

На правах рукописи

ГОРОБЦОВ ДЕНИС НИКОЛАЕВИЧ

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ**

Специальность 25.00.08 – инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук**

**Москва
2011**

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе на кафедре инженерной геологии и в научно-исследовательской лаборатории «Проблем геотермии».

Научные руководители: доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Вадим Владимирович Пендин**
доктор физико-математических наук,
профессор **Юрий Анатольевич Попов**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Владимир Нишанович Экзарьян**
кандидат геолого-минералогических наук,
Ирина Викторовна Осика

Ведущая организация: кафедра геологии и гидрогеологии Московского государственного открытого университета

Защита диссертации состоится 16 июня 2011 г. в 15 часов в ауд. 5-49 на заседании диссертационного совета ДМ 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117997, г.Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу:
117997, г.Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.121.01.

Автореферат разослан 13 мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

О.Е. Вязкова

Актуальность работы

Исследование теплофизических свойств мерзлых и талых грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений, является важной задачей при изучении процессов теплопереноса в системе фундамент-грунт, определяющих условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Основная проблема заключается в измерении параметров теплофизических свойств дисперсных грунтов с заданной точностью.

В настоящее время при инженерно-геологических изысканиях теплофизические характеристики грунта определяют, как правило, по таблице СНиПа 2.02.04-88 (основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах), при этом не может быть обеспечена достаточная надежность и точность определяемых параметров, так как отсутствует информация по методам определения, региональной привязке, не учитываются генетические особенности грунта, возраст грунта, условия залегания.

В связи с этим актуальной задачей является повышение уровня экспериментальных теплофизических исследований грунтов лабораторными методами с возможностью определения на этих же образцах и других показателей состава, состояния и физических свойств.

Важным также является развитие инженерных теоретических моделей тепловых режимов грунтов оснований и фундаментов, создание подходов к прогнозу теплофизических свойств грунтов по результатам определения показателей состава, состояния и физических свойств.

Цель работы

Целью работы является создание научно-методических основ исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов с применением уникального геотермического оборудования и оценка взаимосвязи параметров теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств.

Задачи работы

В соответствии с целевой установкой были поставлены следующие задачи научных исследований:

1. Разработка методики комплексного экспериментального определения теплофизических свойств дисперсных грунтов на основе применения уникального геотермического оборудования.

2. Проведение экспериментальных исследований теплофизических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

3. Создание представительной базы данных о теплофизических свойствах дисперсных грунтов Московского региона на основании прецизионных массовых измерений на керновом материале.

4. Анализ корреляционных связей теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

5. Моделирование процессов теплопереноса в системе фундамент-грунт при промерзании и протаивании на основе использования экспериментальных данных о теплофизических свойствах грунтов и строительных материалов.

Фактический материал, методы исследования

Основным объектом исследования теплофизических свойств послужили более 300 образцов дисперсных грунтов Московского региона, отобранных на различных объектах при проведении инженерно-геологических изысканий.

В ходе выполнения работы автором разработана методика применения геотермического оборудования по измерению тепловых свойств горных пород на керне с целью определения теплофизических свойств грунтов для инженерно-геологических целей. На основе разработанной методики выполнен комплекс экспериментальных исследований теплофизических свойств грунтов Московского региона. Полученные результаты обработаны и проанализированы, построены графики и номограммы зависимости теплофизических свойств от показателей состава, состояния и физических свойств, получены расчетные уравнения связи.

С помощью коммерческого симулятора (пакет Comsol Multiphysics) построены модели теплового режима грунтов оснований и фундаментов инженерных сооружений.

Разработка методики, проведение экспериментов и моделирование проводились в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе на кафедре инженерной геологии и в научно-исследовательской лаборатории «Проблем геотермии».

Научная новизна работы

1. Разработана оригинальная методика экспериментального определения теплофизических свойств дисперсных грунтов на основе применения методов оптического сканирования и линейного источника.

2. Предложенная методика экспериментального определения теплофизических свойств дисперсных грунтов, основанная на применении методов оптического сканирования и линейного источника, впервые внедрена в практику изучения дисперсных грунтов.

3. На основе массовых прецизионных измерений определен комплекс теплофизических свойств на представительных коллекциях дисперсных грунтов, собранных при инженерно-геологических изысканиях на территории Московского региона.

4. В результате внедрения новой методики теплофизических исследований создана представительная база данных по теплофизическим свойствам дисперсных грунтов Московского региона.

5. На основе представительных экспериментальных данных установлены корреляционные зависимости между теплофизическими свойствами и показателями состава, состояния и физических свойств различных разновидностей грунтов.

6. При помощи установленных корреляционных связей показана возможность прогнозной оценки теплофизических свойств по результатам определения показателей состава, состояния и физических свойств грунтов.

7. По результатам математического моделирования построены модели теплового режима грунтов оснований и фундаментов инженерных сооружений на основе высокоточных экспериментальных данных о теплофизических свойствах грунтов.

Защищаемые научные положения

1. Разработанная оригинальная методика исследований теплофизических свойств грунтов обеспечивает прецизионные измерения теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости образцов грунтов, что дает возможность повысить качество прогнозной оценки теплофизических свойств по показателям состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов на основе корреляционно-регрессионного анализа.

2. Результаты экспериментальных исследований теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости в совокупности с показателями состава, состояния и физических свойств грунтов, полученные на основе изучения более чем 300 образцов, впервые обеспечили формирование

представительной базы данных по грунтам Московского региона. Анализ взаимосвязи теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов обеспечил создание математических моделей для научно-обоснованной их оценки.

3. Детальные данные о теплофизических свойствах, полученные экспериментально для различных разновидностей дисперсных грунтов Московского региона на представительных коллекциях, повышают эффективность теоретического моделирования теплового режима в системе фундамент-грунт для решения инженерно-геологических задач.

Практическая значимость работы

1. Проведенный анализ различных методов и средств определения теплофизических параметров природных и промышленных материалов позволил сформировать подход к созданию аппаратно-методического комплекса для теплофизических исследований дисперсных грунтов на основе применения методов оптического сканирования и линейного источника.

2. Разработаны новые и усовершенствованы уже существующие экспериментальные и теоретические подходы для определения теплофизических свойств грунтов для целей инженерной геологии.

3. Созданная представительная база данных по теплофизическим свойствам грунтов Московского региона и их корреляционным связям с другими физическими свойствами существенно повышает достоверность инженерно-геологических исследований как фундаментального, так и прикладного характера.

4. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для описания процессов теплопереноса в системе фундамент-грунт при проектировании зданий и сооружений, а также прогноза негативных инженерно-геологических процессов.

5. Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета по следующим дисциплинам: грунтоведение, мерзлотоведение и инженерная геодинамика.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на II научно-практической конференции молодых специалистов "Инженерные изыскания в строительстве" в 2007 г. в Москве; XXI Assembly of American Geological Society. 2007, Denver, USA; Всероссийской конференции-конкурсе

студентов выпускного курса ВУЗов в 2008 г. в Санкт-Петербурге; II регионального конкурса выпускных квалификационных работ Всероссийской студенческой олимпиады в 2008 г. в Екатеринбурге; Научной конференции «Молодые – наукам о Земле» в 2008 г. в Москве; IX Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» в 2009 г. в Москве; X General Assembly of IASPEI, Cape Town, South Africa, 2009; Научной конференции «Молодые – наукам о Земле» в 2010 г. в Москве; 6-ой Общероссийской конференции изыскательских организаций "Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации" в 2010 г. в Москве; X Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» в 2011 г. в Москве. В 2009 г. автор стал лауреатом стипендии президента РФ.

Публикации

Результаты работы отражены в 4 научных статьях, опубликованных в реферируемых журналах ВАК, и 11 тезисах докладов на научных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 129 страниц машинописного текста, 82 рисунка, 59 таблиц, библиографию из 88 наименований.

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своим научным руководителям доктору геолого-минералогических наук, профессору Пендину В.В. и доктору физико-математических наук, профессору Попову Ю.А.

Автор признателен сотрудникам кафедры инженерной геологии, профессорам Кувшинникову В.М., Дмитриеву В.В., Пашкину Е.М., доценту Вязковой О.Е. за помощь и ценные советы при написании настоящей работы.

Автор пользуется случаем поблагодарить всех сотрудников научно-исследовательской лаборатории «Проблем геотермии» за внимание, помощь и ценные советы в работе. Автор считает своим долгом выразить благодарность Московскому научному центру компании Шлюмберже (Schlumberger Moscow Research) и Российскому фонду фундаментальных исследований за многолетнюю поддержку развития теплофизических исследований.

Автор выражает благодарность ООО «Институт «Каналстройпроект»» в лице Заботкиной Л.В. и Зеленцовой Е.А., ОАО «Метрогипротранс» в лице Федоровой М.П. и коллектив ООО «ИГИТ» за предоставление образцов грунтов Московского региона для теплофизических исследований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводятся результаты анализа современного состояния аппаратно-методической базы для изучения теплофизических свойств грунтов – теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, тепловой неоднородности и имеющимся базам данных по теплофизическим свойствам грунтов.

Показан большой вклад в этом направлении ученых России и стран СНГ И.В. Голованова, В.А. Голубева, Р.П. Дорофеева, В.П. Коболева, А.А. Курбанова, Р.И. Кутаса, А.А. Липаева, У.И. Моисеенко, Г.И. Петрунина, Б.Г. Поляк, В.Г. Попова, Ю.А. Попова, Е.В. Смирнова, Л.С. Соколова, М.Д. Хуторского, Ю.Г. Шварцмана, В.А. Щапова, С.Н. Эмирова, Б.А. Яковлева и др. Из зарубежных исследователей необходимо отметить вклад Д. Блэквелла, Ф. Бриго, Г. Буркхардта, У. Зайпольда, К. Клаузера, И. Кукконена, Д. Прибноу, Дж. Сасса, Э. Хюнгеса, В. Чермака, Я. Шафанды, Р. Шелльшмидта и др.

Среди работ отечественных исследователей, посвященных вопросам исследования теплофизических свойств грунтов (в основном при положительных температурах), особое место занимают обобщающие труды А.Ф. Чудновского, А.У. Франчука, М.С. Керстена. Серьезные исследования в этом направлении были выполнены Б.Н. Кауфманом, Г.М. Кондратьевым, В.Л. Шевельковым.

Применительно к экспериментальным теплофизическим исследованиям грунтов проанализированы достоинства и недостатки современных средств и приборов, ранее разработанных для определения теплофизических свойств грунтов. Показано, что все современные методы измерений теплофизических свойств можно разделить на три основные группы: 1) стационарного теплового режима; 2) квазистационарного теплового режима; 3) нестационарного теплового режима.

Установлено, что, несмотря на наличие многочисленных разработок, современная аппаратно-методическая база теплофизических исследований не может обеспечить требуемое качество экспериментальной информации о теплофизических свойствах грунтов. В связи с этим показано, что в настоящее время основным надежным источником данных о теплофизических свойствах грунтов являются лабораторные измерения на керне.

На основе анализа сделан вывод, что применительно к задачам инженерной геологии рассмотренные выше методы и способы определения

теплофизических свойств грунтов имеют существенные ограничения в связи со следующими причинами:

- низкий метрологический уровень измерений из-за невозможности обеспечения должного теплового контакта между изучаемым образцом грунта и элементами измерительной системы;
- опасность значительных механических изменений образца, вплоть до его полного разрушения при активном прижатии к образцу грунта этих элементов измерительной системы в попытке улучшить тепловой контакт с образцом;
- большая трудоемкость подготовки образцов заданных форм и размеров;
- серьезные проблемы с измерениями всего необходимого комплекса теплофизических свойств грунтов;
- используемый при измерениях малый объем изучаемого материала, часто недостаточно представительный для изучаемой среды;
- низкая производительность во времени.

Помимо перечисленных недостатков, получению представительных теплофизических данных препятствует то, что в литературе редко встречается подробное квалифицированное литологическое описание изучавшихся коллекций, а данные различных справочников в большинстве случаев содержат только диапазоны теплофизических свойств без необходимой статистической информации.

На этом фоне продолжающееся развитие бесконтактного неразрушающего прецизионного высокопроизводительного метода оптического сканирования, свободного от большинства недостатков других методов и позволяющего обеспечить одновременные бесконтактные неразрушающие измерения комплекса теплофизических свойств – теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости – с учетом анизотропии и неоднородности грунтов, открывает качественно новые возможности для создания новых баз данных по теплофизическим свойствам грунтов и новые перспективы для изучения корреляционных зависимостей между теплофизическими свойствами и другими показателями состава, состояния и физических свойств.

Показано, что на основе усовершенствованной экспериментальной аппаратурно-методической базе становятся возможными массовые измерения теплофизических свойств на представительных коллекциях образцов грунтов и более надежное изучение корреляционных связей с другими физическими свойствами. В связи с тем, что существенная тепловая неоднородность грунтов

может искажать результаты изучения корреляционных связей, необходимо обеспечить измерения всех изучаемых свойств на одних и тех же образцах грунтов. Основными результатами массовых измерений теплофизических свойств грунтов должны стать: 1) создание представительной базы данных грунтов; 2) получение надежных корреляционных связей между теплофизическими свойствами и показателями состава, состояния и физических свойств; 3) оценка теплового режима в основании инженерного сооружения при проведении математического моделирования процессов теплопереноса в системе фундамент-грунт.

Результатом проведенного анализа стало определение основных путей по созданию новой аппаратурно-методической базы, способной обеспечить получение надежной информации о теплофизических свойствах грунтов при решении различного рода прикладных и фундаментальных инженерно-геологических задач.

