

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
Сибирского отделения РАН



АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ
И ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ В АРКТИЧЕСКИХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ
ТЕРРИТОРИЯХ (ТЭГАСТ–2025)

Расширенные тезисы докладов
ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
посвященной 95-летию со дня рождения
члена-корреспондента РАН, д.г.-м.н. Балобаева Вениамина Тихоновича
и 95-летию со дня рождения д.г.н. Павлова Александра Владимировича

г. Якутск (Россия), 4–6 июня 2025 г.

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук М. Н. Железняк

Якутск, 2025

УДК 551.34+550.361+536+620.9
ББК 26.36+26.21+22.37+31
А43

Редакционная коллегия:
А. Ф. Жирков, А. Р. Кириллин

Рецензенты:
кандидат технических наук А. Д. Набережный,
кандидат геолого-минералогических наук В. П. Семенов

Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях : сб. тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (ТЭГАСТ–2025), посвященной 95-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН д.г.-м.н. Балобаева Вениамина Тихоновича и 95-летию со дня рождения д.г.н. Павлова Александра Владимировича (г. Якутск, 4–6 июня 2025 г.) / отв. ред. М. Н. Железняк ; [ред. коллегия : А. Ф. Жирков, А. Р. Кириллин] ; Сибирское отд-е РАН, ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. – Якутск : Изд-во ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2025. – 124 с. – Сетевое издание. — ISBN 978-5-93254-227-9. – Текст : электронный. – URL: <https://имзсоран.рф/wp-content/uploads/2025/12/Sbornik-tezisov-TEGAST-2025.pdf>.

Сборник включает тезисы докладов, представленных на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в Арктических и Субарктических территориях» (ТЭГАСТ–2025), посвященной 95-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН, д.г.-м.н. Балобаева Вениамина Тихоновича и 95-летию со дня рождения доктора географических наук Павлова Александра Владимировича. В трудах конференции отражены результаты обсуждений исследований проблем в области геотеплофизики и геотермии криолитозоны. Тексты тезисов публикуются в соответствии с авторскими оригиналами.

УДК 551.34+550.361+536+620.9
ББК 26.36+26.21+22.37+31

ISBN 978-5-93254-227-9

© ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН, 2025

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
- СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
- ФГБУН ИНСТИТУТ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ им. П. И. МЕЛЬНИКОВА СО РАН
- ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА им. М. К. АММОСОВА
- ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА им. В. П. ЛАРИОНОВА СО РАН
- ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НЕФТИ И ГАЗА СО РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

чл.-корр. РАН д.г.-м.н. Железняк М. Н. – директор ИМЗ СО РАН, Якутск;

Сопредседатели:

акад. РАН д.ф.-м.н. Маркович Д. М. – директор ИТ СО РАН, Новосибирск;

акад. РАН д.т.н. Стенников В. А. – директор ИСЭМ СО РАН, Иркутск;

акад. РАН д.т.н. Лебедев М. П. – директор ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

Члены комитета:

д.т.н. Баранов И. В. – президент МАХ, профессор, зав. кафедрой университета ИТМО, Санкт-Петербург;

д.б.н. Николаев А. Н. – ректор СВФУ, Якутск;

д.г.-м.н. Дучков А. Д. – профессор, г.н.с. ИНГГ СО РАН, Новосибирск;

д.ф.-м.н. Саввинова Н. А. – профессор, зав. кафедрой ФТИ СВФУ, Якутск;

д.т.н. Лепешкин А. Р. – г.н.с. ФГУП ЦИАМ, Москва;

к.т.н. Лукин Е. С. – и.о. директора ИФТПС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

д.т.н. Рожин И. И. – заместитель директора ИПНГ ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

д.г.н. Григорьев М. Н. – заместитель директора ИМЗ СО РАН, Якутск;

д.т.н. Курилко А. С. – г.н.с. ИГДС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

д.т.н. Тимофеев А. М. – г.н.с. ИФТПС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

д.т.н. Степанов А. В. – г.н.с. ИФТПС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск;

д.ф.-м.н. Тимофеев А. М. – профессор ФТИ СВФУ, Якутск;

д.т.н. Чжан Р. В. – г.н.с. ИМЗ СО РАН, Якутск.

Секретариат комитета:

к.т.н. Жирков А. Ф., к.г.-м.н. Кириллин А. Р., к.т.н. Степанов А. А.,
к.т.н. Винокурова Т. А., м.н.с. Сивцев М. А., стар. препод. Егорова Г. Н.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**Председатель:**

Железняк М. Н., д.г.-м.н., директор ИМЗ СО РАН.

Зам. председателя:

Жирков А. Ф., к.т.н., в.н.с. ИМЗ СО РАН.

Члены комитета:

д.ф.-м.н. Саввинова Н. А., д.т.н. Рожин И. И., к.т.н. Большев К. Н., к.г.-м.н. Семенов В. П.,
к.г.-м.н. Кириллин А. Р., к.г.н. Варламов С. П., к.т.н. Солдатов С. Н., к.т.н. Алексеева О. И.,
к.т.н. Малышев А. В., к.т.н. Винокурова Т. А.

Секретариат комитета:

н.с. Мисайлов И. Е., м.н.с. Сивцев М. А., вед. инж. Рыбчак А. А.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ Железняк М. Н.....	8
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	10
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ	
Большев К. Н., Малышев А. В., Тимофеев А. М., Степанов А. В.....	10
ТЕПЛОФИЗИКА ЛАНДШАФТОВ АЛЕКСАНДРА ВЛАДИМИРОВИЧА ПАВЛОВА Варламов С. П., Жирков А. Ф.	13
ВЕНИАМИН ТИХОНОВИЧ БАЛОБАЕВ – ОСНОВОПОЛОЖНИК НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОТЕРМИЯ МЕРЗЛОЙ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ Железняк М. Н.	19
ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В ЗОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ Рожин И. И.	28
СЕКЦИЯ 1. ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ	32
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ БЕСТРУБОПРОВОДНОЙ ДОСТАВКИ ГАЗА Бубнова А. Р., Калачева Л. П., Иванова И. К.	32
АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ CO ₂ В ГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ Иванов В. К., Калачева Л. П., Иванова И. К.	35
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАКАЧКЕ ГАЗА В ПОДМЕРЗЛОТНЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР Иванов Г. И., Рожин И. И.	38
ПРОЦЕСС НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА С УЧЕТОМ ЗАМЕЩЕНИЯ CO ₂ -CH ₄ В ГИДРАТЕ МЕТАНА Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л., Бельских Д. С.	41
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ Саввинова Н. А., Тимофеев А. М., Егорова Г. Н.	44
ГИДРАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ДОБЫЧИ, ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ Семенов М. Е., Стопорев А. С., Мирзакимов У. Ж., Павельев Р. С., Гнездилов Д. О., Манаков А. Ю., Варфоломеев М. А.	47

ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ Семенов С. О., Малышев А. В., Большев К. Н., Саввинова Н. А.	50
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В КЕЛОРСКОМ ГОРИЗОНТЕ КЭДЭРГИНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ Сивцев А. И., Рожин И. И.	53
СЕКЦИЯ 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ	57
БЫСТРОВОВОЗВОДИМЫЕ ЗДАНИЯ ИЗ ЛСТК ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ: РАЗРАБОТКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Корнилов А. Т., Корнилов Т. А.	57
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА Никифоров А. С., Матвеев А. Д., Егорова Г. Н.	61
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА НА УГЛЕ И ДРЕВЕСИНЕ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ Ноев С. А., Троев Е. Я., Боякинов Е. Ф.	63
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТА КРАЙНЕГО СЕВЕРА Охлопков А. Ф., Боякинов Е. Ф.	65
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА Петров А. В., Егорова Г. Н.	68
РАЗРАБОТКА ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧЕЙ НАОН И КОН Петров М. Д., Боякинов Е. Ф.	69
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ Прохоров С. А., Гермогенов А. Г., Боякинов Е. Ф. Троев Е. Я.	72
МЕТОДЫ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ГАЗОВЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ Слободчиков Е. Г., Сивцев И. П.	73
КОЛИЧЕСТВО НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ Таппырова Н. И., Кравцова О. Н., Протодьяконова Н. А., Тимофеев А. М., Степанов А. В.	77
СЕКЦИЯ 3. ГЕОТЕПЛОФИЗИКА	81
СВЯЗЬ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ГРУНТОВ С ОСОБЕННОСТЯМИ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОРЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ CALMR40) Андрюшин Д. С., Разумовский Р. О., Сериков С. И.	81

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ) Варламов С. П.....	84
ОСОБЕННОСТИ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ В СУБАКВАЛЬНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ТОЛЩАХ В ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ Григорьев М. Н.	88
СЛОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ПРОМОРОЖЕННОСТИ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ Ефремов В. Н.....	91
РАСЧЕТНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ Литвинцев К. Ю., Финников К. А., Пономарева Т. В., Пономарев Е. И.	95
ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СМЕРЗАНИЯ СЫПУЧЕГО ГРУЗА Попов В. И.	98
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ Попов С. Н., Федоров Ю. Ю., Унжаков А. С.....	101
ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ Семенов В. П., Мисайлов И. Е.....	105
ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В Г. ЯКУТСКЕ И РЕАЛИИ Скачков Ю. Б.....	107
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ НА УЧАСТКЕ 148 КМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «КОЛЫМА» Сыромятников И. И., Литовко А. В., Кириллин А. Р., Шапошников Г. И., Смирнов Ю. А.	111
ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ Тихонова С. А., Шеин Н. С., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А.	114
МИГРАЦИЯ ВЛАГИ В ОКОЛОСВАЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ Турантаев Е. Е., Набережный А. Д.....	117
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ МЕРЗЛЫХ/ТАЛЫХ ГРУНТОВ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ Шеин Н. С., Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Тарская Л. Е.....	120

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время вопросы освоения Арктических и Субарктических территорий вызывают повышенный интерес в мировом сообществе. Помимо геополитических причин этого интереса, несомненны перспективы больших запасов сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. В частности, на этой территории сосредоточены крупные месторождения нефти, природного газа, каменного угля, редкоземельных металлов и других видов полезных ископаемых.

Поиски и создание новых методов и средств транспортировки электроэнергии, создание новых материалов, получение электроэнергии с помощью возобновляемых и альтернативных источников – все эти направления актуальны, и без них невозможно рациональное и успешное освоение территорий.

Важно отметить, что северные территории обладают уникальной природно-экологической системой, являющейся климатообразующим фактором для планеты, неповторимым животным и растительным миром. Именно поэтому остро стоит задача бережного и рационального освоения северных территорий, предполагающего принципиально новый подход в технических и технологических решениях при освоении природных ресурсов, сохранение природной среды и создание комфортных условий для проживания людей.

С 1993 года в г. Якутске регулярно проводится региональная конференция «Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера», посвященная памяти выдающегося ученого и организатора науки, основоположника теплофизического направления в Якутии д.т.н., профессора Николая Сергеевича Иванова. Конференция имеет свои научные традиции и является площадкой для общения и обмена опытом ведущих ученых и специалистов, а также для профессионального роста молодых ученых, аспирантов и студентов. С 2019 года конференция имеет статус всероссийской.

В этом году конференция посвящена 95-летию со дня рождения Вениамина Тихоновича Балобаева, члена-корреспондента РАН, доктора геолого-минералогических наук, геофизика, геотермика, одного из крупнейших мерзловедов России, признанного специалиста в области изучения геотеплофизических процессов в мерзлой зоне литосферы и 95-летию со дня рождения Александра Владимировича Павлова, доктора географических наук, отличника разведки недр, ветерана труда, заслуженного ветерана Сибирского отделения РАН, всемирно известного ученого и специалиста в области теплофизики ландшафтов, климатологии и геокриологического прогноза.

На конференции будут обсуждены проблемы современной энергетики, новых методов и средств в решении теплофизических задач для эффективного энергообеспечения и энергосбережения Арктических и Субарктических территорий, планируется обмен опытом в исследованиях криогенных процессов, их влияния на инженерные сооружения, с целью разработки систем ранней диагностики возникновения опасных процессов, ведущих к катастрофическим последствиям для экономики, экологии и жизнедеятельности.

Михаил Николаевич Железняк,
чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., директор ИМЗ СО РАН,
председатель оргкомитета конференции

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Большев К. Н., Малышев А. В., Тимофеев А. М., Степанов А. В.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск)

Дисперсный грунт – многокомпонентная среда, содержащая не только минеральный компонент определенного гранулометрического состава, но и влагу, лед, органические примеси и прочие компоненты (соли, техногенные загрязнения и т. д.). Физические процессы в таких средах протекают сложно и зависят от взаимодействия между компонентами. Вода, лед и влагоперенос в дисперсном грунте в значительной степени определяют его теплофизические и механические свойства, а также параметры механических процессов, сопутствующих фазовым переходам. При промерзании и оттаивании грунта происходит перераспределение и консолидация поровой влаги, что приводит к образованию неоднородностей – шлиров, линз и прослоек льда. В ходе массопереноса также происходит перестройка минерального скелета и изменение пористости. Все эти процессы влияют на механические характеристики грунта, определяющие его несущую способность и взаимодействие с инженерными сооружениями.

Экспериментальные и теоретические исследования теплообменных процессов в дисперсных грунтах позволяют получить сведения о свойствах и параметрах протекания процессов в зависимости от состава, температуры, нагрузки, фазового состояния поровой влаги.

Для проведения экспериментальных исследований определения теплофизических свойств дисперсного грунта был разработан ряд установок, реализующих различные методы измерений:

- установка, реализующая квазистационарный метод измерения, применяется для комплексного определения теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности дисперсных сред [1];

- установка для измерения теплопроводности сред методом двухточечного зондирования [2] применяется для определения теплопроводности образцов грунта в мерзлом состоянии, а также для скального грунта;

- измерительная установка, реализующая метод цилиндрического зонда постоянной мощности [3].

Программно-аппаратный комплекс, основанный на методе короткого цилиндрического зонда (рис. 1) [4], применяется для определения теплопроводности дисперсного грунта в талом состоянии.

Для исследования процессов влагопереноса при промерзании дисперсного грунта была разработана установка, где применяется емкостной метод измерения влажности в дисперсной среде (рис. 2). Она позволяет исследовать процесс миграции поровой влаги при промерзании и оттаивании влажного грунта [5].

