varphi_5^s, \qquad i=\overline{0,N}, \qquad (19)$$

$$\overset{s+1}{W}(z,\tau)=W_1+(W_2-W_1)\overset{s+1}{\varsigma}(z,\tau)/(\overset{s+1}{\varsigma}(z,\tau)+\overset{s+1}{\eta}(z,\tau)), \qquad (20)$$

где $\varsigma = W - W_1$, $\eta = W_2 - W$, s - номер итерации, знак «$\vee$» означает нижний слой по времени, D_4, D_5, C_3, C_4, φ_4, φ_5 – соответствующие разностные аппроксимации.

Разностные операторы D_5, C_4 - во внутренних узлах сетки представим в виде:

$$D_5\eta = -[k_{i+\alpha}((\eta_1\eta)_{i+1} - (\eta_1\eta)_i)/h_i^+ - k_{i-1+\beta}((\eta_1\eta)_i - (\eta_1\eta)_{i-1})/h_i^-]/\eta_i, \qquad i = \overline{1, N-1},$$

$$C_4\eta = [b_{i+\alpha}((\eta_1\eta)_{i+1} - (\eta_1\eta)_i) + b_{i-1+\beta}((\eta_1\eta)_i - (\eta_1\eta)_{i-1})]/2\eta_i, \qquad i = \overline{1, N-1},$$

$$\alpha = \alpha(i) = \begin{cases} 0, & z_{i+1} - z_i \le 0, \\ 1, & z_{i+1} - z_i > 0, \end{cases} \qquad \beta = \beta(i-1) = \begin{cases} 0, & z_i - z_{i-1} \le 0, \\ 1, & z_i - z_{i-1} > 0, \end{cases} \tag{21}$$

$$z_i = z_i(z,\tau) = \varsigma_i(z,\tau) + (1 - \eta_1(T_i))\eta_i(z,\tau) + W_1 \tag{22}$$

Основная идея заключается в согласованной аппроксимации членов «переноса» $C_4\eta$ и «диффузионного» $D_5\eta$ путем учета знака производной функции z_i (по пространственной переменной) – использования направленных разностей, правых или левых значений k и b относительно границ ячеек разностной сетки.

4. **Метод Кабаре**. Уравнение (10) расщепляем по физическим процессам: диффузионному и конвективному переносам. Согласно методу расщепления по физическим процессам переход с одного временного слоя на следующий слой осуществляется в два этапа. На первом этапе решается уравнение конвективного переноса, на втором — ищется решение краевой задачи для уравнения диффузии.

Для численного решения задачи конвективного переноса предложен следующий способ: трехслойная разностная схема с расщепленной временной производной и направленными разностями по пространственной переменной (по аналогии метода В.М. Головизнина):

$$\frac{\widetilde{S}_i^{n+1} - S_i^n}{\tau} = \begin{cases} -2V_{i+1/2}^-(\eta_2 S)_z - S_{\bar\tau,i+1}^n + (1-\alpha_1)G_i + \alpha_1 G_{i+1}, & if(V_{i-1/2} < 0) and (V_{i+1/2} < 0); \\ -V_{i+1/2}^-(\eta_2 S)_z - V_{i-1/2}^+(\eta_2 S)_{\bar z} - \frac{1}{2}(S_{\bar\tau,i-1}^n + S_{\bar\tau,i+1}^n) + (1-(\alpha_1+\alpha_2)/2)G_i + & \\ \qquad + \frac{\alpha_1}{2}G_{i+1} + \frac{\alpha_2}{2}G_{i-1}, & if(V_{i-1/2} > 0) and (V_{i+1/2} < 0); \\ -2V_{i-1/2}^+(\eta_2 S)_{\bar z} - S_{\bar\tau,i-1}^n + (1-\alpha_2)G_i + \alpha_2 G_{i-1}, & if(V_{i-1/2} > 0) and (V_{i+1/2} > 0); \\ (1-(\alpha_1+\alpha_2)/2)G_i + \frac{\alpha_1}{2}G_{i+1} + \frac{\alpha_2}{2}G_{i-1}, & if(V_{i-1/2} < 0) and (V_{i+1/2} > 0) \end{cases} \tag{23}$$

где α_i - весовые множители (i = 1,2); $(\eta_2 S)_{\bar z}$, $(\eta_2 S)_z$ - левые и правые разностные производные; G_i - функция запаса, которая обеспечивает консервативность схемы.

Предложенные разностные схемы имеют первый порядок аппроксимации по времени и пространству, при этом обоснованы условия их устойчивости.

Произведенные сравнительные численные эксперименты на модельных задачах, отличающихся друг от друга формами для уравнения влагопереноса и методами их решения, показывают, что первые два метода более экономичны и пригодны для долгосрочных геокриоэкологических прогнозов.

С целью проверки достоверности предложенной модели сопоставлены результаты расчета ТСВП с данными, полученными другими известными моделями и натурными замерами Немюгинского стационара. Установлена удовлетворительная сходимость расчетных и натурных данных, что позволяет рекомендовать эти математические модели для решения различных практических задач ТМО в мерзлых грунтах.