Во второй главе приведены результаты разработки методики комплексного определения теплофизических свойств дисперсных грунтов, охарактеризована усовершенствованная аппаратурно-методическая база теплофизических исследований и результаты ее адаптации для решения инженерно-геологических задач.

Рассмотрены основные принципы действия и приведены технические характеристики методов и приборов оптического сканирования и линейного источника для определения теплофизических свойств дисперсных грунтов.

Показано, что наилучшие результаты теплофизических измерений методом оптического сканирования соответствуют случаю, когда теплофизические свойства стандартных образцов близки к теплофизическим свойствам изучаемых образцов грунтов. Для случаев, когда значения теплофизических свойств исследуемых образцов не попадают в диапазон значений первоначально выбранных стандартных образцов, установлены значения необходимых корректирующих поправок. В результате проведенной работы на основе теоретических расчетов и многократных измерений на стандартных образцах тепло- и температуропроводности (с диапазонами 0,194-6,52 Вт/(м·К) для теплопроводности и 0,092-3,06 м²/с для температуропроводности) были осуществлены оценки и учет систематических погрешностей теплофизических измерений образцов грунтов, что обеспечило прецизионный уровень измерений с общей погрешностью не более ±3% для теплопроводности, ±4% для температуропроводности, ±5% для объемной теплоемкости (при доверительной вероятности 0,95).

Установлена зависимость систематической погрешности измерений от выбранных параметров режима (рабочей базы, скорости сканирования, мощности источника нагрева, диаметра пятна нагрева) и стандартных образцов при измерениях с помощью метода и аппаратуры оптического сканирования.

Проведены оценки глубины зоны теплового возбуждения для методов оптического сканирования и линейного источника тепла, позволившие определить параметры режимов измерений, при которых достигается необходимая толщина информативной рабочей зоны, а погрешность измерений теплопроводности не выходит за пределы заданной (для большинства задач – не более $\pm 5\%$). Полученные результаты дают возможность выявлять причины расхождений результатов измерений теплопроводности, проводимых разными методами измерений на образцах ограниченной толщины, сопоставлять возможности рассмотренных методов измерений в отношении глубинности исследований и определять области применимости данных методов измерений.

Поскольку методика исследований теплофизических свойств грунтов предполагает нагрев образцов оптическим сосредоточенным источником тепла постоянной мощности, установлено, при каких параметрах и режимах аппаратуры температура в точке нагрева не выйдет за нормативные пределы. Это необходимо для недопущения испарения и миграции влаги, а также перегрева образца, что может привести к большим погрешностям и некорректным результатам измерений.

Проведенный расчет температурного поля изучаемых образцов грунтов при их нагреве в процессе измерений позволил определить оптимальные параметры и режим работы установки оптического сканирования, которые позволяют добиться прецизионного уровня полученных результатов измерений теплофизических свойств образцов грунтов.

В результате теоретических и экспериментальных работ установлено, что несмотря на свои многочисленные преимущества по сравнению с аналогами, ранее созданная аппаратура оптического сканирования не могла должным образом обеспечить прецизионные измерения теплофизических свойств несвязных грунтов, так как цели ее разработки и весь опыт ее использования в геолого-геофизических работах были связаны только с изучением скальных и полускальных грунтов.

В связи с этим были выполнены работы с целью адаптации метода оптического сканирования для измерений теплофизических свойств несвязных грунтов. В результате была разработана специальная измерительная ячейка,

позволяющая определять теплофизические свойства песчаных грунтов с высокой точностью.

Как уже говорилось выше, методика оптического сканирования позволяет определять не только комплекс теплофизических свойств, но и тепловую анизотропию образцов грунтов. В результате рассмотрены случаи тепловой анизотропии и показана особенность измерений теплофизических свойств анизотропных образцов грунтов, имеющих коэффициент тепловой анизотропии до 1,5.

Еще одним преимуществом разработанной методики теплофизического изучения грунтов является то, что по сравнению со всеми другими методами для измерений теплофизических свойств впервые обеспечивается возможность регистрировать непрерывное распределение теплофизических свойств – теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости – вдоль каждой линии сканирования длиной в диапазоне 30-350 мм.

Эта особенность оптического сканирования может быть использована для создания пространственных изображений теплофизических свойств по площади образцов грунтов. В результате проведенных детальных исследований теплофизических свойств плоского образца известняка и последующей обработки экспериментальных данных впервые были получены пространственные изображения распределения теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, тепловой инерции и пористости по всей площади исследуемого образца.

Из ранее заявленных технических характеристик установки оптического сканирования следовало, что она не способна обеспечивать достаточно точные измерения теплопроводности (с погрешностью не более $\pm 5\%$) в области ее низких значений (ниже 0,15 Вт/(м·К)). Для анализа причин такой особенности данного метода были проведены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых подтвердилось, что в области низких значений теплопроводности установка оптического сканирования, при данных параметрах и режимах, не позволяет определять теплофизические свойства с высокой степенью точности.

Для случая применения метода линейного источника проанализированы особенности измерений, связанные с тем, что теоретическая модель метода линейного источника для измерений теплопроводности основана на предположении, что среда, окружающая линейный источник, является бесконечной. В этом случае зависимость температуры линейного источника от натурального логарифма времени является линейной при больших значениях $\ln(t)$. В то же время в экспериментальной модели размеры образца конечны,

что приводит к отклонению зависимости температуры от логарифма времени от линейности в определенном интервале времени и, в конечном итоге, может являться источником систематической погрешности измерений теплофизических свойств. В результате проведенного изучения несоответствия теоретической и экспериментальной моделей метода линейного источника установлена зависимость систематической погрешности от толщины образца и времени проведения опыта при измерениях теплопроводности с учетом влияния конечных размеров исследуемых образцов. В результате стал возможным учет данного фактора, что обеспечило понижение общей погрешности измерений теплопроводности до $\pm 3\%$.

Для проведения исследований теплофизических свойств несвязных образцов грунтов методом линейного источника осуществлена модификация аппаратной части ранее созданной измерительной установки. В результате разработанная экспериментальная модель метода и модификация прибора линейного источника позволили обеспечить проведение измерений теплопроводности несвязных образцов грунтов на необходимом метрологическом уровне.

В третьей главе рассмотрена методика комплексных теплофизических исследований дисперсных грунтов с помощью аппаратно-методического комплекса, созданного на основе совместного применения методов оптического сканирования и линейного источника. Проведены экспериментальные исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов Московского региона. Создана представительная база данных по теплофизическим свойствам и показателям состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

Рассмотренная выше аппаратно-методическая база для исследования теплофизических свойств горных пород впервые находит применение в области инженерной геологии. Поэтому применение методов оптического сканирования и линейного источника в инженерной геологии потребовало создания специальной методики исследований теплофизических свойств грунтов. Разработанная методика комплексного определения теплофизических свойств дисперсных грунтов с помощью аппаратно-методического комплекса включает: 1) подготовку образцов; 2) выбор экспериментального оборудования для определения теплофизических свойств; 3) комплексное лабораторное определение показателей состава, состояния и физических свойств; 4) обработку полученных результатов.