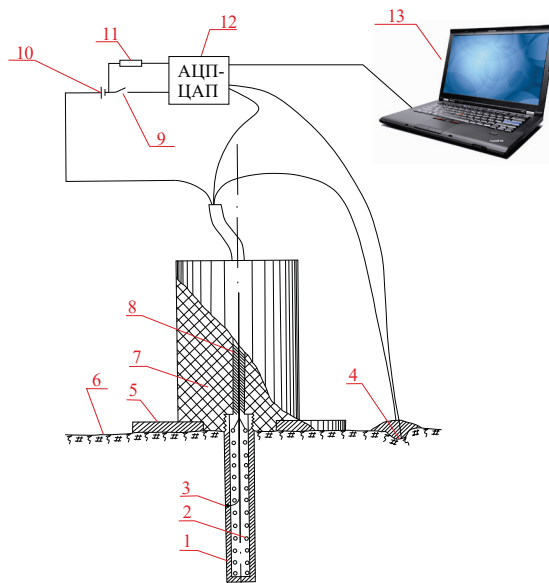


Рис. 1. Схема программно-аппаратного комплекса для полевого определения теплопроводности грунтов методами цилиндрического зонда постоянной мощности

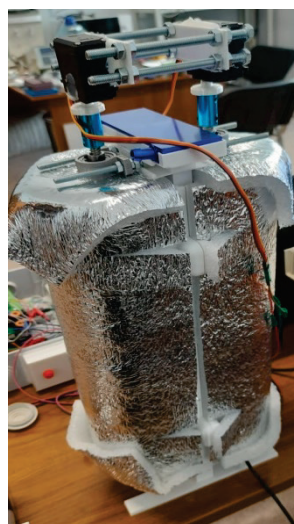


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для исследования процессов влагопереноса при промерзании грунта

При проведении численных и расчетных исследований существует несколько подходов моделирования процессов в зависимости от структурных особенностей дисперсной многокомпонентной среды:

- сплошная однородная среда с определенными теплофизическими и физико-механическими свойствами;
- смесь компонентов (минеральные частицы, вода, лед, воздух, органика);
- пористая водонасыщенная или ненасыщенная (с содержанием воздуха) среда.

При этом каждый из подходов оправдан для решения конкретных задач. Теория смесей, теория эффективной среды и теория обобщенной проводимости используются при построении расчетных моделей теплофизических свойств дисперсного и крупнообломочного грунта различного состава [6, 7, 8].

Для моделей процессов массопереноса, морозного пучения и просадки целесообразно рассматривать дисперсный грунт как изотропную пористую водонасыщенную среду [9].

Представление грунта как однородной сплошной среды удобно при моделировании задач взаимодействия теплового и механического взаимодействия дисперсного грунта с инженерными сооружениями [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. А. Методы и аппаратура комплексных измерений теплофизических и термомеханических свойств и характеристик композиционных материалов и конструкций : дисс. ... докт. тех. наук / В. А. Иванов. – СПб : ИТМО, 2015 – 259 с.
2. Автоматизация измерения теплопроводности методом двухточечного зондирования // VI Евразийский международный симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата / А. В. Малышев, К. Н. Большев, В. А. Иванов [и др.]. – С. 195–199.
3. Метод начальной стадии для цилиндрического зонда постоянной мощности / К. Н. Большев, В. А. Иванов, А. В. Малышев [и др.] // Труды V Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2010. Секция 5. Тепломассоперенос и термомеханика дисперсных сред. – Якутск, 2010. – С. 78–82.
4. Кириллин, А. Р. Разработка программно-аппаратного комплекса для полевого определения теплопроводности грунтов методами цилиндрического зонда постоянной мощности на базе аналого-цифрового преобразователя ZetLab 220 / А. Р. Кириллин, К. Н. Большев, А. В. Малышев // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сборник трудов IV Международной конференции, 17–18 мая 2017, Санкт-Петербург. – С. 70–75.
5. Разработка экспериментальной установки для исследования процесса перераспределения поровой влаги в дисперсном материале при фазовых переходах / С. О. Семенов, А. В. Малышев, К. Н. Большев [и др.] // Сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН (19–23 сентября 2024 г., г. Якутск). – С. 183–185.

6. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 263 с.
7. Оделевский, В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем / В. И. Оделевский // ЖТФ. – 1951. – Т. 21, вып. 1. – С. 667–685.
8. Гаврильев, Р. И. Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом / Р. И. Гаврильев, Г. П. Кузьмин // Наука и образование. – 2009. – № 4. – С. 51–54.
9. Желнин, М. С. Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании : дисс. ... канд. физ.-мат. наук / М. С. Желнин – Пермь, 2021.
10. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей / О. В. Трифонов, В. М. Силкин, К. Н. Большев [и др.] // Вести газовой науки : научно-технический сборник. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50.

ТЕПЛОФИЗИКА ЛАНДШАФТОВ АЛЕКСАНДРА ВЛАДИМИРОВИЧА ПАВЛОВА

Варламов С. П., Жирков А. Ф.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Александр Владимирович Павлов – доктор географических наук, отличник разведки недр, ветеран труда, заслуженный ветеран Сибирского отделения РАН, всемирно признанный выдающийся ученый, специалист в области теплофизики ландшафтов, климатологии и геокриологического прогноза. Он стоял у истоков создания мониторинга криолитозоны, который сегодня привлекает внимание всего мирового научного сообщества в связи с глобальным потеплением климата.

А. В. Павлов окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «гидромелиорация» в 1953 г. Закончил аспирантуру Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР (ИНМЕРО, г. Москва), по окончании работал научным сотрудником института до его расформирования в 1963 г. В то время в ИНМЕРО трудились крупнейшие исследователи вечной мерзлоты Н. А. Цытович, П. Ф. Швецов, Г. В. Порхаев, П. И. Мельников, Н. И. Салтыков, М. М. Крылов и др. Они оказали большое влияние на формирование научных интересов и мировоззрение будущего учёного. С тех пор основное направление его исследований было связано с изучением динамики теплового состояния сезонно- и многолетнемерзлых пород под влиянием естественных и антропогенных факторов.

В 1959 г. А. В. Павловым была подготовлена и успешно защищена кандидатская диссертация «Зимнее орошение полей для повышения урожайности сельскохозяйственных культур». С 1959 по 1961 гг. он

руководил круглогодичными теплобалансовыми исследованиями Подмосковной (Загорский стационар) и Воркутинской станций. Результаты исследований в области распространения сезонного промерзания и неустойчивых мерзлых пород европейского Севера он обобщил в своей монографии «Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой» (1965).

В 1966 г. заведующий лабораторией тепломассообмена д.т.н. Н. С. Иванов и директор Института мерзлотоведения Сибирского отделения АН СССР П. И. Мельников пригласили А. В. Павлова в Якутск. По инициативе и благодаря настойчивости А. В. Павлова в 1969 г. в институте была создана лаборатория гидротермических мелиораций и организован круглогодичный теплобалансовый стационар «Якутск» для изучения внешнего теплообмена естественных и техногенных ландшафтов. Организация этого стационара позволила в те годы и в дальнейшем решить многие задачи сельскохозяйственного производства, горного дела, дорожного и гидротехнического строительства в Якутии.

Детальные исследования фитоклимата, радиационного режима и теплового баланса лесных ландшафтов в Сибири осуществлялись под руководством А. В. Павлова на теплобалансовых стационарах Якутск, Сырдах и Игарка, причем комплекс наблюдений здесь был существенно дополнен вследствие увеличения объема наблюдений за гидротермическим режимом почвы. Объектами исследований являлись: в Якутске – сосновый лес, в Сырдахе – лиственничный лес, в Игарке – березовый лес. Было количественно оценено влияние леса на процессы теплообмена почвы с атмосферой.

С 1969 г. продолжались и географически расширялись теплобалансовые стационарные наблюдения за процессами формирования температуры верхнего слоя горных пород при взаимодействии с приземным слоем атмосферы в разных природно-ландшафтных ассоциациях. На них проводились в полном объеме актинометрические и градиентные наблюдения за суммарной, рассеянной и поглощенной радиацией, радиационным балансом, температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра на разных высотах. В почвенно-грунтовом слое измерялась температура на поверхности и в деятельном слое и тепловые потоки на разных глубинах. Баланс влаги измерялся влагомерами и испарителями. Благодаря этим наблюдениям впервые в Центральной Якутии установлены закономерности тепло- и влагообмена горных пород с атмосферой в наиболее доминирующих для зоны развития мерзлых пород в среднетаежных ландшафтах.

С 1971 по 1974 гг. под руководством А. В. Павлова проводились круглогодичные теплобалансовые наблюдения в г. Игарка на енисейском севере в подзоне северной тайги. Впервые экспериментально был изучен тепловой баланс подстилающей поверхности разнотравного луга, березового леса (над кроной и в пологе леса с градиентной вышки). Выявлены сезонные изменения теплофизических свойств напочвенных покровов и заторфованных

грунтов. Анализировался тепловой режим снежного покрова и грунтов в слое годовых теплооборотов, оценивалось техногенное воздействие (синтетическая пленка, удаление снежного и напочвенного покровов) на теплообмен грунтов с атмосферой. Был составлен прогноз изменения теплового режима грунтов в естественных условиях и при освоении территории.

Аналогичные работы были проведены в 1974–1976 гг. в зоне южной тундры на Соленинском стационаре (северо-восток Тюменской области). Наблюдения выполнялись на трех естественных (мохово-лишайниковая, осоковая и ерниковая тундры) и четырех техногенных площадках (с удаленным и нарушенным напочвенным покровом, с покрытием и залитой водой). Было показано, что удаление и нарушение тундрового покрова приводит к увеличению радиационного баланса, теплового потока в почву и испарения; соотношение «испарение – радиационный» баланс в тундре меньше, чем в умеренной зоне; дана оценка эффективности ряда покрытий поверхности. В 1977–1978 гг. на стационаре Геологический (южная тундра енисейского севера) проводилось изучение теплообмена грунтов с атмосферой на участках с посевами местных и инорайонных трав. Результаты обоих исследований были позднее обобщены в научном сборнике «Техногенные ландшафты Севера и их рекультивация» (1979) под общей редакцией А. В. Павлова.

Комплексный стационар был организован в 1973–1977 гг. в Центральной Якутии в районе термокарстового озера Сырдах. Наблюдения велись на трех ландшафтных комплексах: озеро глубоководное со сквозным таликом, лиственничном лесу и открытом участке аласа. Изучались радиационный, тепловой и водный режимы. Было установлено, что качественная картина теплообмена над кроной и под пологом лиственничного леса не отличалась от соснового леса, а количественные характеристики отличались незначительно.

В 1978–1979 годах, в связи с созданием в пойме р. Лены намывных песчаных территорий для застройки новых кварталов г. Якутска, был проведен комплекс теплораспределительных и теплофизических наблюдений за процессами на поверхности и в промерзающих песках. Их результаты легли в основу коллективной монографии сотрудников Института мерзлотоведения «Теплофизические исследования криолитозоны Сибири» (1983), ответственным редактором которой выступил А. В. Павлов.

В связи с интенсивным развитием в 1960-х годах сельского хозяйства, в северных регионах перед наукой были поставлены задачи повышения урожайности трав на лугах и овощей на полях. Этой проблемой пришлось заняться мерзлотоведам – лаборатории гидротермических мелиораций института под руководством А. В. Павлова. Были получены фундаментальные результаты исследований гидротермического режима мерзлотных почв (аласных, долинных, мелкодолинных и таежных ландшафтов) при сельскохозяйственном освоении и мелиорации на сезонных стационарах

Кенкеме, Нюрба, Хатассы, Хоробут, Амга, Кердюген. Разработаны способы определения режима лиманного и дождевального орошения лугов и полей, предложены методы определения интенсивности и нормы осушения мерзлотных почв. Результаты исследований обобщены в работах П. П. Гаврильева, А. А. Мандарова, И. С. Угарова.

Для изучения условий формирования и режима склоновых таликов, в 1977 г. лабораторией подземных вод криолитозоны был организован комплексный стационар «Чабыда». Здесь в 1980 г. сотрудниками лаборатории гидротермических мелиораций под руководством А. В. Павлова были начаты исследования термического состояния верхних горизонтов многолетнемерзлых пород в условиях со сливающейся и несливающейся мерзлотой, водной толщей и донными отложениями. Исследования включали комплекс метеорологических, актинометрических, гидротермических, теплофизических наблюдений. База данных геокриологической информации, полученная на стационаре, является уникальной для России. Поскольку мониторинговые исследования продолжаются там и по настоящее время, ценность геокриологической информации увеличивается, растет продолжительность рядов наблюдений, а с ней – достоверность полученных выводов о состоянии многолетнемерзлых пород в условиях современного потепления климата.

Богатейший фактический материал круглогодичных теплобалансовых наблюдений, оригинальные методические разработки позволили Александру Владимировичу сформулировать основные положения докторской диссертации «Теплообмен промерзающих и протаивающих почвогрунтов с атмосферой» в виде доклада, которую он блестяще защитил на географическом факультете МГУ в 1975 г.

Опубликованная в 1975 г. монография А. В. Павлова «Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР» сразу же разошлась и была переведена в США в 1976 г. После ее публикации получены в большом объеме новые оригинальные материалы режимных теплобалансовых исследований для естественных и техногенных ландшафтных комплексов, на основе которых стало возможным развить ряд высказанных положений в теоретическом или прикладном аспекте, поэтому возникла необходимость коренной переработки монографии. Ввиду значительного объема накопленного материала, автор издал вместо одной две самостоятельные книги. Первая из них – «Теплофизика ландшафтов» (1979) посвящена рассмотрению закономерностей теплообмена в системе «почва – наземные покровы – атмосфера» в естественных природных условиях. Вторая монография «Расчет и регулирование мерзлотного режима почв» (1980) является практическим приложением изученных закономерностей к расчету и регулированию состояния горных пород в естественных и техногенных условиях.

В результате систематизации и анализа данных режимных мерзлотно-климатических наблюдений А. В. Павлов создал новое научное направление на стыке геокриологии и ландшафтоведения – теплофизику ландшафтов. Она возникла на стыке большого числа наук, в первую очередь, гидрометеорологии, мерзлотоведения, физической географии, физики приземного слоя атмосферы, почвоведения, геотермии, биогеоценологии.