Техногенному загрязнению сильно подвергается деятельный слой криолитозоны (зона аэрации). Проведены вычислительные эксперименты с целью рассоления верхнего (деятельного) слоя с использованием тепломелиоративных приемов и локализования промстоков в нижних горизонтах:

- исследовано рассоление техногенного загрязненного грунта при различных значениях межфазового коэффициента распределения. Вышеуказанный способ рассоления понижает концентрацию примеси в полуметровом слое в 2-4 раза (рис. 8);

- изучено влияние осеннего влагозарядкового полива на теплосолевлажностный режим мерзлого грунта. Осенний влагозарядковый полив не рассоляет верхние слои деятельного слоя, а только усиливает подвижность влаги и соли (рис. 9).

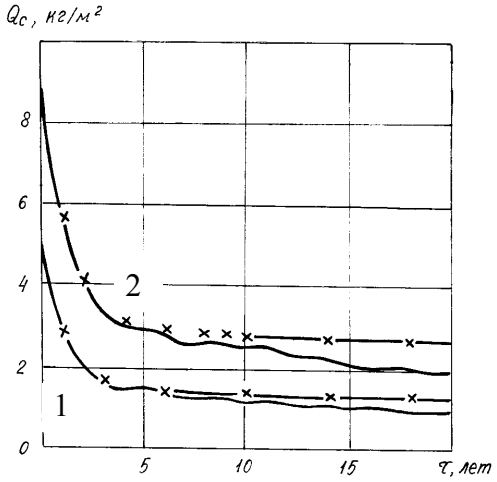

Рис. 8. Динамика изменения запасов соли:
1 – толщина слоя 0,5 м; 2 – 1 м;
—×— - при $k_{зх} = 0$; ——— - при $k_{зх} = 1$

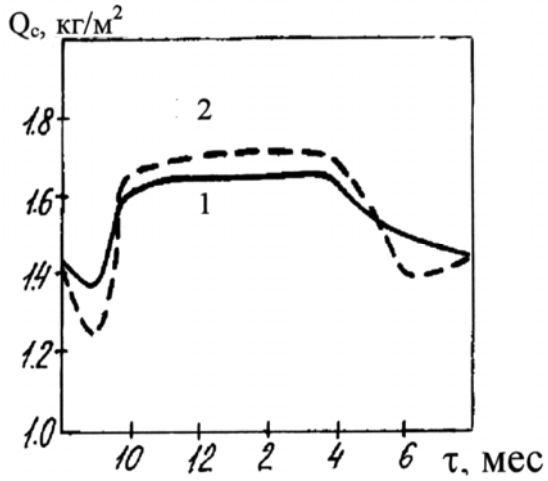

Рис. 9. Запасы соли в 0,5-метровом слое
1 – без полива; 2 – осенний влагозарядковый полив с нормой 160 мм

Правильный выбор модели играет большую роль при математическом моделировании техногенного загрязнения. Зная функциональную зависимость недостающих параметров, можно оценить область применимости для каждого уравнения модели следующим образом:

<u>Температурная задача</u>. При геокриологическом прогнозе глубина протаивания-промерзания $\xi(T)$ для температурной задачи в постановке Стефана (ММ ТЗ-1) определяется изотермой температуры $T_ф = 273$ К, а для ТЗ-2 (в спектре

температур) понятие фронта протаивания–промерзания отсутствует, так как фазовый переход поровой воды происходит в некотором диапазоне температур.

Для ММ ТЗ-2 глубина протаивания при поступлении промстока (агрессивных солей) выражается изотермой средней температуры фазового перехода, которая определяется через функцию количества незамерзшей воды $W_{нв}(T,C)$ [П.П. Пермяков, 1998]:

$$T_{ф}^{c} = \frac{1}{W_0 - W_{пс}} \int_{T_1}^{T_3} T \frac{\partial W_{нв}(T,C)}{\partial T} dT \quad . \tag{24}$$

Если $T_{ф}^{c}$ мало отличается от $T_{ф} = 273K$ ($\left|T_{ф} - T_{ф}^{c}\right| < 0,5 \quad K$), то целесообразно пользоваться ММ ТСВП-1 (в постановке Стефана), иначе ($\left|T_{ф}^{c} - T_{ф}\right| \geq 0,5 \quad K$) для более точного прогноза используется ММ ТСВП-2, так как она учитывает реальный процесс промерзания–протаивания порового раствора.

Уравнение влажности. Выбор формы представления уравнения влагопереноса в зоне аэрации зависит от степени насыщения грунта. При насыщении лучше применить ММ Ричардса (9), а в противном случае – влагопереноса (9^*), когда перенос порового раствора имеет доминирующее значение.

Солеперенос. В мерзлых грунтах, где степень загрязнения выше предельно допустимые концентрации, установленного ГОСТ [М.Г. Хубларян, 1991; СНиП II-3-79], учитывается процесс солепереноса. В зависимости от типа грунта, степени загрязнения и почвенно-поглощающего комплекса в уравнении включается сорбционный член. Для выбора сорбционного составляющего следует воспользоваться критериальной оценкой И.П. Айдарова.