При исследованиях по разработанной методике в общем виде можно выделить 4 основных этапа:

- 1) планирование эксперимента и подготовка образцов к исследованиям;
- 2) параллельное экспериментальное определение теплофизических и физических свойств грунтов;
- 3) создание базы данных теплофизических параметров и показателей состава, состояния и физических свойств грунтов;
- 4) корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязи теплофизических и физических свойств грунтов.

В данной работе определению теплофизических свойств подвергались дисперсные грунты, отобранные в пределах Московского региона. Глинистые грунты представляли собой три стратиграфо-генетических комплекса:

- 1) покровные суглинки (pr Q_{III-IV});
- 2) озерно-ледниковые суглинки (lg Q_{III-IV});
- 3) моренные суглинки (g Q_{II}).

Песчаный грунт был представлен аллювиальными и флювиогляциальными отложениями. Подготовка образцов песчаного грунта для определения теплофизических свойств заключалась в разделении на следующие фракции: 1) 0,05 – 0,25 мм; 2) 0,25 – 0,5 мм; 3) 0,5 – 1,0 мм.

С помощью аппаратно-методического комплекса, созданного на основе совместного применения методов оптического сканирования и линейного источника, а также стандартных лабораторных методов исследования физических свойств грунтов, проведены массовые экспериментальные исследования теплофизических свойств и показателей состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

По результатам экспериментальных определений теплофизических свойств и показателей состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов созданы представительные базы данных по свойствам, приведенным в виде таблицы 1 для глинистых грунтов и таблицы 2 для песчаных.

Таблица 1

Вид базы данных теплофизических свойств и показателей состава, состояния и физических свойств глинистых грунтов Московского региона

№ образца	λ , Вт/(м·К)	C_p , 10^6 Дж/(м ³ ·К)	W , д.е.	S_r , д.е.	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	ρ_d , г/см ³	e , д.е.	W_L , %	W_p , %	I_p , д.е.	I_L , д.е.
-----------	-------------------------	--	---------------	-----------------	-------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------	--------------	--------------	-----------------	-----------------

Таблица 2

Вид базы данных теплофизических свойств и показателей состава, состояния и физических свойств песчаных грунтов Московского региона

№ образца	λ , Вт/(м·К)	C_p , 10^6 Дж/(м ³ ·К)	W , д.е.	S_r , д.е.	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	e , д.е.
-----------	-------------------------	--	---------------	-----------------	-------------------------------	---------------------------------	---------------

где λ – теплопроводность; C_p – объемная теплоемкость; W – влажность; Sr – степень влажности; ρ – плотность; ρ_s – плотность частиц грунта; ρ_d – плотность сухого грунта; e – пористость; W_L – влажность на границе текучести; W_p – влажность на границе раскатывания; I_p – число пластичности; I_L – показатель текучести.

Четвертая глава посвящена методике прогнозной оценки теплофизических свойств в зависимости от показателей состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов. На основе проведенного корреляционно-регрессионного анализа взаимосвязи теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов установлены математические уравнения связи данных параметров между собой.

Обработка результатов экспериментальных исследований теплофизических свойств грунтов для прогнозной оценки по другим физическим показателям проводилась на основе множественного корреляционного и регрессионного анализов.

В общем случае методику прогнозной оценки можно представить в виде следующего алгоритма:

1. Построение концептуальной содержательной модели.
2. Проверка гипотезы о соответствии эмпирических распределений нормальному закону.
3. Проверка линейности рассматриваемых взаимосвязей.
4. Составление регрессионных уравнений рассматриваемых взаимосвязей.
5. Проверка адекватности полученных уравнений регрессии поставленным целям.
6. Установление толерантных пределов для индивидуальных значений.

Первой операцией прогнозной оценки является построение содержательной концептуальной модели, которая создается на основе имеющихся литературных данных и наших представлений о физической сущности взаимосвязи исследуемых показателей. Другими словами, это подразумевает набор физических показателей состава и состояния грунтов, оказывающих существенное влияние на теплофизические свойства.

На следующем этапе проверяется гипотеза о соответствии распределений исследуемых параметров нормальному закону распределения.

Третьим этапом прогнозной оценки является проверка линейности рассматриваемых взаимосвязей. В случае наличия нелинейных зависимостей осуществляется предварительная линеаризация путем подбора соответствующих функций.

На следующем, четвертом этапе прогноза, составляются регрессионные уравнения связи теплофизических свойств с физическими показателями состава и состояния грунтов, где можно выделить следующие подэтапы:

- построение корреляционной матрицы;
- выявление показателей с высокими значениями парных коэффициентов корреляции;
- расчет стандартизированных коэффициентов;
- расчет доли вкладов переменных величин;
- расчет нестандартизированных коэффициентов;
- расчет свободных членов;
- подстановка рассчитанных коэффициентов и вывод регрессионного уравнения.

В общем виде линейное уравнение множественной регрессии, описывающее связь теплофизических характеристик и количественных показателей свойств грунтов, имеет вид:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p,$$

где Y – теплофизические характеристики грунтов; X_0 – фиктивная переменная, вводимая для оценки свободного члена b_0 и равная единице; X_1, X_2, \dots, X_p – количественные показатели свойств грунтов; b_1, b_2, \dots, b_p – нестандартизированные коэффициенты, подлежащие определению.

В качестве элемента корреляционной матрицы используется парный коэффициент корреляции. Пример матрицы парных коэффициентов корреляции взаимосвязи объемной теплоемкости и физических показателей глинистых грунтов представлен в таблице 3.

Используя корреляционную матрицу, рассчитываются стандартизированные коэффициенты регрессии a_i . Далее рассчитываются множественные коэффициенты детерминации R^2 и корреляции R , которые можно рассматривать как показатели эффективности регрессионной модели и как меру тесноты связи при линейной регрессии.

Для исключения неинформативных переменных определяется их доля вклада (вес) в уравнении регрессии. За пороговое значение доли вклада в уравнении регрессии принимают 0,05. Значения переменных характеристик, у которых доля вклада менее 0,05, исключаются из расчета.