В основе этого научного направления лежит метод баланса энергии (тепла), позволяющий количественно характеризовать процессы тепловлагообмена между составными компонентами ландшафта. Поскольку, протекание всех физико-географических процессов в атмосфере и самом верхнем слое земной коры зависит от солнечной радиации, метод баланса предполагает учет, как ее прихода, так и расхода на отражение, поглощение, трансформацию в энергию турбулентных пульсаций воздушной среды, испарение, аккумуляцию почвенной толщей. Все расходные составляющие тесно взаимосвязаны с ландшафтными условиями, поэтому объектами изучения теплофизику ландшафтов являются приземный слой атмосферы, наземные покровы (снег, растительность, водная среда и пр.) и почвенно-грунтовая толща.

В последние годы пребывания в Якутске А. В. Павлов уделил особое внимание проведению натурных режимных теплобалансовых наблюдений в горных районах криолитозоны юга страны (хребет Тянь-Шань) и склоновых ландшафтах низкогорий заполярной Якутии (хребет Кулар). Итоги возглавляемых им научных работ в Якутии он обобщил в работе «Энергообмен в ландшафтной сфере Земли» (1984).

Значительный вклад А. В. Павлов внес в решение целого комплекса прикладных задач, которые имели непосредственное практическое приложение. В частности, им обоснованы методы искусственного оттаивания и предохранения от промерзания грунтов в горнотехнической и сельскохозяйственной практике, а также защиты ландшафтов от техногенного разрушения и их последующей рекультивации. Они детально описаны в монографии «Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей» (1974), написанной в соавторстве с Б. А. Оловиным, основное содержание которой представляют результаты режимных экспериментальных исследований способов управления промерзания-протаиванием пород на двух опорных пунктах – в Центральной и Северной Якутии. Оценена возможность применения растворов солей для искусственного оттаивания и предохранения пород от промерзания. Разработаны новые методики прогноза глубины протаивания пород в естественных условиях, под пленочными покровами и при послойной разработке.

В 1982 г., по возвращении в Москву, А. В. Павлов 15 лет трудился в отделе геокриологии ВСЕГИНГЕО, а в 1997 г. по приглашению чл.-корр. РАН В. П. Мельникова перешел в Институт криосферы Земли СО РАН, где работал

до последнего времени. На основе опыта организации круглогодичных теплобалансовых стационаров в Загорске, Воркуте и Якутии выступил инициатором организации стационаров и был научным руководителем работ на европейском севере (Большеземельская тундра) и на севере Западной Сибири (Гыданский п-ов, Ямал).

А. В. Павлов стоял у истоков организации мониторинга криолитозоны (1980-е гг.) как унифицированной системы наблюдений за состоянием мерзлых пород, оценки, контроля и прогноза изменений под воздействием природно-климатических и техногенных факторов. Под его непосредственным руководством были проведены круглогодичные циклы наблюдений на 15 геокриологических стационарах в различных регионах криолитозоны, охватывающих широкий спектр мерзлотно-ландшафтных условий: в северной и центральной Якутии, на енисейском Севере, на Ямале, Гыданском полуострове, в Большеземельской тундре, в горах Тянь-Шаня. На базе экспериментальных и теоретических исследований созданы научно-методические основы мониторинга криолитозоны, реализуемые при освоении Севера.

Александр Владимирович координировал научные и производственные работы по мониторингу природной среды на Севере, являлся обладателем уникальной информации по мониторингу криолитозоны России и участвовал в выполнении Государственных научно-технических программ, координируемых РАН, Минпромнаукой, Росгидрометом, в рамках которых выполнены оценки изменений климата и термического состояния криолитозоны, прогнозы эволюции криолитозоны в связи с современным потеплением климата.

Итоги исследований эволюции термического состояния верхних горизонтов криолитозоны за период от III Международного геофизического года (1957/59) до IV Международного полярного года (2007/08) подведены А. В. Павловым в монографии «Мониторинг криолитозоны» (2008). В работе охарактеризованы основные этапы становления и развития мониторинга криолитозоны, систематизированы и проанализированы данные мониторинга климата и криолитозоны на территории России. Научная ценность работы заключается в рассмотрении современной эволюции мерзлотных ландшафтов в едином комплексе с изменениями основных определяющих природных факторов (климат, растительный и надпочвенные покровы, водоемы). Монография не имеет аналогов в мире, что позволяет считать А. В. Павлова одним из основателем мониторинга криолитозоны.

ВЕНИАМИН ТИХОНОВИЧ БАЛОБАЕВ – ОСНОВОПОЛОЖНИК НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОТЕРМИЯ МЕРЗЛОЙ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ

Железняк М. Н.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Вениамин Тихонович Балобаев родился 2 января 1930 г. в г. Тула, в многодетной семье партийного работника и домохозяйки. Среди восьми детей он был единственным мальчиком – самым последним ребенком. В то время еще считали, что семья без мальчиков является ущербной, и отец с матерью разделяли эту точку зрения. Мама его никогда не работала и посвятила свою жизнь детям. Так получилось, что, по большому счету, воспитали Веню не родители, а сестры, которые опекали его, учили, защищали. Благодаря этому он рано научился читать, считать и любить книжки.

Семья имела достаточно скромный достаток, но в условиях тридцатых годов прошлого века его вполне хватало на одежду и пропитание. Так продолжалось до начала Великой Отечественной войны.

После нападения на СССР гитлеровской Германии в корне изменилась психология советских людей. Все стали лихорадочно искать способы помощи стране. В военкоматах были огромные очереди молодых людей, требующих отправить их на фронт. Двухлетняя сестра Вениамина Тихоновича, после ускоренных курсов Рязанского военного пехотного училища, командовала ротой на передовой. Она осталась живой и закончила войну в звании майора. Тяжелое положение на фронте в 1941 г. заставило привлекать к работам по укреплению обороны и помощи армии все население городов и сел в прифронтной зоне, даже детей. Как вспоминал Вениамин Тихонович, их, мальчишек, привлекали к ночным дежурствам на крышах домов.

В октябре 1941 г., вместе с семьей старшей сестры Антонины, Вениамин эвакуировался в г. Челябинск, где жить пришлось в землянках. На нем лежали обязанности создать хоть какую-то обстановку в жилище, ежедневно в 5 утра занимать очередь за хлебом в магазине. Для финансовой поддержки семьи он освоил очень прибыльную «профессию» продавца питьевой воды. Понятно, что учиться в школе ему было некогда, но пропущенное он упорно, систематически нагонял. Летом 1942 г. Веня и его младшая сестра переезжают в Новосибирск, куда, наконец, были эвакуированы отец и мать.

В 1946 г. семья Балобаевых из эвакуации вернулась в Тулу. В 1948 г. Вениамин окончил школу № 9 с хорошими и отличными оценками и получил аттестат зрелости. Попытка поступить в академию художеств в Ленинграде окончилась неудачей. В послевоенное время, когда проявилось мощное развитие техники и технологий – атомная бомба, радиофизика, локаторы и т. д., все ученики «болели» физикой, потому что это была наука № 1, которая создавала все на первых рубежах.

Вениамин Тихонович решил подать документы в Ленинградский университет, на физический факультет. Этот факультет был выбран потому, что еще в Новосибирске физику в школе преподавал немец из Республики немцев Поволжья, который старался объяснить ребятам суть физических законов, показать наглядно, как они выполняются. Его уроки всегда сопровождались показами опытов, объясняющих изучаемые явления наяву, реально. Это было интересно и хорошо запоминалось.

По вступительным экзаменам Вениамин Тихонович набрал 33 балла из 35 и стал студентом Ленинградского государственного университета. Естественно, в тот момент в его голове не было даже представления о том, что существует какая-то мерзлота.

В 1950 г. в стенах университета со своей удивительной лекцией о происхождении Земли из холодного протопланетного облака выступил академик О. Ю. Шмидт. Эта лекция потрясла воображение Вениамина, и он решил заняться изучением физики Земли. В то время на физическом факультете университета готовили физиков-геофизиков. Это те специалисты, которые изучают физические поля в Земле. Так Вениамин Балобаев стал студентом-геофизиком.

Дипломная работа Вениамина Тихоновича была оценена на «отлично». Ее результаты позднее, в 1958 г., были опубликованы Г. В. Молочновым в соавторстве с В. Т. Балобаевым в Ученых записках ЛГУ.

В последний год обучения всех студентов волновал вопрос распределения на работу. К сожалению, так получилось, что окончание обучения пришлось на год смерти И. В. Сталина. В стране было смутное время, во всяком случае, на распределение студентов практически никто из производственных организаций не явился, только из Академии наук СССР приехали люди со списком востребованных молодых специалистов. В этом списке оказался и Вениамин Тихонович. Ему и еще двум выпускникам кафедры физики Земли предложили работать в Институте мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР.

Основной задачей первого этапа систематических исследований вечной мерзлоты в нашей стране в 30–40 гг. XX века являлось получение общих представлений, которые основывались на географическом подходе. Затем институту потребовались физики для того, чтобы заниматься исследованиями физических и механических процессов, которые происходят в мерзлоте и играют значительную роль в возможности жизни на ней. Как показали первые исследования, которые были проведены еще в начале прошлого века при строительстве Транссибирской магистрали, вечная мерзлота – коварное природное явление. Многолетнемерзлые породы при малейшем тепловом или механическом влиянии оттаивают, а здания и сооружения при этом разрушаются. Следовательно, без серьезных исследований строительство сооружений на вечной мерзлоте невозможно. Однако проработал Вениамин в этом институте всего один год. На тот момент Владимир Афанасьевич сильно

болел и в институте появлялся редко. Фактически административными, научными и научно-организационными делами в институте руководил член-корреспондент АН СССР, заместитель директора П. Ф. Швецов. При нем направление работы института начало меняться в сторону усиления исследований физико-механических процессов в мерзлых, протаивающих и промерзающих горных породах. Для этого требовались специалисты с физико-математической подготовкой. Особый интерес вызывали процессы тепломассообмена, фазовых превращений воды в горных породах. Экспериментальные исследования этих процессов в Москве были невозможны, поэтому они велись на научно-исследовательских мерзлотных станциях института, расположенных в районах существования мерзлых пород: в Игарке, Якутске, Анадыре, Воркуте.

Именно Петр Филиппович Швецов и предложил молодому специалисту Вениамину Балобаеву изучать вечную мерзлоту в тех краях, где она, собственно, и существует, и рекомендовал его на одну из станций. Вот так, Петр Филиппович Швецов решил судьбу Вениамина, и он попал в г. Якутск на мерзлотную станцию, где начал заниматься изучением вечной мерзлоты. Якутия и в то время, и сейчас считается классической территорией развития многолетних мерзлых пород самых разных форм.

Якутская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР была создана в 1941 г. в окрестностях города, поросших сосново-березовым лесом, перемежающимся полянами и небольшими озерами. К моменту переезда Вениамина Тихоновича на территории станции располагалось красивое служебное деревянное одноэтажное здание с котельной, старое служебное здание, в котором жили сотрудники и ряд жилых двухкомнатных домов. Удобства – во дворе, воду летом привозила водовозка, а зимой использовали речной лед.

Несмотря на суровый, почти спартанский образ жизни, на станции работали преимущественно приезжие с запада люди. С самого начала Якутской научно-исследовательской мерзлотной станцией (ЯНИМС) руководил Павел Иванович Мельников, тогда – молодой, энергичный человек. Это был специалист, который обладал какими-то совершенно невероятными организаторскими способностями.

В первые годы работы на станции Вениамин Тихонович занимался вопросами использования геофизических и термометрических методов для изучения строения и распространения многолетнемерзлых толщ.

Уже через 4 месяца после приезда в г. Якутск состоялась первая поездка Вениамина Тихоновича для изучения мерзлоты. Вместе с П. А. Соловьевым они были направлены в долину реки Тынды (приток Алдана) для измерения температуры и мощности многолетнемерзлых пород в глубоких скважинах.

Именно в эти полевые работы, впервые в практике геокриологии и геотермии в качестве датчиков были использованы полупроводниковые терморезисторы (термисторы), которые тогда изготавлил, в небольших

количествах Институт полупроводников АН СССР. Впоследствии, в течение многих лет Вениамин Тихонович вместе с коллективом сотрудников занимались разработкой методики использования терморезисторов для измерения температуры мерзлых пород, созданием установок для их градуировки и самой полевой геотермической аппаратуры. Уже к середине шестидесятых годов термисторы стали основными датчиками геотермических замеров и получили всеобщее признание.

Большие работы в течение летнего сезона 1954 г. были проведены в Южной Якутии на Чульманском угольном месторождении в составе экспедиции СОПС АН СССР. Оконтуривались острова многолетнемерзлых пород в плане и по глубине с использованием метода электропрофилирования, который считался наиболее информативным и точным для этих целей.

В пятидесятые годы XX в. Алданский регион оставался «русским Клондайком». Индустриальный пейзаж заполняли плавучие драги, добывающие россыпное золото. От Транссибирской железной дороги до п. Томмот на р. Алдан тянулась круглогодично действующая автодорога. Этот сравнительно небольшой период полевой жизни в Южной Якутии многому научил м.н.с. Балобаева, предоставил ему возможность встретиться и подружиться с замечательными людьми и учеными.

Летом того же 1955 г. В. Т. Балобаев с лаборантом Н. Н. Белолюбским были направлены на оловорудное месторождения Эге-Хая для определения в его пределах параметров криолитозоны. Рудник существовал давно, работы велись уже на глубинах более 200 метров, поэтому появилась опасность войти в талые породы, вследствие чего часть рудника могла быть затоплена подмерзлотными водами. На руднике был лагерь заключенных и небольшой поселок свободных работников. Работами сотрудников Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции АН СССР было установлено, что от забоя рудника до нижней границы мерзлых пород оставалось около 20 метров. Было рекомендовано отработку вести штольнями в одну сторону, где мощность мерзлоты была наибольшей.

В летний период 1955 г. Вениамин Тихонович занимался электроразведкой. Были определены размеры подозерного талика на Белом озере вблизи аэропорта г. Якутска. В пос. Покровск и Булгунняхтах было проведено оконтуривание по площади ледяных жил, которые при последующих исследованиях оказались псевдоморфозами (грунтовыми жилами) по повторно-жильным льдам. В результате всех этих работ была наработана методика проведения электроразведки в разных мерзлотных условиях и испытана существующая аппаратура.