6. ПРОГНОЗ ВЛИЯНИЯ ПРОМСТОКОВ НА ТЕПЛОСОЛЕВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ МЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ

Рассматривается процесс техногенного загрязнения инженерных сооружений при периодическом поступлении *промстока*. Например, инфильтрация фекальных вод в основании зданий животноводческих комплексов, утечка различных техногенных вод с бань, очистительных сооружений и т.д. Такие же проблемы возникают при складировании высокоминерализованных вод алмазодобывающих предприятий Якутии. При поступлении минерализованных вод происходит растворение льда, что приводит к изменению теплофизических и массообменных (или физико-механических) характеристик грунтов [Ю.Я. Велли, Э.Д. Ершов, И.А. Комаров, Я.А. Кроник, С.Г. Лосева, Р.Г. Мотенко, М.Г. Харина, А.П. Яркин и др.]. Соответствующие теплофизические и массообменные характеристики засоленных грунтов определены методом экстремальных задач.

Выполнены расчеты для инженерных сооружений с различной шириной для двух основных типов грубо- и тонкодисперсных (песков и глинистых) грунтов применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии. С течением времени (через 10, 20 лет эксплуатации) происходит стабилизация температурного режима и перераспределение соли по глубине исследуемого массива. Этот процесс особенно заметно развивается в грубодисперсных грунтах. Значительное накопление соли наблюдается у нижней границы оттаявшего слоя и под краями здания, возможен выход минерализованных грунтовых вод за пределы основания в близлежащие территории.

Приводятся сравнительные оценки глубины протаивания, полученные СНиПом и решением задачи тепломассообмена с учетом фазовых переходов под влиянием соли и влаги. В результате численного эксперимента, используя формулу (24), найден поправочный коэффициент для определения глубины протаивания засоленных грунтов.

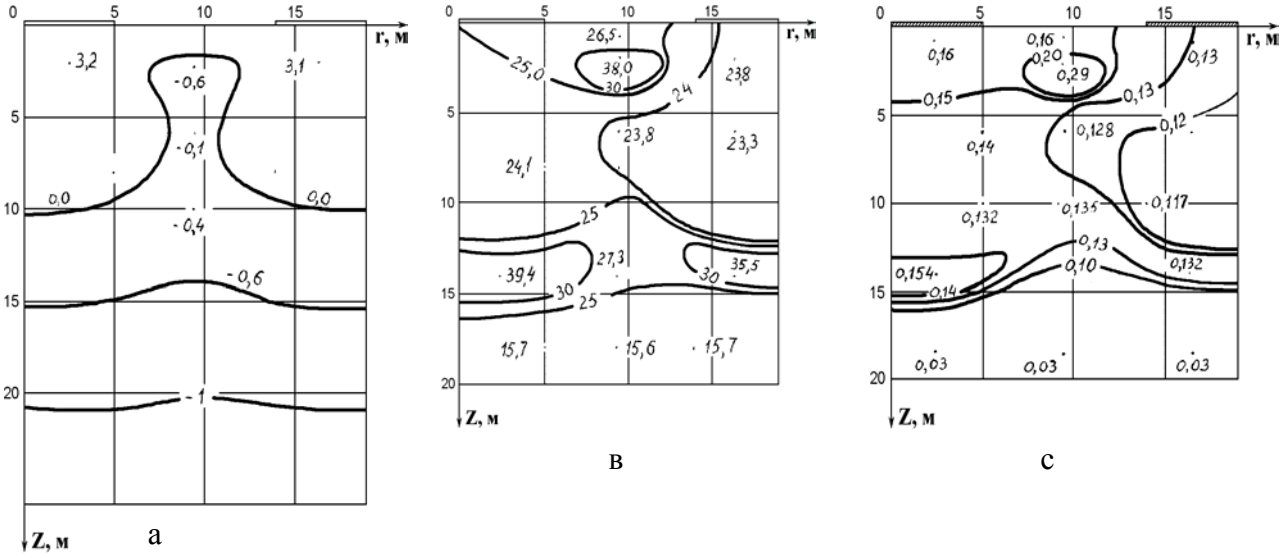

Рис. 10. Изолинии температуры (а), суммарной влажности (в) и засоленности (с) грубодисперсных грунтов через 50 лет (сентябрь, $q_{в,2} = 0$, $C_{в,2} = 0$)

В случае, когда цокольное покрытие второго здания хорошо гидроизолировано, процесс протаивания грунта в начальный период эксплуатации идет без влияния техногенных стоков (рис. 10). Несмотря на низкую среднегодовую температуру, под сооружениями самостоятельно без влияния друг на друга появляются и развиваются “чаши протаивания”. Мерзлый грунт между двумя “чашами протаивания” является “противофильтрационным барьером”. Под вторым сооружением из первого здания через сезонно талый слой постепенно идет инфильтрация промстока. Со временем промсток нижней границы чаши протаивания первого сооружения прорывает «мерзлый барьер». И через 50 лет наблюдается процесс интенсивного загрязнения под вторым сооружением, хотя слияния нулевых изотерм ещё не произошло.