Матрица парных коэффициентов корреляции взаимосвязи объемной теплоемкости и показателей состава, состояния и физических свойств глинистых грунтов

	$C_p, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	W, д.е.	Sr, д.е.	$\rho,$ г/см ³	$\rho_s,$ г/см ³	$\rho_d,$ г/см ³	e, д.е.	W _L , %	W _p , %	I _p , д.е.	I _L , д.е.
$C_p, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	1.000										
W, д.е.	0.849	1.000									
Sr, д.е.	0.851	0.922	1.000								
$\rho,$ г/см ³	0.395	0.349	0.614	1.000							
$\rho_s,$ г/см ³	0.072	0.060	0.071	0.020	1.000						
$\rho_d,$ г/см ³	-0.193	-0.339	-0.031	0.754	-0.024	1.000					
e, д.е.	0.206	0.344	0.037	-0.748	0.056	-0.996	1.000				
W _L , %	0.173	0.309	0.045	-0.628	0.219	-0.864	0.865	1.000			
W _p , %	0.147	0.272	-0.005	-0.690	0.074	-0.898	0.894	0.910	1.000		
I _p , д.е.	0.160	0.274	0.093	-0.396	0.338	-0.604	0.611	0.858	0.568	1.000	
I _L , д.е.	0.104	0.183	0.076	-0.253	-0.074	-0.379	0.394	0.051	0.067	0.019	1.000

После исключения неинформативных переменных производится перерасчет стандартизированных коэффициентов регрессии и рассчитываются нестандартизированные коэффициенты и свободный член. В результате получаем уравнение регрессии (модель) в окончательном виде.

На пятом этапе прогнозной оценки проверяется адекватность полученного уравнения регрессии поставленным целям. Отсутствие такой проверки существенно снижает надежность выводов, получаемых при анализе результатов моделирования. Это соответствие контролируется множественным коэффициентом корреляции связи физических характеристик грунтов и прогнозируемого теплофизического показателя. В зависимости от величины множественного коэффициента корреляции модель либо принимается, либо отбрасывается. За пороговое значение множественного коэффициента корреляции принимают 0,71, так как при этом поглощается более 50 % общей дисперсии прогнозируемого показателя.

Другой мерой адекватности содержательной концептуальной модели является расчет стандартной ошибки прогноза и средней ошибки прогноза по независимой совокупности.

После того, как получены уравнения связи теплофизических и физических свойств грунтов, устанавливаются толерантные пределы для индивидуальных значений зависимых переменных, т.е. такие пределы, в которых находится $(1-\alpha)$ 100% всех индивидуальных значений зависимых переменных.

При прогнозной оценке в качестве зависимых переменных были использованы теплопроводность λ и объемная теплоемкость C_p связных и несвязных грунтов Московского региона.

В результате установлено, что для изученных стратиграфо-генетических комплексов дисперсных грунтов самыми оптимальными математическими уравнениями связи являются уравнения, представленные в таблице 4.

Таблица 4

Прогнозные уравнения связи теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов

Тип грунта	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Стандартная ошибка
Покровные суглинки	$C_p = 1,49 \cdot Sr + 2,01$	0,84	0,32
	$\lambda = 0,19 \cdot Ln Sr + 1,92$	0,88	0,18
Озерно-ледниковые суглинки	$C_p = 1,39 \cdot Sr + 1,86$	0,90	0,21
	$\lambda = 0,28 \cdot Ln Sr - 0,27\rho - 0,05 W_p + 3,68$	0,89	0,26
	$\lambda = 0,26 \cdot Ln Sr + 2,33$	0,82	0,31
Моренные суглинки	$C_p = 1,49 \cdot Sr + 1,82$	0,90	0,21
	$\lambda = 0,26 \cdot Ln Sr + 2,51$	0,88	0,24
Вся совокупность	$C_p = 1,49 \cdot Sr + 1,87$	0,85	0,26
	$\lambda = 0,31 \cdot Ln Sr - 1,21 \cdot \rho + 2,15 \cdot \rho_d + 0,92$	0,86	0,26
	$\lambda = 0,24 \cdot Ln Sr + 2,34$	0,80	0,31

где λ – теплопроводность Вт/(м·К), C_p – объемная теплоемкость, 10^6 Дж/(м³·К), Sr – степень влажности, д.е., ρ – плотность, г/см³, ρ_d – плотность сухого грунта, г/см³, W_p – влажность на границе раскатывания, %.

Из таблицы можно сделать вывод, что на прогноз объемной теплоемкости из всех рассмотренных показателей грунтов значительное влияние оказывает только степень влажности, а на прогноз теплопроводности - степень влажности, плотность, плотность сухого грунта и влажность на границе раскатывания.

Для технологического и качественного графического определения теплопроводности и объемной теплоемкости глинистых грунтов от степени влажности на основе экспериментальных данных построены номограммы, представленные на рис. 1.

На рис. 2 показана номограмма, отображающая зависимость теплопроводности от общей влажности при различных значениях плотности сухого грунта. Анализ рисунка показывает, что наибольшие значения теплопроводности соответствуют максимальной плотности сухого грунта, причем это достигается при сравнительно небольших значениях влажности. По углу наклона экспериментальных прямых изображенных на рисунке можно

судить о резком или плавном возрастании теплопроводности глинистых грунтов в зависимости от влажности и плотности сухого грунта.

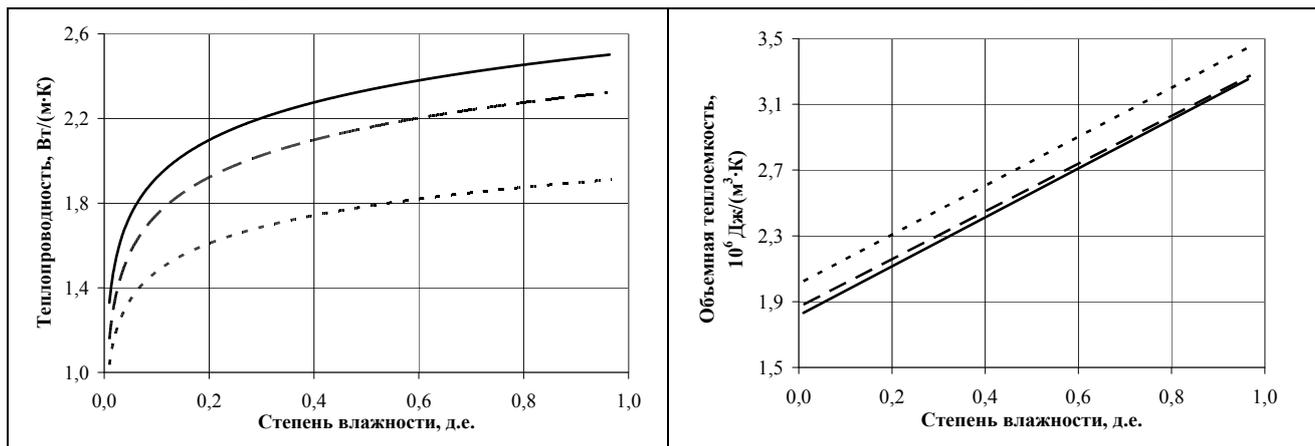


Рис. 1. Зависимость теплопроводности и объемной теплоемкости от степени влажности глинистых грунтов Московского региона. Сплошная линия – моренные отложения, длинный пунктир – озерно-ледниковые отложения, короткий пунктир – покровные отложения.

На рис. 3 представлена построенная по экспериментальным данным номограмма зависимости теплопроводности от степени влажности для песчаных грунтов Московского региона.