В 50–60-е гг. в мерзлотоведении наиболее интенсивно развивалось геотеплофизическое направление. Это было обусловлено целым рядом факторов. Во-первых, всем ходом развития науки, когда объективно созрела необходимость изучения физических процессов промерзания–протаивания горных пород, тепло- и массообмена, формирования температурного режима

и мощности криолитозоны. Во-вторых, в Институте мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР и на его станциях сформировались кадры, способные начать геотеплофизические исследования (В. П. Бакакин, В. Г. Гольдман, Н. С. Иванов, А. Г. Колесников, Г. А. Мартынов, В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, Г. В. Порхаев и другие). В-третьих, в тот период наблюдалась широкое развитие учения о тепло- и массообмене, связанное с работами школы А. В. Лыкова.

На Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР, благодаря усилиям Н. С. Иванова, также начало успешно развиваться теплофизическое направление в исследовании проблем криолитозоны. Изучались процессы сезонного и глубокого промерзания и протаивания горных пород, энергетика этих процессов, влияние деятельности человека на тепловое состояние многолетнемерзлых пород и др. Начальник ЯНИМС П. И. Мельников предложил В. Т. Балобаеву работать в этом направлении.

В 1955 г. в эфире прозвучало странное сообщение – «Закурили Трубку Мир». Это было шифрованное сообщение геолога Амакинской экспедиции Юрия Хабардина об открытии первого коренного месторождения алмазов – кимберлитовой трубки «Мир» на берегу р. Иерелях, притоке р. Малая Ботуобия, впадающей в р. Вилюй.

Началась эпопея создания мощной инфраструктуры для добычи алмазов, в которой мерзлотоведы приняли активное участие. Уже 1956 г. в долине реки Иерелях (в районе будущего города Мирный) начала работать крупная экспедиция Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР, базирующаяся в северо-восточном отделении ИНМЕРО. Начальником экспедиции был назначен И. А. Тютюнов, а его заместителем – В. Т. Балобаев. В первый год в экспедиции работало около 60 человек, а позднее численность ее сотрудников доходила до 100 человек. Экспедиция имела свое хозяйство, бухгалтерию, финансы. В районе алмазной трубки был построен дом, где располагалась база экспедиции. Еще два дома построили в поселке на берегу р. Малая Ботуобия, где на галечной косе был организован аэродром для посадки и взлета самолетов. Для перевозки работников экспедиции каждый год в летнее время арендовался на весь полевой сезон самолет АН-2, а для работы в таежных условиях привлекались лошади.

С появлением новой алмазной тематики В. Т. Балобаеву руководством института была поставлена задача заняться проблемой разработки эффективных способов добычи полезных ископаемых в криолитозоне. Это проблема была очень актуальной после войны, когда страна делала огромные усилия по восстановлению разрушенного народного хозяйства.

В первую очередь и быстрее всего разрабатывались россыпные месторождения золота. Разработка велась плавучими драгами или промприборами с предварительной оттайкой мерзлых россыпей. Методы их оттаивания и разработки исследовались в основном в Магадане, где в то время

находился головной институт ВНИИ «Главзолота». Вениамин Тихонович занялся поисками методов разработки алмазодносных россыпей, которые тянулись от трубки «Мир» по долинам рек. Разрабатывать россыпи было предложено послойным методом, который заключается в том, что в течение некоторого времени под влиянием естественного тепла оттаивает мерзлый слой необходимой толщины (15–20 см). Бульдозеры снимают этот слой и сгребают в бурты, откуда порода идет на промывку промприборами. Обнаженный мерзлый галечный грунт начинает оттаивать и создает следующий слой для уборки, и так в течение всего теплого сезона года. Задачами исследований на россыпных месторождениях алмазов являлось определение величины природных тепловых потоков, разработка методов воздействия на них, увеличение притоков тепла и создание в результате комбинированного послойного оттаивания для разного типа грунтов. Эти изучения были организованы в долине р. Ирелях на 21 экспериментальной площадке. На одних сохранились нетронутые природные условия, на других изучались тепловые потоки в разных поверхностных условиях. В результате было предложено несколько оптимальных вариантов методики послойного оттаивания и предохранения оттаявшего грунта от зимнего промерзания.

Теоретическое обобщение полученного в экспедиции обширного фактического материала позволило разработать математические методы приближенного решения задачи для расчета глубины протаивания мерзлых грунтов при их тепловом взаимодействии с атмосферой при наличии напочвенных и растительных покровов и при просадках поверхности. Были также теоретически найдены оптимальные режимы протаивания при дождевальной и дренажной инфильтрации и фильтрации воды в талом слое.

По этим материалам В. Т. Балобаевым была написана и в 1965 г. защищена во ВСЕГИНГЕО диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук «Теоретические основы управления протаиванием и промерзанием горных пород в природных условиях».

В 1956 г. Якутская научно-исследовательская мерзлотная станция была преобразована в Северо-Восточное отделение Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР, которое в 1960 г. было реорганизовано в Институт мерзлотоведения СО АН СССР в г. Якутске. В Якутск переехала не только часть опытных сотрудников из Москвы, но и большое количество молодых специалистов самых разных профилей. Это привело к быстрому профессиональному росту молодежи.

В связи с организацией Института мерзлотоведения СО АН СССР в г. Якутске в 1961 г. В. Т. Балобаев назначается исполняющим обязанности заведующего лабораторией тепловой мелиорации мерзлых грунтов, а через год, в 1962 г. – заведующим лабораторией геотермии криолитозоны. Эта лаборатория была первой и долгое время единственной за Уралом, которая целенаправленно исследовала тепловой режим земной коры в области развития мерзлых пород и связь его с процессами глубокого промерзания.

Работы лаборатории получили всеобщее признание и всесоюзную известность. Это признание было заслужено созданием, с одной стороны нового геотермического направления в геокриологии, а с другой стороны – геокриологического направления в геотермии.

Создалась, прежде всего, благоприятная ситуация для очень быстрого развития геотеплофизики и геотермии. Поток фактического материала неимоверно возрастал. Если в обобщающей работе П. И. Мельникова «Итоги геокриологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований в Центральной и Южной Якутии» (1963 г.) были проанализированы материалы геотермических измерений всего по 31 глубокой скважине за весь предшествующий исторический период, то к 1980 г. сотрудниками лаборатории геотермии института были выполнены исследования в более чем в 600 скважинах на 140 месторождениях и разведочных площадях на территории от Урала до Тихого океана. В немалой степени этому способствовало интенсивная разведка полезных ископаемых в области криолитозоны и большой объем бурения, проводимый в то время.

Начиная с 1970 г., фундаментальные геотермические исследования осуществлялись в институте по заданиям государственным научно-техническим программам, а в последние годы по российским государственным программам № 14 «Мировой океан: геология, геофизика, биология», № 16 «Глобальные изменения природной среды и климата», № 17 «Исследование и пользование мирового океана». Эти исследования носили пионерный характер, так как проводились в районах, где сведения о параметрах и тепловом состоянии криолитозоны отсутствовали. Проблемы решались с разных сторон и усилиями ученых различных направлений. Благодаря такой широкой кооперации были получены материалы, позволившие установить определяющее влияние геодинамических, геотектонических и структурных параметров, на глубокое промерзание земной коры.

Под руководством В. Т. Балобаева сотрудниками лаборатории геотермии в 1982 г. был составлен и опубликован каталог внутриземного теплового потока Сибирской платформы и Верхояно-Чукотской горно-складчатой области и построена геотермическая карта масштаба 1:5 000 000, уточненная в 1985 г. на основе новых данных. Расширение количества измеряемых геотермических параметров привело к качественно новым выводам и иным представлениям о состоянии криолитозоны и ее формировании.

Сотрудниками Института мерзлотоведения СО АН СССР в 1977–79 гг. был разработан теоретический метод реконструкции палеогеокриологических условий на основе нестационарности современных фазовых границ. На основе этого метода была проведена количественная реконструкция палеотемператур и палеомощностей мерзлых пород для последней сартанской холодной эпохи и теплого голоцена в Западной Сибири и Центральной Якутии. Были обнаружены также регионы, покрывавшиеся ледниковым покровом в

холодную эпоху. Накопление фактического материала дало возможность строить двух и трехмерные модели температурных полей криолитозоны.

Для установления детерминированной связи мощности мерзлых пород со строением, структурой и состоянием земной коры и верхней мантии В. Т. Балобаевым совместно с А. И. Левченко в 1985–1993 гг. были построены геотермические модели земной коры по субширотным и субмеридиональным геотраверсам: Урал – Охотское море, Обь – Лена, Диксон – Байкал. Коллективом лаборатории геотермии института (В. Н. Девяткин, А. И. Левченко, Б. В. Володько, В. Г. Русаков, М. Н. Железняк и др.) под руководством В. Т. Балобаева была составлена карта температуры горных пород криолитозоны севера Азии в приверхностном слое и на глубинах 0,5; 1,0; 3,0 и 5,0 километров.

За комплекс печатных работ, посвященных тепловому режиму недр Сибири, В. Т. Балобаев вместе с коллективом научных сотрудников в 1987 г. был удостоен диплома и первого места в конкурсе фундаментальных работ Сибирского отделения АН СССР.

Вместе с В. Т. Балобаевым в разные годы в создании основ геотермического направления в геофизиологии участвовали И. М. Кутасов, В. Н. Девяткин, Н. А. Козлов, Ю. Г. Шасткевич, С. И. Заболотник, Р. И. Гаврильев, А. И. Левченко, Б. В. Володько, М. Н. Железняк, В. Г. Русаков, Л. И. Шипицина, И. Д. Никифоров, Н. Д. Костюнин, О. П. Губанова, А. С. Егоров, В. Ю. Шамшурин, Д. В. Рыбников, С. В. Данилевский, И. А. Леонов, В. А. Коновалов, А. Н. Зуй и другие.

В 1989 г. Вениамин Тихонович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по теме «Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии», в которой рассмотрен весь комплекс условий и процессов формирования отрицательной температуры земной коры и ее глубокого промерзания.

В апреле 1994 г. Вениамин Тихонович был избран членом-корреспондентом Российской академии наук.

С 1994 по 2001 гг., в трудные для Российской науки и академических институтов времена, В. Т. Балобаев работал в дирекции, где был избран заместителем директора института по научной работе. Его огромный опыт и авторитет ученого во многом определили направление и жизнедеятельность института. На этом посту еще раз он показал себя грамотным специалистом, коммуникабельным человеком, инициатором, руководителем и организатором научных проектов Института мерзлотоведения СО РАН.

В 2002 г. В. Т. Балобаев был назначен советником РАН. На этом посту особенно ярко проявились его опыт, научная эрудиция и преданность науке. Необходимость профессионального научного консультанта, свободное обращение за квалифицированной и независимой, даже иногда резкой критической оценки проводимых исследований коллектив научных сотрудников остро ощущает сегодня.

С 2000 г. В. Т. Балобаев начал с увлечением заниматься разработкой методов прогноза динамики теплового состояния многолетнемерзлых толщ на основе изучения общего термодинамического состояния в системе атмосфера-литосфера, степени его соответствия внешним природным условиям, а также проблемами термической и фазовой устойчивости криолитозоны к глобальным изменениям климата и региональным антропогенным воздействиям. Им проанализированы сценарии реакции криолитозоны на различные антропогенные воздействия в глобальном, региональном и локальном масштабах. На их основе предложен метод термического мониторинга современного состояния криолитозоны по данным геотермических наблюдений по системе высокоширотных станций. Построены сценарии изменения температуры мерзлых пород Западной Сибири в течение XXI столетия, связанные с ожидаемым глобальным потеплением климата. На их основе осуществлен количественный прогноз изменения верхних и нижних фазовых границ криолитозоны в течение XXI столетия.

Вениамин Тихонович прожил большую трудную и интересную жизнь, полную разных жизненных событий, радостей и огорчений.

Он много работал и всегда старался делиться своими знаниями с коллегами, друзьями, молодежью. Его педагогический талант заключался в личном примере: окружающих он воспитывал собой, своим отношением к окружающему миру.

Где бы ни работал Вениамин Тихонович, его всегда отличал высокий профессионализм, энергия, чрезвычайная трудоспособность и неизменное чувство юмора. Он участвовал в выполнении государственных научно-технических программ, вел исследование по целому ряду совместных программ с зарубежными коллегами.

В. Т. Балобаев – автор 175 научных работ, в том числе 6 монографий. Член президиума Якутского научного центра СО РАН, Объединенного ученого совета по наукам о Земле СО РАН. Член научных советов РАН по криологии Земли и геотермии, член национального комитета по международному проекту «Климат и криосфера». Член правительственных комиссий РС(Я), редколлегий нескольких научных журналов.

Плодотворная деятельность В. Т. Балобаева была по достоинству оценена. Он был награжден орденом Дружбы народов, орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени, двумя бронзовыми медалями ВДНХ СССР. За заслуги в развитии науки и народного хозяйства нашей страны ему были присвоены почетные звания Заслуженного работника народного хозяйства ЯАССР (1986) и Заслуженного деятеля науки Российской Федерации (2005).

ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В ЗОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Рожин И. И.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦСО РАН», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск)

Доклад посвящен 120-летию со дня рождения академика АН СССР, Героя Социалистического Труда, выдающегося учёного в области геологии и горных наук, человека, внесшего огромный вклад в становление и развитие геологической службы, нефтяной и газовой промышленности в Якутии, одного из первооткрывателей обширной Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции, государственного деятеля, организатора науки и одного из создателей Якутского филиала АН СССР Николая Васильевича Черского.

Первые предположения об особенностях фазового состояния углеводородов в зонах развития многолетнемерзлых пород были высказаны в середине XX столетия. И. Н. Стрижов в 1946 г. писал, что на севере СССР на глубинах 400–600 м природные газы могут образовывать с водой твердые соединения – газовые гидраты. Через год М. П. Мохнаткин аналитически обосновал возможность образования газовых гидратов в земной коре. Затем Н. В. Черский на примере районов Якутской АССР привел факты существования природных газогидратных залежей в толщах мерзлых пород и подстилающих их горизонтах. Далее наступил качественно-новый этап исследований – лабораторное моделирование природных процессов гидратообразования, начатое Ю. Ф. Макогоном с 1964 г., затем продолженное Д. И. Медовским, В. П. Царевым и А. Ф. Безносиковым.