Под стройплощадки нередко выделяют непригодные засоленные участки, где строительство нулевого цикла обходится очень дорого, так как иногда производится с полной заменой засоленного грунта. В таких грунтах нами разработан новый способ возведения сваи [Способ…, 1989], суть которого заключается в промораживании криопэга вокруг предварительно пробуренной скважины и завершении дальнейшего бурения до проектной отметки. Такой способ погружения сваи исключает попадание рассола (криопэга) с верхних горизонтов на нижний, что обеспечивает несущую способность основания.

Предложенный способ возведения сваи можно применять в районах многолетней мерзлоты. В зависимости от степени насыщения грунта применены различные виды замораживания, которые исключают попадание криопэга в нижние горизонты.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ГРУНТАХ ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Особенностью транспортной схемы в северных районах является то, что доставка нефтепродуктов осуществляется водным путем. В силу этого почти все крупные нефтехранилища расположены в поймах рек, поэтому часть территории нефтебазы и их причальные сооружения находятся в непосредственной близости от русел, в зоне влияния паводковых вод. Тепловлажностный режим грунтов оснований нефтебазы и вынос загрязненных грунтовых вод зависят от мерзлотных условий и сезонного колебания уровня паводковых вод.

В зависимости и степени загрязнения нефтепродукты в грунтах находятся в виде пленки, эмульсии и растворенном состоянии [С.М. Казённов, Е.В. Пиннекер, В.Н. Макаров]. Ископаемые нефти различных месторождений сильно различаются по химическому составу и соответственно физическими свойствами (плотностью, вязкостью, водорастворимостью, сорбируемостью, теплопроводностью и т.д.). Исследования влияния нефтяного загрязнения на теплофизические свойства мерзлых дисперсных пород, проведенные Е.М. Микляевой, Р.Г. Мотенко, В.Г. Чеверевым, Е.М. Чувилиным и др., указывают на то, что наблюдается понижение значений коэффициентов теплопроводности загрязненных пород в талом, так и мерзлом состояниях, но для мерзлых пород это влияние гораздо существеннее. В результате обработки данных экспериментальных исследований установлена зависимость коэффициента теплопроводности от концентрации нефтепродуктов.

В реальных условиях грунты состоят из различных слоев, и вычислительный эксперимент (в условиях нефтебазы г. Ленска) показывает, что в зимнее время незамерзший поровый раствор из тонкодисперсного слоя мигрирует в мерзлые слои грубодисперсного грунта, т.е. «водоудерживающий слой» является источником загрязнения. Неоднородность грунта существенно влияет на

формирования ледяных включений, зон различной суммарной влажности и степени загрязнения.

Произведен численный эксперимент массообменного режима грунта основания при различных мерзлотных условиях. В случае сплошного распространения многолетней мерзлоты можно пренебречь фильтрацией паводковой воды, так как она является водоупором. В случае островной мерзлоты в зимний период вблизи русла реки при промерзании насыщенного грунта образуется ледовый “панцирь”, который является противофильтрационной завесой во время весеннего паводка. Осенью, насыщенный грунт здесь промерзает с некоторым опозданием, поэтому вынос загрязненного раствора будет наблюдаться до его полного промерзания грунта. Затем, в зимние месяцы, идет процесс образования нового ледового “панциря”.

В годичном цикле в весенний и осенний периоды наблюдается интенсивный вынос загрязненных веществ. *Весенний вынос* можно объяснить следующим образом. В осенне-зимние месяцы при промерзании грунта идет процесс накопления влаги (техногенного раствора) в верхних горизонтах грунта. Весной при протаивании снега влажность верхнего слоя увеличивается, и избыточная техногенно загрязненная грунтовая вода начинает дренировать по склону вниз.

Влажность грунта в осенний период увеличивается за счет дождей и при промерзании грунта усиливается процесс подтягивания незамерзшей воды к фронту промерзания, при котором образуется избыточное давление. За счет тепла, которое аккумулировалось в летние месяцы, в нижней части деятельного слоя грунта идет процесс протаивания. В результате двух вышеуказанных процессов суммарный эффект миграции грунтовых вод приводит к выносу нефтепродуктов к нижней террасе реки *в осенний период* до полного промерзания.

В летние месяцы вынос загрязненных вод снижается, так как в районах Центральной Якутии преобладает испарение. Вынос в этот период может осуществляться надмерзлотными грунтовыми водами, которые появляются за счет протаивания подземных льдов и поступления атмосферных осадков.

Динамика поступления надмерзлотной загрязненной грунтовой воды с концентрацией 20 г/л представлена на рис. 11. Техногенная вода, загрязненная нефтепродуктами, проникает по полосе 0,5-0,75 м с напором –0,5 м и фильтрирует вниз в сторону реки. Кроме температуры и примеси на рис. 11b показаны соответствующие изолинии порового давления (Р, м).

8. ПРОГНОЗ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

В настоящее время согласно тройному соглашению между Республикой Саха (Якутия), АК «АЛРОСА» и МинАтомом России (приказ от 26.02.1999г. № 122) планируются рекультивационные работы на местности АПЯВ «Кратон-3» (пос. Айхал).