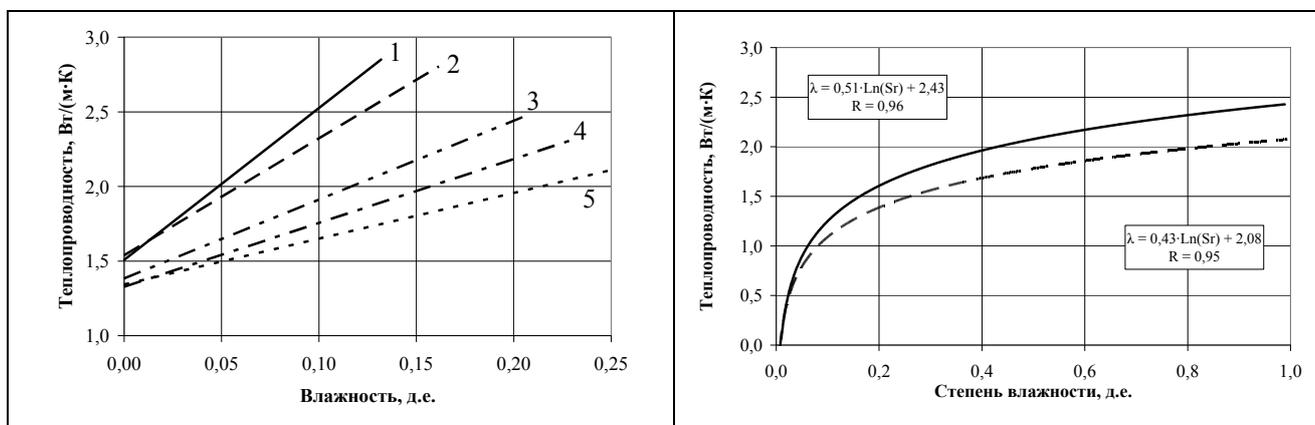


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от общей влажности глинистых грунтов при различных значениях плотности сухого грунта. Вариации значения плотности сухого грунта, г/см^3 : 1 – 1,91-2,00; 2 – 1,81-1,90; 3 – 1,71-1,80; 4 – 1,61-1,70; 5 – 1,50-1,60.

Рис. 3. Зависимость теплопроводности от степени влажности песчаных грунтов Московского региона. Сплошная линия – песок средней крупности, пунктирная линия – песок мелкий.

По результатам проведенного корреляционно-регрессионного анализа появилась возможность прогнозной оценки теплопроводности и объемной теплоемкости по показателям состава, состояния и физических свойств различных разновидностей дисперсных грунтов.

В пятой главе приведены результаты теоретического моделирования теплового режима в системе фундамент-грунт при прогнозировании негативных инженерно-геологических процессов, основанные на применении прецизионных экспериментальных теплофизических данных, полученных с применением разработанной методики измерений.

Изучение теплового режима различных инженерных сооружений в системе фундамент-грунт прежде всего необходимо для обоснования технических и конструктивных решений при проектировании, строительстве и эксплуатации, а также прогноза активизации негативных инженерно-геологических процессов, влияющих на устойчивость инженерных сооружений в условиях значительных колебаний температур. Успешное решение этих задач невозможно без правильного научного понимания тепловых процессов, происходящих в системе фундамент-грунт.

В связи с этим представляется актуальным исследование реальных нелинейных задач теплопроводности с фазовыми превращениями при помощи вычислительного эксперимента, включая построение качественных и приближенных математических моделей изучаемого объекта, позволяющих прогнозировать, регулировать и управлять температурным режимом инженерных сооружений.

Теоретические оценки параметров теплового режима взаимодействия инженерного сооружения с окружающей средой возможны при следующих условиях:

- имеются надежные данные о теплофизических свойствах (теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, коэффициенте линейного теплового расширения), пористости, проницаемости, плотности;
- имеются оценки вариаций температуры приповерхностной зоны;
- имеется техническая и геометрическая характеристика исследуемого сооружения;
- имеется современный программный инструмент для математического моделирования.

В настоящей работе предлагаемый вычислительный алгоритм реализуется на примере исследования теплового режима фундамента и грунтов основания памятника истории и культуры – Китайгородской стены с использованием полученных прецизионных экспериментальных теплофизических данных.

Отобранные для исследований образцы кладки стены, материала фундамента и грунтов основания были представлены красным глиняным

кирпичом, белым и окварцованным известняком, цементным раствором и моренным суглинком.

С помощью аппаратно-методического комплекса, описанного в главе 2, определены теплофизические свойства грунтов и строительных материалов в сухом и водонасыщенном состояниях.

Для решения поставленной задачи с помощью коммерческого симулятора построена теоретическая модель теплового режима грунтов основания и фундамента Китайгородской стены (рис. 4а). Температурный режим определялся заданием годовых колебаний температур на поверхности земли в центральной полосе России (рис. 4б).

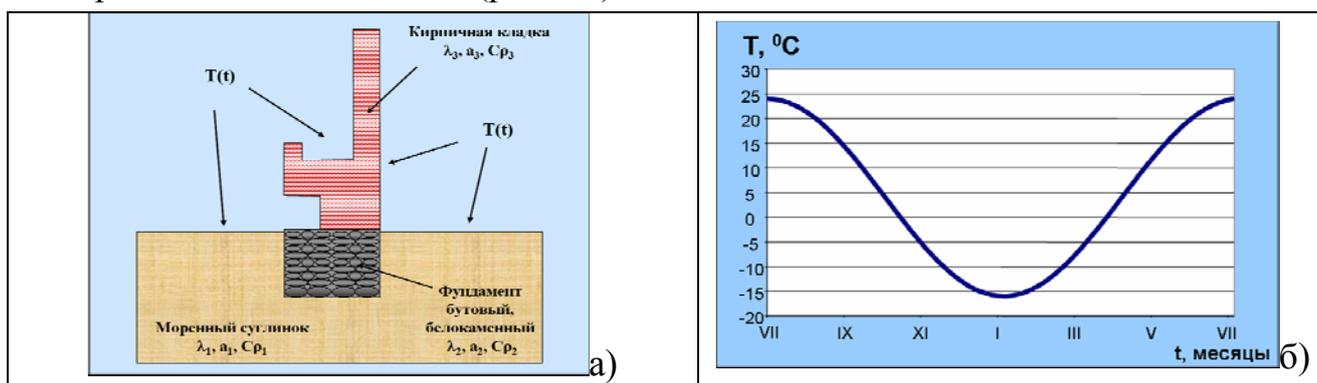


Рис. 4. Расчетная схема для моделирования процессов промерзания и протаивания в системе фундамент-грунт с заданным температурным режимом (λ – теплопроводность, Вт/(м·К); α – температуропроводность, м²/с; C_p – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К), $T(t)$ – сезонные колебания температуры).