Н. В. Черский в соавторстве с академиком А. А. Трофимуком, д.г.-м.н. В. Г. Васильевым, д.т.н. Ю. Ф. Макогоном, д.т.н. Ф. А. Требиным провел теоретические и экспериментальные исследования возможности образования газовых гидратов в земной коре при определенных термодинамических условиях, обосновал наличие газогидратных залежей природного газа, установил условия их образования и разложения. Итогом этих исследований стало научное открытие за № 75 (с приоритетом от 25 июля 1961 г.) «Свойство природных газов находиться в земной коре в твердом состоянии, образовывать газогидратные залежи», которое было зарегистрировано Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР 4 марта 1971 г. Приоритет установлен по дате подписания к печати монографии [1], в которой написано: «в районах Крайнего Севера, где глубина залегания многолетнемерзлых пород местами достигает 500 и более метров, гидраты могут образовываться в насыщенных газом пластах-коллекторах... глубина гидратообразования может достигать 800 м, если там давление будет близким к гидростатическому (75–85 атм), а температура газа – не больше 15 °С».

Вследствие этого открытия, одного из самых выдающихся открытий в геологии углеводородов в XX веке, геологические исследования газовых гидратов получили серьезный импульс. Газовые гидраты начинают рассматриваться как потенциальный природный источник ископаемого топлива. Выясняется их широкое распространение в океанах и криолитозоне материков, нестабильность при повышении температуры и понижении давления. Зоны гидратообразования развиты в пределах Земли очень широко и занимают около 20 % территории материков и 90 % площади Мирового океана, достигая мощности 2000 м.

Эти сугубо теоретические результаты активизировали поиски гидратосодержащих пород в природе: первые успешные результаты были получены сотрудниками ВНИИГАЗа А. Г. Ефремовой и Б. П. Жижченко при донном пробпоиске в глубоководной части Чёрного моря в 1972 г. Они визуально наблюдали вкрапления гидратов, похожие на иней в кавернах извлечённого со дна грунта. Фактически, это первое, официально признанное в мире наблюдение природных газовых гидратов в породах.

Большой вклад в геологические и геофизические исследования гидратосодержащих пород внесли сотрудники Норильской комплексной лаборатории ВНИИГАЗа М. Х. Сапир, А. Э. Беняминович и др., изучавшие Мессояхское газовое месторождение, начальные пластовые pT – условия которого практически совпадали с условиями гидратообразования метана. В начале 1970-х годов ими были заложены принципы распознавания гидратосодержащих пород по данным комплексного скважинного каротажа.

Н. В. Черский со своими учениками и сподвижниками разрабатывал теоретические основы закономерностей распространения газогидратов в литосфере, а также изучал вопросы вскрытия, испытания и разработки газогидратных залежей [2]. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований:

- разработана модель формирования строения газогидратных залежей в земной коре;
- определены геологические и промыслово-геофизические признаки для выделения гидратосодержащих пластов в разрезах скважин;
- предложены методики оценки потенциальных запасов природного газа в газогидратных залежах, определения теплофизических и акустических характеристик гидратов и насыщенных ими горных пород, вскрытия и проходки скважинами газогидратных залежей и пластов с режимами, близкими к гидратному;
- разработана математическая модель образования и диссоциации газовых гидратов в скважинах, трубопроводах и пористых средах;
- проведена оценка изменения гидратонасыщенности призабойной зоны газовых скважин для различных технологических режимов отбора газа и возможного снижения продуктивности пласта за счет отложения газовых гидратов.

По выполненным оценкам, общие ресурсы газа на материках Земли составляют 10^{14} м³, а в донных отложениях Мирового океана может содержаться около $15 \cdot 10^{16}$ м³ газа в гидратном состоянии. Эти оптимистичные цифры позволили Николаю Васильевичу обосновать необходимость интенсификации исследований физикохимии газовых гидратов и геофизических методов поиска и разведки гидратных скоплений [3]. Достижения, полученные в исследованиях, выполненных в период с 1970 г. по настоящее время, изложены в многочисленных научных публикациях в журналах различного профиля и монографиях. Интенсивность этих исследований неуклонно растет, особенно за рубежом.

На сегодняшний день считается, что в земной коре в газогидратной форме находятся значительные ресурсы природного газа. Величина этих запасов как минимум в несколько раз превышает ресурсы традиционного газа, что позволяет считать газовые гидраты одним из перспективных нетрадиционных источников углеводородного сырья. Такие запасы природного газа в гидратной форме обусловлены тем, что в 1 м³ гидрата может содержаться до 170 м³ газа в свободном объеме в пересчете на метан. По содержанию энергии (теплотворной способности) газовые гидраты сопоставимы с битуминозной нефтью и нефтеносными песками.

Круг научных интересов Н. В. Черского был очень велик, основные из них – проблемы геологии, поиска, разведки и разработки газовых и нефтяных месторождений, создание научных основ конструирования газовых скважин, технологии их бурения и испытания и др. Благодаря личным усилиям Н. В. Черского было принято решение правительства страны о строительстве газопровода в Якутии в 1967 г. Им организована научная школа по геологии и технологии разработки газогидратных месторождений, а также по изучению явления преобразования органического вещества осадочных пород под действием сейсмостектонических процессов земной коры.

Научная школа по газогидратным исследованиям, созданная Н. В. Черским и его учениками д.т.н. В. П. Царевым и д.т.н. Э. А. Бондаревым, продолжает свое развитие в лаборатории техногенных газовых гидратов ИПНГ СО РАН. В докладе рассмотрены история становления лаборатории и основные направления исследований, а также представлены важнейшие результаты, полученные за последние годы.

В заключение приведу отрывок из очерка академика А. Э. Конторовича [4]: «При рассмотрении будущего мировой энергетики, при оценке ее ресурсного потенциала многие ученые считают, что гидратный газ в будущем, уже во второй половине XXI века, может стать главным компонентом мирового энергетического баланса».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокшанцев, К. Б. Основные черты геологического строения и перспективы нефтегазоносности Восточной Якутии / К. Б. Мокшанцев, Н. В. Черский – Якутск : Якут. кн. изд-во, 1961. – 134 с.
2. Конторович, А. Э. Н. В. Черский – основатель нефтегазового комплекса Якутии / А. Э. Конторович, А. Ф. Сафронов, Г. С. Фрадкин // Николай Васильевич Черский. – Якутск : ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2005. – С. 72–77.
3. Бондарев, Э. А. Газовые гидраты: последняя любовь Николая Васильевича Черского / Э. А. Бондарев // Николай Васильевич Черский. – Якутск : ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2005. – С. 88–104.
4. Конторович, А. Э. Н. В. Черский – человек, солдат, ученый, государственный деятель / А. Э. Конторович. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 23 с.

СЕКЦИЯ 1. ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ БЕСТРУБОПРОВОДНОЙ ДОСТАВКИ ГАЗА

Бубнова А. Р., Калачева Л. П., Иванова И. К.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск)

Арктическая зона Российской Федерации охватывает 9 регионов, из которых четыре являются полностью арктическими: Мурманская область, Ненецкий автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ и Чукотский автономный округ. Пять регионов имеют частичное отношение к арктической зоне: Республика Карелия, Архангельская область, Республика Коми, Красноярский край и Республика Саха (Якутия). Население данной зоны составляет 2,3 миллиона человек [1]. Арктическая зона характеризуется экстремальными природно-климатическими условиями, включая наличие постоянного ледового покрова и дрейфующих льдов в арктических морях. Для этой территории типичны очаговый характер промышленно-хозяйственной деятельности и низкая плотность населения. Регион отличается удалённостью от крупных промышленных центров, высокой ресурсоёмкостью и значительной зависимостью хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от поставок топлива, продовольствия и товаров первой необходимости из других регионов России.

Современная Арктика характеризуется, с одной стороны, значительными доказанными запасами углеводородов, которые являются основными источниками электроэнергии на мировом уровне, а с другой – наличием серьезных проблем с электроснабжением региона. Наиболее северные регионы России не интегрированы в систему централизованного электроснабжения, функционирующую по высоковольтным линиям электропередачи, и традиционно получают электроэнергию от устаревших дизель-генераторов и небольших угольных электростанций [2]. Кроме того, постоянные перебои в поставках электроэнергии вынуждают местных жителей хранить запасы дизельного топлива. Нехватка электроэнергии и её высокая стоимость существенно сдерживают темпы развития Арктического региона, делая его менее комфортным и привлекательным для местного населения.

В качестве альтернативных источников энергоснабжения могут рассматриваться ветряные электростанции, солнечные электростанции, ветро-

солнечные станции, приливные и геотермальные станции, объекты биоэнергетики. Так и традиционные источники, например, сжиженный природный газ, синтез-газ, атомные станции малой мощности и др.

В мировой практике существуют различные технологии доставки газа к потребителям, которые являются альтернативными трубопроводному транспорту. К ним относятся сжиженный природный газ, синтетическое жидкое топливо и компримированный природный газ. В настоящее время разрабатываются относительно новые эффективные технологии транспортировки газа – гидратные технологии, которые могут стать ключевыми решениями для энергообеспечения арктических регионов. С экономической точки зрения, гидратные технологии транспортировки газа более эффективно применять в проектах локальной автономной газификации потребителей и удаленных от основных газопроводов небольших населенных пунктов по сравнению с другими альтернативными способами доставки [3]. Главное преимущество гидратной технологии – это наличие холодного климата, который облегчает синтезировать, хранить и транспортировать газ в гидратном состоянии без больших энергетических затрат и финансовых вливаний. Поэтому данная технология направлена на использование природных газовых гидратов в качестве безопасной доставки энергетических ресурсов в условиях сурового климата и транспортной инфраструктуры арктических территорий.

Лаборатория техногенных газовых гидратов Института проблем нефти и газа СО РАН занимается изучением получения и свойств газовых гидратов, а также возможности хранения природного газа в гидратном состоянии на территории Республики Саха (Якутия). В качестве перспективных территорий для создания таких хранилищ рассматриваются площади Вилуйской синеклизы по пути следования магистрального газопровода «Кысыл-Сыр – Мастах – Якутск».

Газовые гидраты могут образовываться и стабильно существовать в широком интервале давлений и температур, например, для метана – от $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ МПа при температуре от 70 до 350 К [4]. На основе этого свойства гидратов в лаборатории разработан способ получения гидратов природного газа в виде пеллет определенной формы для их дальнейшего хранения и транспортировки в виде сухого груза в арктические районы, на который получен патент РФ [5].

На рис. 1. представлена установка для образования гидратов из природного газа и льда [5]. Метод получения гидратов природного газа заключается в их образовании из льда в среде природного газа при стабильном давлении и циклическом изменении температуры в диапазоне от 268 до 278 К, используя естественный холод окружающей среды. В этом процессе используется реактор с интегрированным в его стенки теплообменником, который разделён от внутреннего пространства реактора антивибрационным

слоем из инертного полимерного материала. Основное преимущество метода заключается в увеличении производительности при получении гидратов.

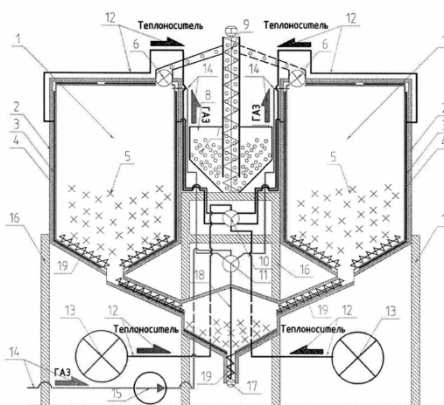


Рис. 1. Технологическая схема реактора получения газогидрата [5]

Таким образом, наличие сурового климата в зоне Арктики может способствовать развитию гидратной технологии, что имеет значительный потенциал для внедрения на рынок транспортировки природного газа до конечного потребителя. Поэтому необходимо дальнейшее изучение получения и разложения гидратов природного газа в условиях низких температур и атмосферных давлений.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (Рег. № 122011100157-5) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дашкевич, П. М. Демографические и социальные тенденции в Российской Арктике / П. М. Дашкевич, Н. А. Флуд, И. И. Елисеева // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2024. – № 4. – С. 197–222.
2. Zmieva, K. A. Problems of energy supply in the arctic regions // Russian Arctic. – 2020. – Vol. 8. – P. 5–14.
3. Сравнительные экономические характеристики гидратной транспортировки природного газа / С. И. Долгаев, В. Г. Квон, В. А. Истомин [и др.] // Вести газовой науки. – 2018. – № 1 (33). – С. 100–116.
4. Макогон, Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы / Ю. Ф. Макогон // Российский химический журнал. – 2003. – Т. 47, № 3. – С. 70–79.
5. Патент № 2714468 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 9/00, С07С 7/14, F25J 1/00. Способ получения гидратов из природного газа и льда : № 2019114642 : заявл. 13.05.2019 : опубл. 17.02.2020 / М. Е. Семенов, А. С. Портнягин, Е. Ю. Шиц ; заявитель ГБУ ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ CO₂ В ГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Иванов В. К., Калачева Л. П., Иванова И. К.

(ФИЦ ЯНЦ СО РАН, обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск)

Захоронение углекислого газа (CO₂) в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилуйской синеклизы представляет собой перспективное направление, соответствующее экологической доктрине Российской Федерации, направленной на снижение выбросов парниковых газов и смягчение последствий изменения климата. Однако, несмотря на теоретическую обоснованность и экологическую значимость, внедрение этой технологии сопровождается рядом серьезных проблем, требующих детального изучения.

Современные подходы к захоронению диоксида углерода в геологических формациях включают как методы, направленные на повышение добычи полезных ископаемых, например закачку CO₂ в истощенные нефтяные или газовые резервуары для увеличения нефтеотдачи, так и технологии долгосрочного хранения, такие как закачка в глубокие соляные формации или минерализованные водоносные горизонты [1]. При реализации этих методов важно учитывать риски, связанные с возможной миграцией CO₂ через проницаемые породы, его растворением в подземных водах и физико-химическими взаимодействиями с окружающими породами. Эти процессы могут привести к изменению фильтрационно-емкостных свойств пластов, что может повлиять на эффективность и безопасность хранения.