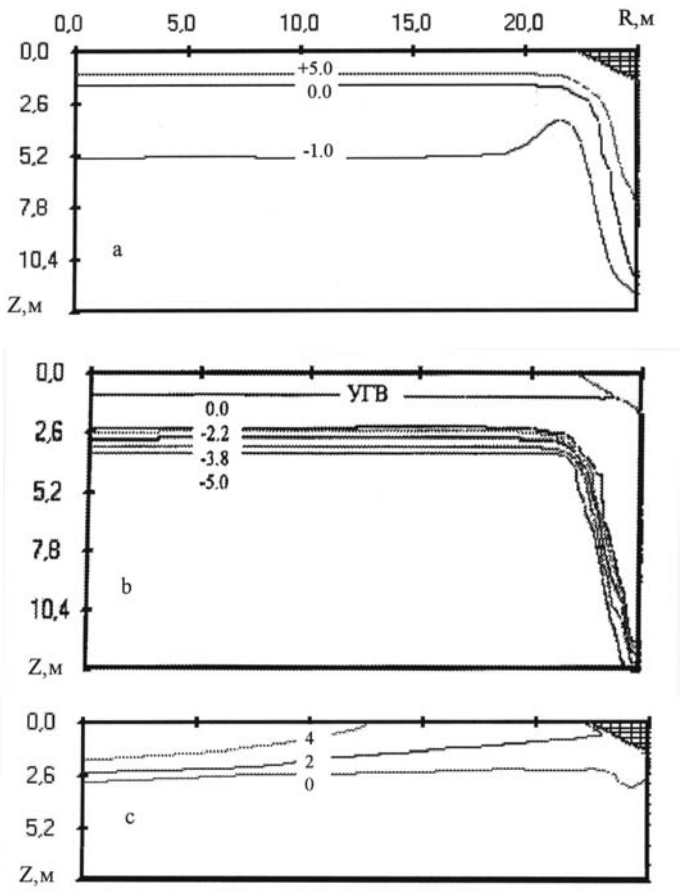

Рис. 11. Распределения температуры (a), порового давления P, м (b) и примеси S, % (c) при $100 \cdot k_ф$. Уровень грунтовых вод (УГВ). Июль

Техногенные радионуклиды со временем включаются в биохимические циклы и постепенно переходят в почвенный раствор. Механизмом миграции радионуклидов, перешедших в водный раствор, является диффузионно-конвективный перенос. Автором предложена математическая модель конвективно-диффузионного переноса радионуклидов при фазовом переходе порового раствора, используя опыт работ [В.М. Прохоров, А. Ааркрог, Р.В. Арутюнян, В.А. Батурин, К.П. Махонько и др.].

Исходные данные для численного расчета взяты с учетом природно-климатических условий объекта «Кратон-3». Теплофизические и массообменные характеристики мерзлых грунтов восстановлены с учетом реального процесса промерзания порового раствора. Для расчетов были использованы числовые значения эффективного коэффициента диффузии и параметры обмена с учетом кинетики фазового перехода в системе: поровый раствор–твердая фаза, полученные в результате обработки натурных данных Чернобыля и производственного объединения «Маяк» [Р.В. Арутюнян, Чернобыль…, 1990; В.А. Батурин, А.С. Белицкий, Г.П. Бровка, Н.Ф. Челищев и др.]. Анализ данных перечисленных работ показал, что разброс значений коэффициента диффузии небольшой. При загрязнении радионуклидами происходит понижение массообменных характеристик за счет сорбции почвенно-поглощающего комплекса [Г.П. Бровка, И.В. Дедюля и др.].

В результате численного эксперимента установлено:

- нарушение напочвенных покровов при бурении и рекультивации усиливает процесс протаивания на 10-20 см, а также увеличивает увлажненность грунта за счет протаивания льда нижних слоев и соответственно повышает подвижность радионуклидов в поровом растворе деятельного слоя;

- идет медленный процесс миграции радионуклидов вниз по рельефу в сторону реки Мархa, который согласуется с результатами натурных замеров,

произведенных радиологическими экспедициями 1990 и 1993 гг [И.С. Бурцев]. При этом площадь зоны экологических бедствий расширяется.

Самым надежным способом компаундирования радиоактивных отходов является их остеклование. Однако остеклование относится к самым дорогим способам локализации, требующим наличия специальных установок. Для локализации низко- и среднерадиоактивных отходов можно воспользоваться многолетней мерзлотой кургана могильника типа булгуннях (якутское название) [В.В. Киселев].

Исследованы тепломассообменные режимы грунтового основания саркофага (могильника) при различных температурных условиях. При повышении среднегодовой температуры окружающей среды необходимую температуру (в пределах -3÷-9°С) кургана могильника можно будет поддерживать с помощью сезонно-охлаждающих устройств.