В результате нами смоделирована и решена задача по определению теплового режима фундаментов и грунтов основания Китайгородской стены с учетом фазового перехода. Результаты представлены на рис. 5а в виде пространственного распределения температуры в массиве грунта и строительных материалах на момент максимального промерзания в зимний период. На рис. 5б отражено положение нулевой изотермы, соответствующее тому же моменту времени.

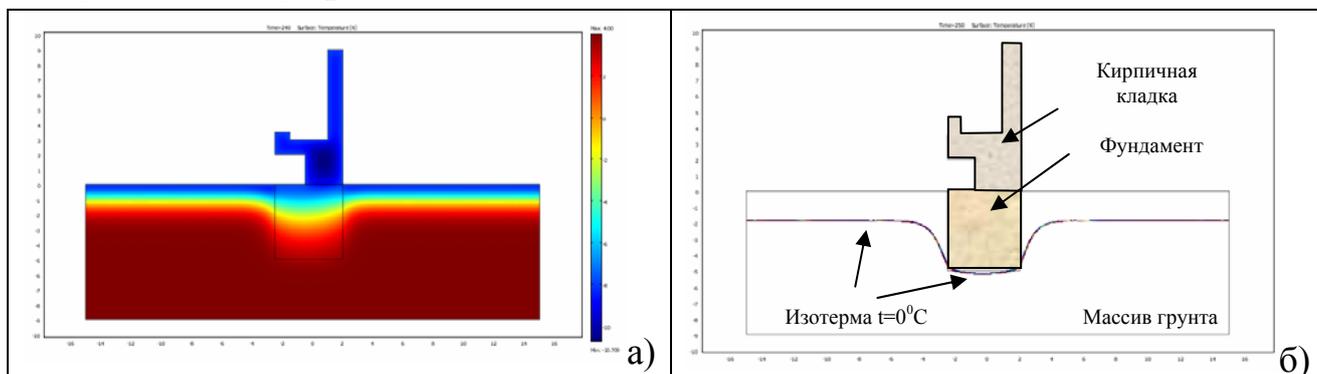
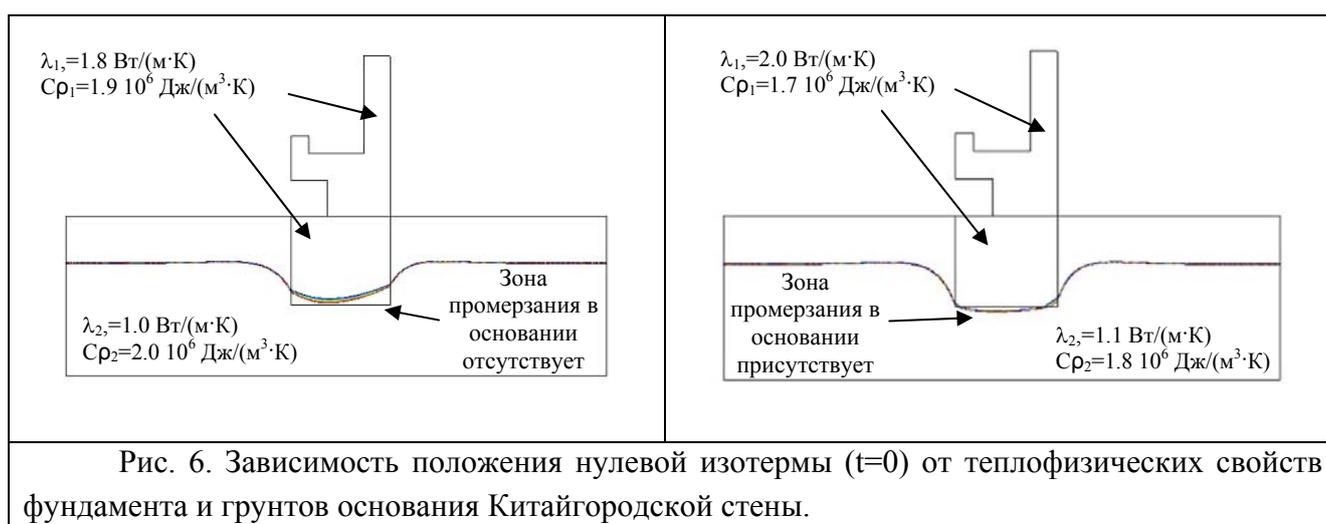


Рис. 5. Пространственное распределение температуры в массиве грунта и строительных материалах Китайгородской стены на момент максимального промерзания в зимний период с изотермой $t=0$ °С сферы взаимодействия.

Как видно из рис. 5а и 5б, за счет более высоких значений теплопроводности материалов кладки и фундамента в отличие от грунта стена является проводником холода в зимний период. В результате температура на глубине до нескольких метров, ниже глубины сезонного промерзания, под фундаментом оказывается отрицательной, что может привести к формированию нормальных и касательных напряжений, направленных к поверхности земли, приводящих к поднятию и деформациям инженерного сооружения. При наступлении теплого периода процесс поднятия сменяется опусканием. Через год ситуация снова повторяется, но с большей интенсивностью.

Согласно базе данных, созданной на основе экспериментальных определений, грунты имеют существенные вариации теплофизических свойств в зависимости от физических. Наряду с этим, в главе 1 охарактеризованы недостатки различных методов и приборов для определения теплофизических свойств, которые могут привести к некорректным или неопределенным результатам, а также недостатки данных литературных источников. Для оценки влияния погрешности определения теплофизических свойств на распределение температуры в массиве грунта было проведено моделирование теплового режима в системе фундамент-грунт при различных значениях теплофизических свойств.

На рис. 6 представлена полученная в результате моделирования зависимость положения нулевой изотермы ($t=0^{\circ}\text{C}$) от вариаций теплофизических свойств.



Из рис. 6 видно, что при изменении значений теплофизических свойств на 5-10 % положение изотермы существенно меняется. Это говорит о том, что использование литературных данных, где для различных грунтов с различными

значениями влажности дают осредненные результаты теплофизических свойств, принципиально не дает возможности зарегистрировать вариации зоны промерзания, что означает потерю важной информации. Как показывают наши исследования, в таких ситуациях погрешности в определении теплопроводности и объемной теплоемкости доходят до 20-30 %, что самым неблагоприятным образом скажется на результатах решения задач, связанных с изучением теплового режима.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что разработанная выше методика позволяет с высокой степенью точности прогнозировать процессы, связанные с промерзанием и протаиванием, позволяют наметить пути решения по локализации этих процессов, а также дать рекомендации для снижения негативных последствий при эксплуатации инженерных сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические выводы и результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что в настоящее время единственным надежным источником данных о теплофизических свойствах грунтов являются лабораторные измерения на образцах.

2. Наилучшими характеристиками с точки зрения определения теплофизических свойств дисперсных грунтов, обладает аппаратурно-методический комплекс, созданный на основе методов и приборов оптического сканирования и линейного источника.