Одной из ключевых проблем при захоронении CO₂ является его высокая растворимость в воде, особенно при высоких давлениях. Это приводит к закислению подземных вод и может спровоцировать растворение горных пород. В Вилуйской синеклизе преобладают песчаники, песчаники с чередованием аргиллитов, алевролитов и глин (юрского возраста), а также песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов, бурых углей и лигнита (мелового возраста) [2]. В отличие от антропогенного закисления сульфатами, углекислотное подкисление ослабляет природные механизмы компенсации (гипсование), что может привести к существенным изменениям в структуре и свойствах пород [3]. Однако, в растворах гидрокарбоната натрия скорость растворения карбонатных пород снижается, что делает такие среды более стабильными для длительного хранения CO₂ [4].

Другой важной проблемой является чувствительность зоны стабильности гидратов CO₂ к изменениям температуры и минерализации подземных вод. Подмерзлотные водоносные горизонты Вилуйской синеклизы характеризуются разнообразием типов пластовых вод и включает

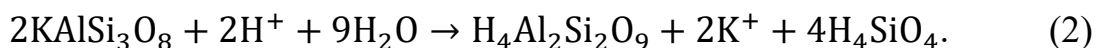
гидрокарбонатно-натриевые, хлоридно-натриевые и хлоридно-кальциевые воды с минерализацией от доли единиц до 200 г/л [5, 6]. С увеличением минерализации нижняя граница зоны стабильности смещается вверх, что ограничивает объем доступного пространства для захоронения. Экспериментальные исследования показали, что условия гидратообразования CO_2 в пористых средах с водой и растворами солей натрия совпадают с расчетными значениями, что подтверждает отсутствие влияния пористой среды на этот процесс [7].

Гидратообразование CO_2 сопровождается выделением тепла, что в сочетании с растворением газа и увеличением минерализации пластовых вод может привести к снижению температуры плавления льда и ускорению деградации многолетнемерзлых пород [8]. Это может вызвать экологические риски, включая разрушение инфраструктуры и выбросы парниковых газов.

При высоких давлениях растворимый углекислый газ взаимодействует с водой, образуя угольную кислоту (H_2CO_3), что приводит к снижению pH до 2,9–3,3 [9]. В таких условиях наиболее интенсивно разрушаются карбонатные породы, включая кальцит (CaCO_3) и доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), вследствие их реакции с ионами водорода (1):



Некоторые силикатные породы, такие как полевошпат (KAlSi_3O_8), также подвержены разрушению в кислой среде (2), трансформируясь в каолинит ($\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$):



Образование гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) в результате растворения карбонатных пород способствует повышению pH, создавая буферную систему, которая ограничивает дальнейшую кислотную агрессию углекислого газа и замедляет разрушение горных пород [3].

Углекислый газ снижает температуру замерзания воды в зависимости от его концентрации. Однако в условиях отрицательных температур и гидростатического давления выше 2-3 МПа, характерных для области распространения многолетнемерзлых пород, CO_2 преимущественно образует гидраты, даже в высокоминерализованных водах [7]. Таким образом, влияние CO_2 на смещение температуры замерзания воды оказывается незначительным из-за процессов гидратообразования, протекающих при этих условиях.

При гидратообразовании электролиты не включаются в кристаллическую структуру гидратов, что приводит к образованию зон с повышенной минерализацией. Именно такие электролиты оказывают значительное влияние на снижение температуры замерзания растворов. По методике [10] было рассчитано, что растворы NaHCO_3 с концентрацией 2 % и

5 % снижают температуру замерзания на 0,78 °С и 1,90 °С, а растворы NaCl с концентрацией 5 %, 10 % и 15 % – на 3,05 °С, 6,55 °С и 10,89 °С соответственно.

Заключение. Показано, что захоронение углекислого газа (CO₂) в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилуйской синеклизы сопровождается комплексом физико-химических процессов. Закисление подземных вод и разрушение карбонатных и силикатных пород под действием CO₂ могут не только изменить структуру и свойства вмещающих пород, но и теоретически увеличить область распространения газа за счет расширения порового пространства, что может повысить общий объем хранилища.

Однако образование зон повышенной минерализации в результате гидратообразования способно негативно повлиять на стабильность многолетнемерзлых пород, ускоряя их деградацию. Электролиты, не входящие в структуру гидратов, снижают температуру замерзания растворов, что также требует учета при оценке рисков. Гидрокарбонатно-натриевый тип вод частично компенсирует кислотное воздействие, замедляя разрушение пород, что делает такие среды более предпочтительными для хранения CO₂.

Таким образом, захоронение CO₂ в подмерзлотных горизонтах Вилуйской синеклизы, несмотря на экологическую значимость, требует детального анализа физико-химических процессов для минимизации рисков и обеспечения долгосрочной устойчивости хранилищ.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (Рег. № 122011100157-5) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры / С. А. Переверзева, П. К. Коносовский, А. В. Тудвачев [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2014. – № 1. – С. 5–21.
2. Семенов, В. П. Геотермические условия Вилуйской синеклизы / В. П. Семенов, М. Н. Железняк // Криосфера Земли. – 2013. – Т. 17, № 4. – С. 3–10.
3. Крайнов, С. Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швец – М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
4. Anabaraonye, B. U., Crawshaw, J. P., Trusler, J. P. M. Brine chemistry effects in calcite dissolution kinetics at reservoir conditions // Chemical Geology. – 2019. – Vol. 509. – P. 92–102.
5. Железняк, М. Н. Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы / М. Н. Железняк, В. П. Семенов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2020 – 123 с.
6. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР : справочник / под ред. Л. М. Зорькина – М. : Недра, 1989. – 383 с.
7. Оценка возможности захоронения углекислого газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилуйской синеклизы / Л. П. Калачева,

И. К. Иванова, А. С. Портнягин [и др.] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 125–142.

8. Равновесные условия образования и стабильность гидратов углекислого газа в засоленных пористых средах / Л. П. Калачева, И. К. Иванова, А. С. Портнягин [и др.] // Российский химический журнал. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 88–95.

9. Carlson, H. A. The pH of water from gas-condensate well saturated with carbon dioxide at various pressures // Petr. Eng., 1946. – Vol. 18, № 2. – P. 160–164.

10. Chen, C. S., Nagy, S. Prediction and correlation of freezing point depression of aqueous solutions // Transactions of the ASAE. – 1987. – Vol. 30, № 4. – P. 1176–1180.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАКАЧКЕ ГАЗА В ПОДМЕРЗЛОТНЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР

Иванов Г. И.^{1,2}, Рожин И. И.²

¹(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

²(ФИЦ ЯНЦ СО РАН, обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа
СО РАН, Якутск)

В регионах, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты, имеются термодинамические предпосылки для хранения газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Создание таких хранилищ газа будет способствовать многократному снижению объема хранилищ и повышению их стабильности по сравнению с обычными подземными газохранилищами, а подошва многолетнемерзлых пород будет служить естественным непроницаемым для газа экраном. Более того, незначительное заглубление емкостей обеспечивает весьма экономичное создание охлажденных гидратных газохранилищ для выравнивания как суточных, так и сезонных неравномерностей газопотребления.

Настоящая работа является продолжением исследований по математическому моделированию подземного хранения природного газа (ПГ) [1] и захоронения диоксида углерода (CO₂) [2] в гидратном состоянии. При этом используется метод оценки возможности подземного хранения газа в виде гидрата в подходящих с геологической точки зрения подмерзлотных водоносных горизонтах, изложенный в статьях [3, 4].

Для проведения вычислительных экспериментов использованы результаты расчетных и лабораторных экспериментов по определению равновесных условий образования гидратов ПГ и CO₂ в свободном объеме (система «газ + вода») и поровом пространстве дисперсных сред и водных растворах, имитирующих пластовые воды подмерзлотных горизонтов [5, 6]. Получено, что равновесные условия гидратообразования CO₂ смещены относительно условий гидратообразования ПГ в область более высоких

давлений и низких температур для системы «газ + вода», а для систем «газ + песок + вода», «газ + песок + 0,25 % NaHCO_3 », «газ + песок + 2 % NaHCO_3 » – наоборот, в область более низких давлений и высоких температур. Следует отметить, что принятые в расчетах начальные пластовые условия благоприятствуют образованию гидратов обоих газов для системы «газ + вода», а при использовании равновесных условий образования гидратов в поровом пространстве – гидратообразованию только для CO_2 .

Для системы «газ + вода» получено, что в случае закачки CO_2 температура и давление в целом будут меньше, чем в случае ПГ в основном из-за отличия эмпирических коэффициентов α_1 и α_2 , входящих в зависимость равновесной температуры гидратообразования от давления: $T_{ph} = \alpha_1 \ln p + \alpha_1$. Поля водонасыщенности практически совпадают. Профили полей давления и гидратонасыщенности при обоих расходах нагнетания почти идентичны, т. е. для образования гидратов основной движущей силой является давление. За небольшое время температура, давление и гидратонасыщенность существенно возрастают в призабойной зоне скважины, где часть воды переходит в гидрат, а остальная часть вместе с нагнетаемым газом движется по пласту. При большем расходе для обоих газов ближе к концу процесса закачки ($t = 100$ сут) часть пластовой воды выталкивается нагнетаемым газом за пределы расчетной области пласта, что приводит к резкому увеличению проницаемости внешнего контура для газа. За счет этого давление и температура падают и, как следствие, происходит разложение гидратов (см. рис. 1б, 1г, 1е).

Наиболее интенсивное образование гидратов происходит в случае большего расхода газа (сравни рис. 1а, 1в, 1д с рис. 1б, 1г, 1е) и минерализованной пластовой воды (н-р, сравни рис. 1а с рис. 1в; рис. 1б с рис. 1г). При большем расходе газа уменьшение гидратонасыщенности в конце процесса закачки происходит за счет резкого увеличения проницаемости внешнего контура пласта для газа, как и в случае системы «газ + вода». Полной закупорки пор в призабойной зоне нагнетательной скважины не происходит.

Анализ динамик изменения гидратонасыщенности (рис. 1) показал, что в случае использования в расчетах равновесных условий гидратообразования для систем «газ + песок + 0,25 % NaHCO_3 » (рис. 1в, 1г) гидратонасыщенность выше, чем для других систем. Выявлена связь гидратонасыщенности с эмпирическими коэффициентами условия термодинамического равновесия: в случае ПГ она будет выше для системы с большим значением коэффициента α_1 и малым значением коэффициента α_2 , а в случае CO_2 – наоборот. В рассмотренных условиях для создания подземного газохранилища следует выбирать пласт с гидрокарбонатно-натриевым типом вод.

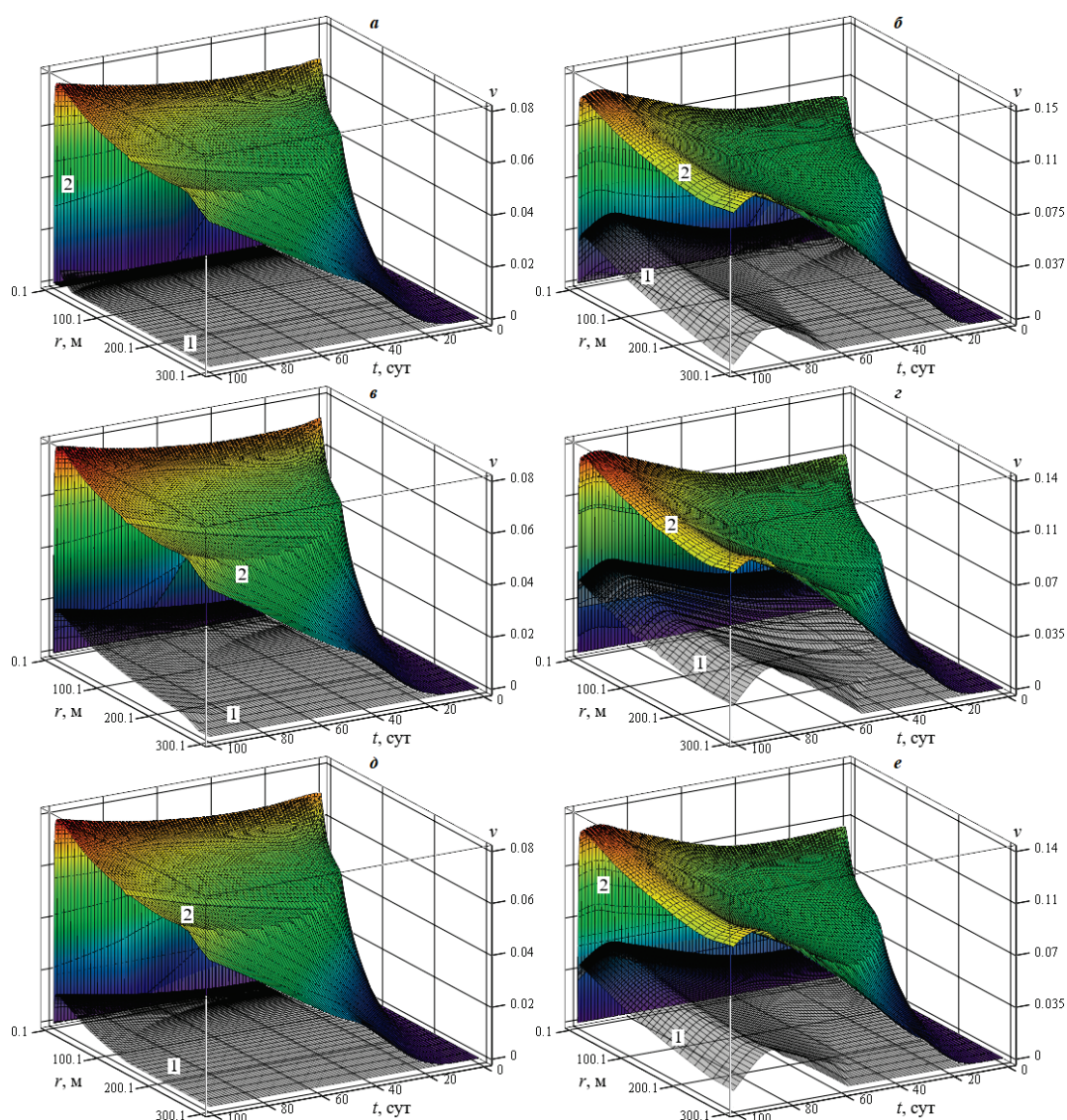


Рис. 1. Поля гидратонасыщенности для систем «газ + песок + вода» (а, б); «газ + песок + 0,25 % NaHCO_3 » (в, г) и «газ + песок + 2 % NaHCO_3 » (д, е) при расходе нагнетания газа $1 \text{ м}^3/\text{с}$ (а, в, д) и $2 \text{ м}^3/\text{с}$ (б, г, е): поверхности 1 – ПГ; 2 – CO_2

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (Рег. № 122011100157-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рожин, И. И. Моделирование образования гидратов при нагнетании газа в подмерзлотный водонасыщенный коллектор с учетом данных лабораторных экспериментов по равновесным условиям гидратообразования в свободном объеме и пористой среде / И. И. Рожин, Г. И. Иванов // EURASTRENCOLD-2023 : сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В. П. Ларионова. – Киров : Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2023. – С. 525–530.