Другим способом локализации низкорадиоактивных отходов является засыпка местности дисперсными грунтами. Численный эксперимент произведен при различных температурных режимах и толщинах заполнения. На основе расчетных данных предложенная высота засыпки должна быть выше глубины сезонного протаивания грунта (≈2,0 ÷3,0 м), чтобы загрязненный радионуклидами грунт находился в мерзлом состоянии. Насыпные работы лучше произвести в зимнее время послойным замораживанием при максимальной хладозарядке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе параметрической идентификации математических моделей и методики решения прямых задач разработана **методология численного моделирования** тепломассообменных процессов при техногенном загрязнении мерзлых грунтов *с учетом реального процесса промерзания–протаивания порового раствора***.**

1. **Создана методика идентификации теплофизических и массообменных характеристик влажных загрязненных дисперсных сред при фазовом переходе**, основанная на методах итерационного решения обратных задач математической физики в экстремальной постановке**:**

- разработаны алгоритмы восстановления параметров функции количества незамерзшей воды (порового раствора), совместного определения удельной теплоемкости и теплопроводности при различных значениях параметра ν;

- предложены алгоритмы для восстановления зависимостей коэффициентов теплопроводности от суммарной влажности и диффузии от льдосодержания;

- построены алгоритмы сплайн-идентификации граничных условий теплообмена на поверхности неоднородных грунтов.

Проверена работоспособность предложенных алгоритмов на модельных примерах с точными решениями, изучены зависимость скорости сходимости и качество восстановления от способа задания, числа и возмущения входной информации.

Реализована компьютерная обработка данных лабораторных и натурных тепломассообменных исследований, при которой использована разработанная методика идентификации параметров математической модели**.** Восстановлены теплофизические характеристики различных дисперсных грунтов (целинных земель, горных пород Куранахского и Мало-Ботуобинского месторождений, подстилающих грунтов строительных площадок, загрязненных нефтепродуктами и растворимыми солями и т. д.). Осуществлена идентификация плотности теплового потока деятельного слоя многолетней мерзлоты при различном техногенном нарушении почвенно-растительного покрова.

2. **Предложена методика численного решения тепломассообменных задач** при различных насыщениях техногенно загрязненных грунтов. На основе функциональной зависимости восстановленных параметров («*естественного метода сглаживания*») и методов направленных разностей разработаны алгоритмы и программы для численного решения прямых задач конвекции-диффузии в многомерной области с фазовым переходом порового раствора. Проведена проверка работоспособности предложенных алгоритмов на тестовых примерах путем сравнения, а также исследована их устойчивость. Результаты численного эксперимента выявили хорошую эффективность предложенных методов для долгосрочного мерзлотного прогноза и сопоставимость модели с данными других авторов и натурных наблюдений. Указаны области применения соответствующих математических моделей тепломассопереноса (структур) на инженерной практике в зависимости от типа грунта, степени загрязнения и насыщения, средней температуры фазового перехода порового раствора.

3. **Моделированы малоизученные инженерно-экологические процессы**, связанные с техногенным загрязнением (промстоками, нефтепродуктами, радионуклидами АПЯВ) мерзлых грунтов. Проведены численные эксперименты при различных входных данных с учетом природно-климатических условий местности, количества осадков и испарения, надмерзлотных грунтовых и паводковых вод, и при различных мерзлотных условиях с целью анализа их влияния на массообменные режимы грунтов:

а) осуществлены вычислительные эксперименты *по рассолению* мерзлотных грунтов и получены следующие результаты:

- тепломелиоративный способ рассоления понижает концентрацию примеси в полуметровом слое верхнего горизонта в 2-4 раза;

- осенний влагозарядковый полив не рассоляет верхние слои деятельного слоя, а только усиливает подвижность влаги и соли.

б) проведен долгосрочный прогноз тепломассообменного режима грунтов оснований инженерных сооружений при периодическом поступлении минерализованных вод (*промстока*) при различных типах грунта:

- выявлены особенности формирования зоны повышенной засоленности на границе с мерзлым грунтом и под краями зданий и выхода порового раствора за пределы (здания) оттаявшей зоны, способствующие образованию техногенных криопэгов;

- найден поправочный коэффициент для уточнения глубины протаивания в основании инженерных сооружений, при котором использована средняя температура фазового перехода;

- проведен численный прогноз по теплосолевлажностному взаимодействию двух инженерных сооружений с мерзлым грунтом и установлен процесс слияния двух чаш протаивания с прорывом "мерзлого барьера" между двумя сооружениями минерализованным промстоком;

- выполнены прогнозные оценки нового способа возведения сваи с предварительным замораживанием надмерзлотных таликов (криопэгов) в мерзлом грунте.

в) исследованием тепломассообменного режима грунтов оснований инженерных сооружений, загрязненных *нефтепродуктами*, выявлено:

- связь сезонной динамики с весенним (май) и осенним (октябрь-ноябрь) интенсивным выносом техногенного раствора в речную систему криолитозоны;

- что тонкодисперсное включение в однородных и неоднородных (с включением тонкодисперсного слоя) грунтах в период увлажнения (таяния снега) или испарения является «водоудерживающим слоем», а в осенне-зимний период – «источником загрязнения».