3. Установлены зависимости систематических погрешностей измерений теплофизических свойств от различных факторов и параметров режима, что позволяет получать прецизионные экспериментальные результаты при определении всего комплекса теплофизических свойств дисперсных грунтов.

4. Показано, что детальные экспериментальные исследования теплофизических свойств грунтов методом оптического сканирования позволяют построить пространственные изображения распределения теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости и тепловой инерции по всей площади исследуемого образца.

5. Разработана оригинальная методика исследований теплофизических свойств дисперсных грунтов с помощью применения аппаратурно-методического комплекса, созданного на основе оптического сканирования и линейного источника, впервые использованного для решения инженерно-геологических задач.

6. На основе разработанной методики теплофизических измерений проведены массовые экспериментальные исследования теплофизических свойств и показателей состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

7. Создана представительная база данных о теплофизических свойствах и показателях состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов Московского региона.

8. В результате проведенного корреляционно-регрессионного анализа взаимосвязи теплофизических свойств с показателями состава, состояния и физических свойств дисперсных грунтов получены математические уравнения их связи между собой.

9. Оптимальными математическими уравнениями связи для изученных дисперсных грунтов являются уравнения следующего структурного вида:

- покровные суглинки $C_p = f(S_r), \lambda = f(Ln(S_r));$
- озерно-ледниковые суглинки $C_p = f(S_r), \lambda = f(Ln(S_r), \rho, W_p);$
- моренные суглинки $C_p = f(S_r), \lambda = f(Ln(S_r));$
- вся совокупность глинистых грунтов $C_p = f(S_r), \lambda = f(Ln(S_r), \rho, \rho_d).$

10. Проверка адекватности полученных математических моделей поставленным целям показала их эффективность, поскольку коэффициенты корреляции имеют достаточно высокие значения.

11. По результатам корреляционно-регрессионного анализа установлена возможность прогнозной оценки теплопроводности и объемной теплоемкости по показателям состава, состояния и физических свойств различных разновидностей дисперсных грунтов.

12. Разработаны численная и визуализированная модели прогноза и расчета теплового режима в массиве грунта и фундаменте, позволяющие определять температуру в системе фундамент-грунт на основе детальных экспериментальных данных по теплофизическим свойствам грунтов и строительных материалов.

13. Установлено, что результаты прогноза температуры массива грунта в значительной степени зависят от возможной погрешности задания теплофизических свойств грунта и строительных материалов инженерных сооружений.

14. В результате математического моделирования описаны процессы, связанные с промерзанием и протаиванием, намечены пути локализации этих процессов, даны рекомендации для снижения негативных последствий при эксплуатации инженерных сооружений.

15. Направление дальнейших исследований связано с расширением базы данных по другим генетическим типам и разновидностям грунтов, а также с адаптацией аппаратурно-методического комплекса для определения теплофизических свойств мерзлых грунтов.

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Горобцов Д.Н. Анализ взаимосвязи между теплофизическими свойствами и простейшими физическими показателями моренных суглинков Московского региона // Инженерные изыскания, 2011. №2. С. 22-28.

2. Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Горобцов Д.Н., Коробков Д.А., Есипко О.А., Карасева Т.В., Сиротенко Л.В. Тепловые свойства пород и тепловой поток в районе бурения сверхглубокой Ен-Яхинской скважины // Геология и разведка, 2008, №2. С. 59-65.

3. Попова В.В., Горобцов Д.Н., Попов Ю.А. Глубина зоны теплового возбуждения образцов горных пород при измерениях теплопроводности // Геология и разведка, 2011, №3.

4. Mayr, S., Burkhardt, H., Popov, Y., Romushkevich, R., Miklashevskiy, D., Gorobtsov, D., Heidinger, P. & Wilhelm, H., 2009. Physical rock properties of core from the Chesapeake Bay impact structure (Eyreville boreholes), in GSA Special Paper 458, The ICDP-USGS Deep Drilling Project in the Chesapeake Bay Impact Structure: Results from the Eyreville Coreholes, eds. Gohn, G. S., Koeberl, C., Miller, K. G. & Reimold, W. U. GSA.

В других изданиях:

5. Горобцов Д.Н. Анализ взаимосвязи теплофизических и простейших физических свойств грунтов московского региона. Доклады X Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: 2011.

6. Горобцов Д.Н. Анализ взаимосвязи теплофизических свойств грунтов от естественной влажности. Сборник тезисов докладов Научной конференции «Молодые – наукам о Земле». М.: РГГРУ, 2010.

7. Горобцов Д.Н. Изучение теплового режима фундаментов и грунтов оснований методом численного моделирования. Сборник тезисов докладов Научной конференции «Молодые – наукам о Земле». М.: РГГРУ, 2008, с. 121.

8. Горобцов Д.Н. Пути совершенствования аппаратурно-методической базы для оценки теплофизических свойств грунтов при инженерно-геологических исследованиях. Доклады IX Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: 2009, 3, с. 74.

9. Горобцов Д.Н., Попов Ю.А., Коробков Д.А. Бесконтактные измерения тепловых свойств грунтов и промышленных материалов методом оптического сканирования. Материалы научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: ПНИИИС, 2007, с. 24-27.

10. Горобцов Д.Н., Попов Ю.А., Пендин В.В. Теоретический анализ теплового режима фундаментов и грунтов оснований. Сборник трудов Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса ВУЗов «Записки горного института». Санкт-Петербург, 2008.

11. Горобцов Д.Н., Черепанов А.О., Попов Ю.А., Миклашевский Д.Е. Усовершенствование аппаратуры для неразрушающих бесконтактных прецизионных измерений тепловых свойств горных пород. Доклады IX Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: 2009, 2, с. 220.

12. Попов Ю. А., Горобцов Д. Н., Черепанов А.О. Метод и развитие аппаратуры для неразрушающих бесконтактных прецизионных измерений тепловых свойств горных пород. Сборник трудов X Юбилейной международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех». Ухта, 2009.

13. Popov Yu., Gorobtsov D., Novikov S., Safonov S., Korobkov D., Mshiladze A. Sensitivity study of the empirical theoretical model of the thermal conductivity of rock. Abstract volume of X General Assembly of IASPEI, Cape Town, South Africa, January 9-16, 2009.

14. Popov Yu., Korobkov D., Romushkevich R., Gorobtsov D., Burkhardt H., Mayr S., Wilhelm H. Thermal properties of rocks from crossed by the borehole Eyreville-B, Chesapeake Peninsula (Preliminary data). Abstract Volume of the XXI Assembly of American Geological Society. 2007, Denver, USA.

15. Popov Yu., Tarelko N., Romushkevich R., Gorobtsov D., Miklashevskiy D., Esipko O., Cherepanov A., Tatarinov V. Experimental geothermal data from the Yen-Yakhinskaya and Tyumen superdeep wells (West Siberia, Russia). Abstract volume of X General Assembly of IASPEI, Cape Town, South Africa, January 9-16, 2009.