2. Рожин, И. И. Численное моделирование гидратообразования при нагнетании углекислого газа в подмерзлотный водоносный пласт / И. И. Рожин, Г. И. Иванов // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (ТЭГУА–2023) : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н. С. Иванова. Якутск : Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, 2023. – С. 111–113.
3. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты / Э. А. Бондарев, И. И. Рожин, В. В. Попов [и др.] // Криосфера Земли. – 2015. – Т. XIX, № 4. – С. 64–74.
4. Bondarev, E. A., Rozhin, I. I., Popov, V. V., Argunova, K. K. Underground storage of natural gas in hydrate state : primary injection stage // Journal of Engineering Thermophysics. – 2018. – Vol. 27, №. 2. – P. 221–231. – DOI 10.1134/S181023281802008X.
5. Kalacheva, L. P., Ivanova, I. K., Portnyagin, A. S., Rozhin, I. I., Argunova, K. K., Nikolaev, A. I. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters // SOCAR Proceedings. – 2021. – Special issue 2. – P. 001–011. – DOI 10.5510/OGP2021SI200549.
6. Оценка возможности захоронения углекислого газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилюйской синеклизы / Л. П. Калачева, И. К. Иванова, А. С. Портнягин [и др.]. Текст : электронный // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2023. – Т. 18, № 4. – 18 с. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/2023/43_2023.html.

ПРОЦЕСС НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА С УЧЕТОМ ЗАМЕЩЕНИЯ CO₂-CH₄ В ГИДРАТЕ МЕТАНА

Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л., Бельских Д. С.

(Тюменский филиал ФГБУН Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Тюмень)

Одной из основных проблем в настоящее время является нехватка энергетических ресурсов, поэтому возникает необходимость осваивать все новые их виды. К таким новым ресурсам можно отнести и залежи природных газовых гидратов, которые могут заместить традиционные месторождения углеводородного сырья в связи с их постепенным истощением. Газогидратные месторождения, содержащие значительные запасы газа, представляют собой перспективный источник углеводородов [1]. Одним из инновационных способов разработки газогидратных залежей и отбора из них газа является замещение метана в его гидрате углекислым газом [2–4]. Интерес к данной теме обусловлен возможностью получения дополнительных энергоносителей из имеющихся газогидратных месторождений, а также захоронением парникового углекислого газа, в связи с изменяющимся климатом Земли, что связывают, в том числе и с увеличивающимся выбросом парниковых газов [5].

Проведенные экспериментальные исследования также подтверждают практическую возможность применения данного метода [6, 7]. Основное преимущество данного метода перед альтернативными подходами заключается в сочетании секвестрации углекислого газа и добычи метана без значительных геологических рисков [2, 3].

В данной работе предложена математическая модель, описывающая процесс неизотермической фильтрации многокомпонентной газовой смеси с учетом фазовых переходов и замещения метана углекислым газом в составе газового гидрата. В модели дополнительно учитываются такие факторы, как фильтрационное течение воды и газа, реальные свойства газа, эффекты Джоуля-Томсона и адиабатического сжатия; процесс замещения $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ в газогидрате предполагается равновесным [8]. На основе этой модели в одномерном осесимметричном приближении рассматривается процесс закачки углекислого газа в пласт, в начальный момент насыщенный метаном и его гидратом, с учетом процесса замещения $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ в газогидрате при различных параметрах закачиваемого флюида и пласта.

На рис. 1 представлены распределения по радиальной координате давления, температуры, насыщенностей гидратами метана и углекислого газа, водонасыщенности и массовой доли CO_2 в газовой фазе в различные моменты времени с начала закачки углекислого газа в пласт. Анализ распределений показывает, что со временем давление в пласте возрастает, что приводит к вытеснению метана. Поскольку температура закачиваемого углекислого газа превышает равновесную температуру гидратообразования, в прискваженной зоне гидраты не формируются, а на небольшом участке пласта за фронтом замещения в порах пласта присутствует свободная вода. Также отметим наличие на некотором участке пласта совместной фильтрации углекислого газа и метана. Из распределения давления на рис. 1 видно, что на 90 сутки давление во всем пласте практически сравнялось с давлением закачки CO_2 , что соответствует фактическому прекращению процесса фильтрации. Для повышения эффективности замещения и увеличения объема захороненного углекислого газа целесообразно использовать не только нагнетательную скважину, но и добывающую скважину для отбора метана из пласта.

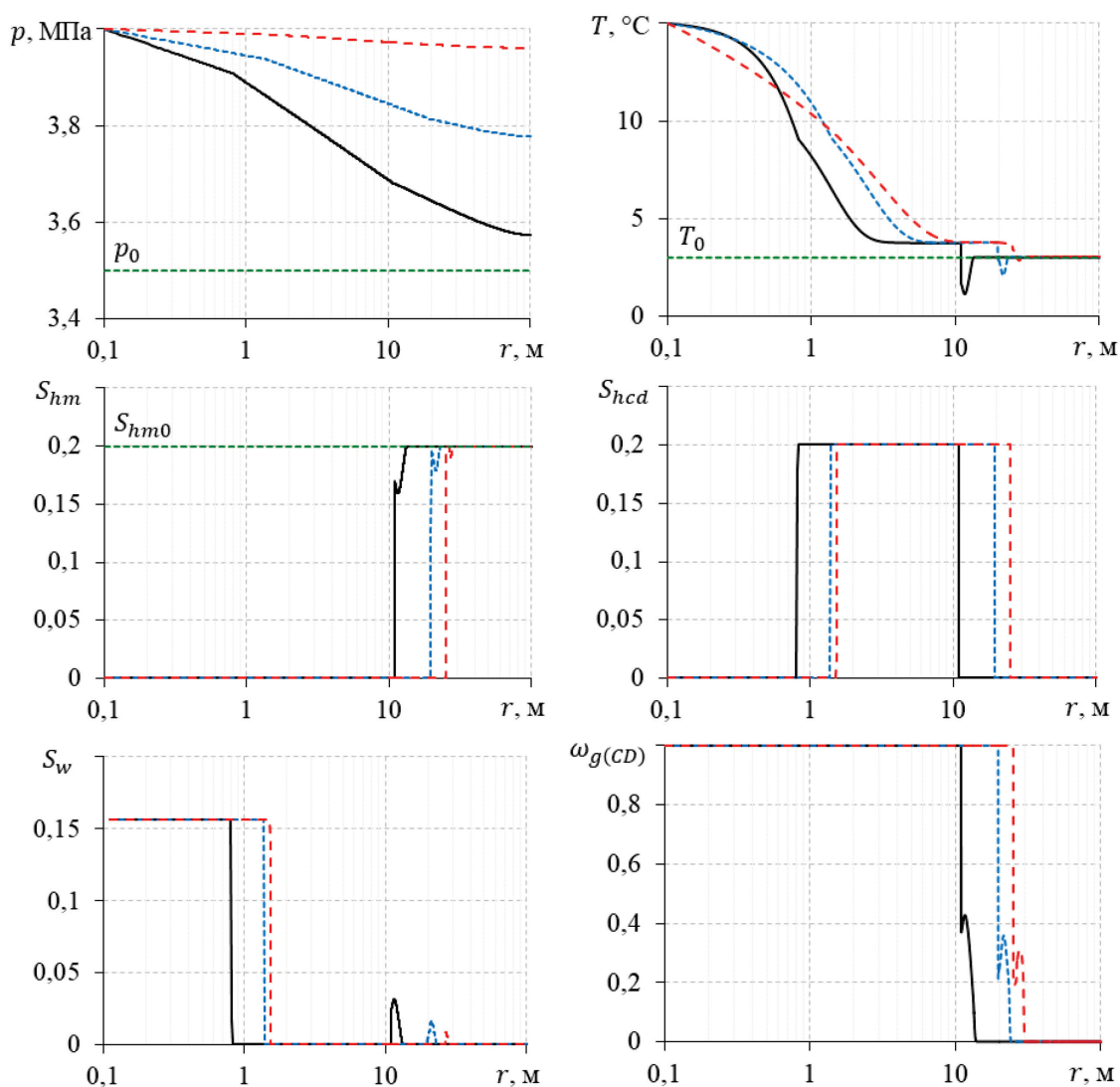


Рис.1. Распределения по координате r давления p , температуры T , насыщенностей гидратами метана S_{hm} и углекислого газа S_{hcd} , водонасыщенности S_w и массовой доли CO_2 в газовой фазе $\omega_{g(cd)}$. Чёрная, синяя и красная линии соответствуют времени с начала закачки углекислого газа в пористый пласт $t = 7, 30$ и 90 суток

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124021500017-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Makogon, Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy // J. of Natural Gas Science and Engineering. – 2. – 49–59 (2010).
2. Zhang, L., Yang, L., Wang, J., Zhao, J., Dong, H., Yang, M., Liu, Y. and Yongchen, Song. Enhanced CH_4 Recovery and CO_2 Storage via Thermal Stimulation in the CH_4/CO_2 Replacement of Methane Hydrate // Chemical Engineering J. – 308, 40–49 (2017).
3. Niu, M., Yin, Z., Sun, Y., Fang, W., Chen, G. and Chen, D. CH_4 hydrate production coupled with CO_2 sequestration and hydrate restoration employing depressurization assisted by CO_2 - N_2 injection at marine conditions // Chemical Engineering J. – 456, 140981 (2023).

4. Gajanan, K., Ranjith, P. G., Yang, S. Q. and Xu, T. Advances in research and developments on natural gas hydrate extraction with gas exchange // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 190 (B) 114045 (2024).
5. Zhang, L., Bai, T., Zhao, Q., Zhang, X., Cheng, H. and Li, Z. CO₂ Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage in Complex Tight Sandstone Gas Reservoirs // Processes – 11 (7), 2059 (2023).
6. Boswell, R., Schoderbek, D., Collett, T. S., Ohtsuki, S., White, M. E. and Anderson, B. J. The Iñik Sikumi Field Experiment, Alaska North Slope: Design, Operations, and Implications for CO₂–CH₄ Exchange in Gas Hydrate Reservoirs // Energy & Fuels. – 31 (1), 140–153 (2017).
7. Yao, Y., Niu, M., Sun, Y. and Chen, D. Significance of well placement and degree of hydrate reserve recovery for synergistic CH₄ recovery and CO₂ storage in marine heterogeneous hydrate-bearing sediments // Geoenergy Science and Engineering. – 242, 213290 (2024).
8. Musakaev, N. G., Borodin, S. L. and Belskikh, D. S. Methodology for Calculating the Parameters of Non-isothermal Filtration Considering the CO₂–CH₄ Replacement in Methane Hydrate // Lobachevskii J. of Mathematics. – 45 (5). – 2103–2110 (2024).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ

Саввинова Н. А., Тимофеев А. М., Егорова Г. Н.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск)

Исследование температурного состояния снежно-ледовых систем представляет особый практический интерес с точки зрения освоения северных и арктических территорий. Формирование теплового режима таких систем зависит от множества факторов: оптических и теплофизических параметров; конвективного и радиационного охлаждения на поверхности покрова; теплового взаимодействия с подложкой и т.д. Исследованию теплообмена в полупрозрачных средах, таких как лед и снег, под воздействием солнечного излучения посвящено достаточно много работ [1–3]. В них отмечается существенное влияние оптических параметров среды. При моделировании процессов теплообмена в многослойных средах, необходимо учесть изменение теплофизических и оптических свойств слоев, а также сопряжение температурных и радиационных полей на границах поверхностей.

В данной работе рассматривается математическое моделирование теплообмена в двухслойной среде. Теплофизические параметры слоев приняты одинаковыми, а оптические – различными. На верхнюю границу падает внешнее солнечное излучение. Температура нижней поверхности системы T_L формируется под воздействием пропущенного слоем излучения и отвода тепла теплопроводностью в непрозрачную полубесконечную подложку. Толщина полупрозрачных слоев принята одинаковой ($l=L/2$).

Уравнение теплопроводности решалось для одного слоя, поскольку теплофизические параметры слоев в данной постановке принимались близкими.

Математическая постановка включает в себя уравнение нестационарного теплопереноса с заданными начальными и граничными условиями. Для расчета радиационной части использовался модифицированный метод средних потоков с тремя спектральными полосами поглощения излучения [4]. В расчетах приняты следующие параметры: $T_0 = T_a = -20^\circ\text{C}$, $T_R = -50^\circ\text{C}$, $Sk = 0,1$, $Bi = 1$, $k = 1$, $n(\text{льда}) = 1,31$. Коэффициенты поглощения и рассеяния слоев варьировались. Коэффициент отражения на верхней границе слоев принят равным 0,063 и 0,5 соответственно. Плотность падающего потока солнечного излучения составила: в диапазоне длин волн, соответствующей ультрафиолетовой и видимой части спектра (0–0,75 мкм) – $q^* = 172 \text{ Вт/м}^2$; в ближней и средней инфракрасной области спектра (0,75–3 мкм) – $q^* = 140 \text{ Вт/м}^2$; в дальней инфракрасной области спектра (3 мкм и более) – $q^* = 140 \text{ Вт/м}^2$ [3].

На рис. 1 и 2 показаны результаты моделирования теплового состояния слоев для умеренных оптических толщин.