г) проведен прогноз конвективно-диффузионного переноса *радионуклидов* в мерзлых грунтах при АПЯВ «Кратон-3» (пос. Айхал) и установлено:

- усиление процесса протаивания на 10-20 см и увеличение увлажненности грунта из-за нарушения растительного и напочвенного покровов, повышающих подвижность радионуклидов в поровом растворе деятельного слоя;

- медленный процесс миграции радионуклидов вниз по рельефу, что подтверждается результатами натурных замеров, выполненных радиологическими экспедициями 1990 и 1993 гг;

- прогноз тепломассообменного режима грунтов оснований различных инженерных сооружений (саркофага, испарительного пруда и т.д.), предназначенных для рекультивационных работ.

Рекомендовано выполнение насыпных работ инженерных сооружений в зимнее время послойным замораживанием при максимальной хладозарядке и с необходимой толщиной теплоизоляции.

Список основных публикаций по теме диссертации

Монографии

1. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. - Новосибирск: Наука, 1989. - 86с.
2. Тепло-и солеперенос в мерзлых ненасыщенных грунтах. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. - 126с. (соавтор П.Г. Романов)
3. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 2003. - 223с. (А.П. Аммосов).

Статьи

4. Определение теплофизических характеристик промерзающих – протаивающих дисперсных сред методом решения обратных задач теплопроводности // ИФЖ. – 1980. – Т. 39, № 2. – С. 292 – 297. (соавторы: А. Р. Павлов, А.В. Степанов)
5. Numerical determination of thermal characteristics of freezing-thawing soil // Ground Freezing. 2nd Int. Symp. Trondheim, 1980. Prepr. - Trondheim, 1980. - P. 454-461. (A.R. Pablov)
6. Разностный метод решения задачи промерзания при фазовых переходах в спектре температур // Процессы переноса в деформируемых дисперсных средах. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1980.- С. 111-119. (А. Р. Павлов, Т.В. Бараней)
7. Задача о промерзании полубесконечной среды с начальным линейным распределением температур // Известия АН СССР. Физика Земли. – М. 1980, № 1. – С. 125-127.. (В.А. Михайлов)
8. Численное решение коэффициентной обратной задачи тепло- и массообмена в дисперсных средах при фазовых переходах // Бюллетень научно- технической информации. Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1982.- С. 16-19. (А.Р. Павлов)
9. Математическая модель и алгоритм на ЭВМ тепло - и массопереноса при промерзании грунта // ИФЖ. - 1983.- Т. 33, № 2.- С. 311 - 316.(А.Р. Павлов)
10. Об эффективности восстановления теплофизических характеристик промерзающих - протаивающих грунтов // Методы и алгоритмы прикладной математики в задачах теплофизики и обработки эксперимента. – Якутск: Изд-во ЯНЦ, 1983. – С. 42-50.
11. Идентификация граничных условий теплообмена в горных выработках // Исследование тепло- массообмена в инженерных сооружениях, строительных материалах и природных средах. – Якутск: изд-во. ЯГУ. 1985.- С. 105-116. (П.Н. Скрябин, В.П. Тюнин)
12. Математическое моделирование процессов тепло и массообмена при геокриологических прогнозах. // ИФЖ. - 1987.- Т. 53, № 1.- С. 124-129.
13. Прогнозирование потенциальной эффективности тепловой мелиорации мерзлотной почвы // Проблемы гидротермики мерзлотных почв. – Новосибирск: Наука, 1988.- С. 104 - 113. (П.Г. Романов, В.И. Неймохова)

14. Математическое моделирование тепловлагосолепереноса при сезонном протаивании мерзлых грунтов // ИФЖ. - 1989. - Т. 57, № 1.- С. 119 - 124. (П.Г. Романов, А.В. Степанов)

15. Динамика сезонного тепло, влаго – и, солепереноса в мерзлотном почвогрунте // Теория почвенного криогенеза. Пущино. 1989.- С. 47 – 51.(П.Г. Романов, Л.А. Мунхалова)

16. Prognosis and regulation of heat and moisture regime of frozen soils // Prost in Geotechnical engineering. Int. Symposium, Saariselka, Finland, 1989.- P. 371 – 377. (P.G. Pomanov)

17. Математическое моделирование тепловлагосолепереноса в мерзлых грунтах // Дифференциальные уравнения и их приложения. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО АН СССР, 1989.- С. 96 - 100. (Л.А. Мунхалова, П.Г. Романов)

18. Тепловлагосолевой режим мерзлотного грунта при осеннем влагозарядковом поливе // Условия и процессы криогенной миграции вещества. - Якутск: Изд-во ИМЗ, 1989. - С. 24 - 36. (В.А. Иванов, Л.А. Мунхалова, П.Г. Романов, А.В. Степанов, А.М. Тимофеев)

19. Прогноз деградации многолетней мерзлоты при подземном захоронении высокоминерализованных вод // Рациональное природопользование в криолитозоне. - М.: Наука, 1990. - С. 120 - 126. (С.П. Готовцев, И.В. Климовский, В.А. Михайлов)

20. Устройство фундаментов опор линий электропередачи в условиях многолетнемерзлых грунтов. - Электричество, 1991.- № 9.- С. 16-19. (Ю.Р. Дордин, В.В. Мандаров, Н.Е. Михайлов)

21. Влияние засоленности на тепловлажностный режим почвогрунта // Климат. Почва. Мерзлота. - Новосибирск: Наука, 1991. - С. 106 - 110. (П.Г. Романов, Л.А. Мунхалова)

22. Прогноз антропогенного загрязнения мерзлых грунтов // Тепломассообмен ММФ-92. - Минск: АНК ИТМО им. А.В. Лыкова АНБ, 1992.- Т. 7.- С. 21 - 24. (П.Г. Романов, В.В. Мандаров)

23. Прогноз тепловлагосолевого взаимодействия двух сооружений с мерзлым грунтом. – Тр. 2-й Российской национальной конференции по Теплообмену. 26 - 30 октября 1998 г. - М.: МЭИ, 1998.- Т. 5. - С. 147 - 151.(А.П. Аммосов, С.С. Платонов, Г.Г. Попов)

24. Идентификация коэффициента теплоотдачи цокольного перекрытия здания, построенного на многолетней мерзлоте. – Математические заметки ЯГУ. – Якутск, 1998.- Т. 5, вып. 2.- С. 146-152. (Г.Г. Попов, А.М. Тимофеев, А.Н. Цеева, Н.Д. Данилов)

25. Миграция радиоактивного загрязнения при протаивании мерзлого грунта // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 1999. – С. 182-184. (Г.Г. Попов, А.П. Шадрин, А.П. Аммосов, С.П. Готовцев)

26. Прогноз теплового воздействия коллектора г. Якутска с многолетнемерзлыми грунтами // Исследования по теплофизическим проблемам Севера: Сб. научн. трудов конф. посвященной памяти Иванова Н.С. – Якутск: изд-во ЯГУ, 1999.- С. 68-74. (Ф.Е. Попенко, Г.Г. Попов, А.М. Тимофеев)

27. Влияние неоднородности грунта, загрязненного нефтепродуктами, на формирование тепломассообменного режима // Тепломассообмен ММФ-2000. - Минск: АНК ИТМО им А.В. Лыкова АНБ, 2000.- Т. 8. - С. 201-209.(А.П. Аммосов, С.С. Платонов, А.В. Малышев)

28. Методика и расчет динамики протаивания мерзлых грунтов и выбор несущих конструкций ЛЭП.// Физико-технические проблемы Севера: Тр. Международной конференции. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2000.- Часть IV. – С. 211-221.(Н.Н. Платонов, В.П. Кобылин)

29. Теплообмен биореактора с окружающей средой // Физико-технические проблемы Севера: Тр. Международной конференции. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2000.- Ч. I. – С. 269-278. (В.А. Михайлов, Г.Г. Попов)

30. Моделирование техногенного загрязнения в мерзлых грунтах // Физико-технические проблемы Севера: Труды Международной конференции. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2000.- Ч. 1. – С. 284-297. (Г.Г. Попов)

31. Численное моделирование задач конвективно-диффузионного переноса при фазовом переходе //. По проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: 16-20 июля 2002 г.: Тр. I Евразийского симпозиума.– Якутск, 2002.- Ч. IV. - С. 149-156.

32. Prediction of dynamics of mass exchange processes in the foundations of engineering structures // 5th International symposium on Permafrost engineering. 2-4 September. – Yakutsk, Russia, 2002.- V. 1.- P. 203-207. (G.G. Popov, A.P. Ammosov, S.S. Platonov, P.N. Skryabin)

33. Численные методы решения задач конвекции-диффузии при фазовом переходе // Современные проблемы теплофизики в условиях Крайнего Севера. – Якутск: ЯФ Издательство СО РАН, 2002. - С. 26-35. (Г.Г. Попов, С.С. Платонов)

34. Расчет тепло-влажностного режима грунта на трассе линии электропередачи // Электричество, 2002.- № 12.- С. 19-24 (В.П. Кобылин, Н.Н. Платонов)

35. Массообменные режимы грунтов оснований саркофагов в криолитозоне // Экология и промышленность России, 2003. – Ноябрь – С. 33-35 (Г.Г. Попов, А.П. Аммосов, С.Т. Хохолова)

36. Численный прогноз динамики криопэгов в мерзлых грунтах // Вычислительные технологии, 2004. – Том 9, № 2. – С. 82-91.

37. Методы определения характеристик дисперсных сред при фазовом переходе. – Известия ВУЗ. Физика. 2004, № 3. - С.13-18.

38. Тепломассообменный режим грунтов при нефтяном загрязнении // Экология и промышленность России, 2004. – Июнь – С. 24-27 (Г.Г. Попов, А.П. Аммосов)

39. Математическое моделирование загрязнения подземных вод криолитозоны // По проблемам прочности материалов и конструкций для регионов холодного климата: Тр. II-го Евразийского симпозиума. 16-20 августа 2004 г. в 5 частях. – Якутск, 2004. Ч. 5. – С. 85-91 (Г.Г. Попов, С.Т. Хохолова, В.Н. Ефремов, С.П. Готовцев, И.С. Семенов).

Изобретение

40. Способ возведения сваи в вечномерзлом грунте: А. с. 1492795 СССР, МКИ^3 Е 02D7 / 00 / (С.К. Лукин (СССР)). - 2с.: ил.