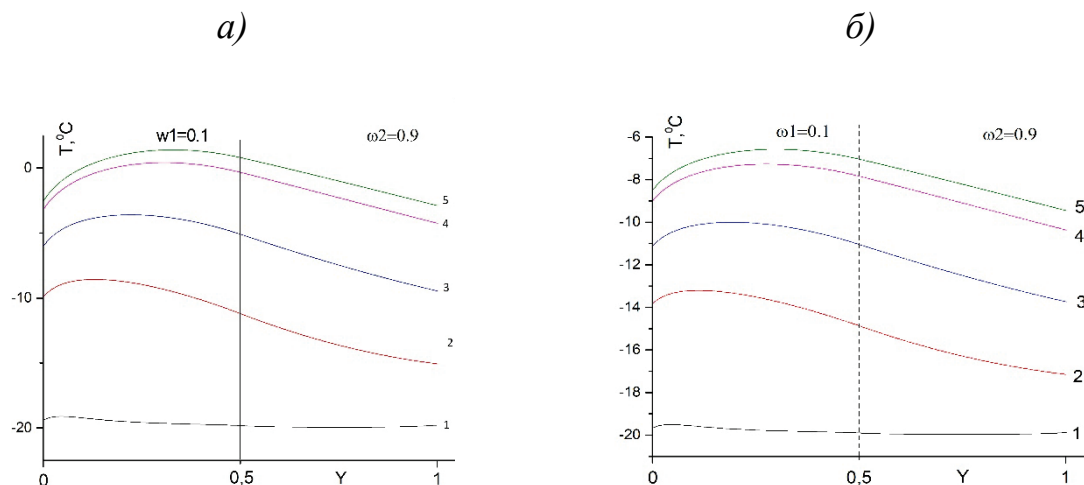


Рис. 1. Распределение температуры в полупрозрачной двухслойной среде в различные моменты времени. $Fo = 0,01$ (1), $0,3$ (2), $0,7$ (3), $1,4$ (4), $1,7$ (5); а) $\omega_{1v} = 0,1$ и $\omega_{2v} = 0,9$ при $R_{1v} = 0,063$ и $R_{2v} = 0$; б) $\omega_{1v} = 0,1$ и $\omega_{2v} = 0,9$ при $R_{1v} = 0,5$ и $R_{2v} = 0$

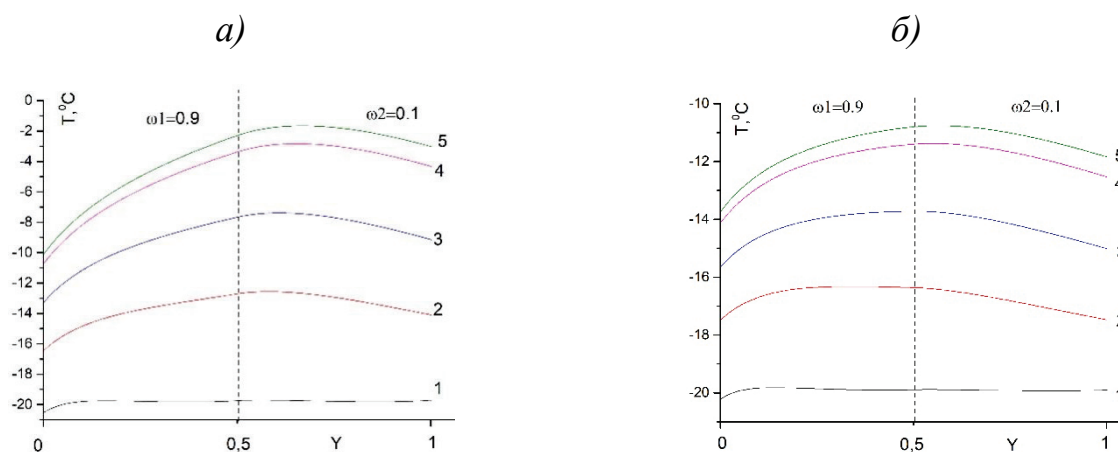


Рис. 2. Распределение температуры в полупрозрачной двухслойной среде в различные моменты времени. $Fo = 0,01$ (1), $0,3$ (2), $0,7$ (3), $1,4$ (4), $1,7$ (5); а) $\omega_{1v} = 0,9$ и $\omega_{2v} = 0,1$ при $R_{1v} = 0,063$ и $R_{2v} = 0$; б) $\omega_{1v} = 0,9$ и $\omega_{2v} = 0,1$ при $R_{1v} = 0,5$ и $R_{2v} = 0$

Результаты показывают, что в случае, когда оба слоя являются преимущественно поглощающими (при $\omega_{iv} = 0,1$) падающее излучение интенсивнее нагревает верхние слои. При значениях коэффициента отражения на верхней границе $R = 0,063$, что соответствует коэффициенту черноты близкому к 1 (рис.1а и рис. 2а), температура внутри слоев заметно выше, чем при $R = 0,5$.

Проведенное моделирование теплообмена в двухслойной полупрозрачной среде показало сложный характер формирования температурного поля. Установлено влияние оптических параметров, в частности, разные значения спектрального альбеда однократного рассеяния и коэффициента отражения на границе слоев. Увеличение спектрального альбеда приводит к замедлению нагрева слоя при неизменном коэффициенте отражения на границе слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красс, М. С. Радиационная теплофизика снега и льда / М. С. Красс, В. Г. Мерзликин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. – 261 с.
2. Dombrovsky, L. A., Kokhanovsky, A. A. Solar heating of ice sheets containing gas bubbles // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. – 2020. – Vol. 250. – P. 106991.
3. Тимофеев, А. М. Влияние оптических свойств на радиационно-кондуктивный теплообмен в двухслойной полупрозрачной системе / А. М. Тимофеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 135–142.
4. Рубцов, Н. А. Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах / Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев, Н. А. Саввинова. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. – 198 с.

ГИДРАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ДОБЫЧИ, ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Семенов М. Е.^{1,2}, Стопорев А. С.³, Мирзакимов У. Ж.¹, Павельев Р. С.¹, Гнездилов Д. О.¹,
Манаков А. Ю.^{1,4}, Варфоломеев М. А.¹

¹(ФГАОУ ВО Казанский федеральный университет, Казань)

²(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск)

³(ФГАОУ ВО Московский физико-технический институт, Москва)

⁴(ФГБУН Институт неорганической химии имени А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск)

Газовые гидраты представляют собой соединения включения, образующиеся в результате внедрения молекул газов, таких как метан, этан, пропан, изобутан, диоксид углерода, азот, сероводород и другие, в полости кристаллической решётки, сформированной молекулами воды при определённых термобарических условиях, как правило, при низких температурах и повышенных давлениях. Данные соединения характеризуются способностью к концентрированию значительных объёмов газа в компактном твердом состоянии при относительно низких давлениях. Одним из ключевых свойств газовых гидратов является эффект самоконсервации, заключающийся в замедлении или полном прекращении их разложения при отрицательных температурах и атмосферном давлении [1]. Эти свойства обуславливают высокий потенциал газовых гидратов в технологическом применении, в частности, в области транспорта и хранения газов.

Актуальность газогидратных технологий возрастает в связи со смещением нефтегазодобычи в северные регионы России и на Арктический шельф. Разработка месторождений в этих районах сопряжена с суровыми эксплуатационными условиями, включая низкие температуры, строгие экологические нормативы и слабую инфраструктурную обеспеченность. В результате традиционные методы транспортировки и хранения углеводородов становятся менее эффективными, что требует новых технологических решений. Одним из ключевых вызовов в таких условиях является образование газовых гидратов в процессе добычи и транспортировки, которое может привести к закупорке трубопроводов, выходу из строя оборудования и аварийным ситуациям.

На сегодняшний день для предотвращения гидратных осложнений широко применяются термодинамические ингибиторы гидратообразования (ТИГ), такие как метанол, а также эксплуатация трубопроводов за пределами зоны термодинамической устойчивости гидратов (например, за счёт подогрева). Однако эти методы имеют ряд серьёзных ограничений: высокие экономические затраты, экологические риски и технологическая неприемлемость для некоторых условий, в частности, глубоководной добычи.

В связи с этим актуализируется поиск более эффективных и экологичных методов борьбы с гидратообразованием.

Одним из альтернативных подходов является использование новых типов реагентов – кинетических ингибиторов гидратообразования (КИГ), которые замедляют образование гидратов без значительного изменения термодинамических условий. Однако большая часть экспериментальных исследований по ТИГ и КИГ проводилась на дистиллированной воде и упрощённых газовых смесях, тогда как в реальных условиях добычи и транспортировки используются минерализованные воды и сложные газовые составы. В связи с этим необходимо проведение исследований в условиях, приближенных к промышленным, что и является одной из задач настоящей работы.

Параллельно с разработкой методов предотвращения гидратообразования в нефтегазовой отрасли формируется новое понимание того, что присутствие газогидратных частиц в потоке не всегда представляет проблему. При отсутствии агломерации и осаждения на стенках трубопровода, а также при минимальном влиянии на реологические свойства флюидов такие частицы могут безопасно транспортироваться вместе с потоком без риска закупорки [2]. В связи с этим перспективным направлением является контролируемое формирование гидратных частиц с использованием специальных реагентов: кинетических промоторов (ускоряющих гидратообразование), термодинамических промоторов (повышающих устойчивость гидратов) и антиагломерантов (предотвращающих агломерацию) [3]. В рамках настоящего исследования рассматривается возможность получения газовых гидратов в условиях, приближенных к реальным, путём подбора оптимальных промоторов.

Помимо решения проблем, связанных с предотвращением гидратообразования в трубопроводах, газовые гидраты рассматриваются как перспективный материал для хранения и транспортировки природного газа. Этот метод обладает рядом преимуществ: экологическая безопасность, относительно низкие требования к температуре и давлению хранения, а также высокая ёмкость газосодержания [4]. Среди перспективных направлений – использование газа с малых и средних месторождений для локального снабжения, транспортировка попутного нефтяного газа без необходимости строительства газовой инфраструктуры, а также создание пиковых хранилищ для регулирования газоснабжения в периоды сезонных колебаний спроса.

В России накоплен значительный научный потенциал в области гидратных технологий, что создаёт основу для их промышленного внедрения в сотрудничестве с нефтегазовыми компаниями. В последние годы активизировалась работа по обмену знаниями и обсуждению перспективных разработок между отечественными центрами изучения газовых гидратов. Важной задачей остаётся совершенствование методов получения газовых гидратов, поскольку именно этот этап определяет рентабельность всей

технологической цепочки. В КФУ ведутся научно-технические проекты, направленные на разработку новых реагентов для ускоренного гидратообразования [5], а технологические решения для остальных стадий уже существуют в промышленности и могут быть адаптированы к условиям гидратных технологий.

Следует выделить, что **гидратообразование в трубопроводах** остаётся одной из ключевых проблем при добыче и транспортировке углеводородов, требующей эффективных методов контроля. Разработка и внедрение более экологичных альтернатив существующим ингибиторам является приоритетной задачей, а **контролируемое формирование гидратных частиц** представляет собой перспективный подход к стабилизации потока углеводородов, позволяющий избежать закупорки трубопроводов и снизить эксплуатационные расходы. **Развитие газогидратных технологий хранения и транспортировки газа** особенно актуально в контексте добычи на удалённых месторождениях и соблюдения строгих экологических требований. Следовательно, необходимо расширение исследований, приближенных к реальным условиям добычи и транспортировки, а также проведение опытно-промышленных испытаний.

Таким образом, газогидратные технологии представляют собой перспективное направление для оптимизации процессов добычи, транспортировки и хранения природного газа. Их внедрение требует дальнейших исследований и разработок, а также координации усилий научного и промышленного сообществ.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффект самоконсервации газовых гидратов / В. А. Истомин, В. С. Якушев, Н. А. Махонина [и др.] // Газовые гидраты: приложение к журналу «Газовая промышленность» (специальный выпуск). – 2006. – С. 36–46.
2. Манаков, А. Ю. Актуальные аспекты физической химии газовых гидратов и их технологического применения / А. Ю. Манаков, А. С. Стопорев // Успехи химии. – 2021. – № 90 (5). – С. 566–600.
3. Патент 2757196 Российская Федерация, МПК C10L 3/06 (2006.01), C10L 3/10 (2006.01), F25J 1/00 (2006.01), F17D 3/00 (2006.01). Способ транспортировки нефти с высоким газовым фактором с использованием контролируемого потока гидратов: № 2021111400: заявл. 22.04.2021: опубл. 11.10.2021, Бюл. № 29 / М. А. Варфоломеев, А. С. Стопорев, Р. С. Павельев, М. Е. Семенов; патентообладатель ФГАОУ ВО КФУ. – 32 с.
4. Veluswamy, H. P., Kumar, A., Seo, Y., Lee, J. D., Linga, P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates // Applied Energy. – 2018. – P. 262–285.

5. Текущее состояние и перспективы развития гидратной технологии хранения и транспортировки природного газа (обзор) / М. Е. Семенов, Р. С. Павельев, А. С. Стопорев [и др.] // Петролеомика. – 2021. – № 2 (1). – С. 2–17.

ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Семенов С. О.¹, Малышев А. В.¹, Большев К. Н.¹, Саввинова Н. А.²

¹(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им В. П. Ларионова СО РАН, Якутск)

²(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Исследованы тепловые и массообменные процессы в песчаных образцах при однонаправленном промерзании [1–3]. Разработана экспериментальная установка на основе емкостного метода, позволяющая фиксировать динамику влагопереноса и температурные градиенты в зоне фазового перехода вода–лёд. Установлено влияние капиллярных сил и гравитации на перераспределение влаги, а также выявлен эффект капиллярного подъема при ледообразовании. Результаты верифицированы весовым методом и согласуются с данными по относительной диэлектрической проницаемости ОДП.

Изучение тепло- и массопереноса в дисперсных средах при фазовых переходах актуально для прогнозирования устойчивости мерзлых грунтов и строительных материалов в вечной мерзлоте. В отличие от предыдущих работ [4], в данном исследовании акцент сделан на совместном анализе тепловых и массообменных процессов с использованием емкостной методики с частотой 12 кГц и переменным напряжением 5 В.

Образцы: В исследованиях использовался предварительно осушенный мелкозернистый песок, соответствующий ГОСТ 32727-2014 (модуль крупности 1,64). Материал характеризуется высокой степенью однородности (коэффициент неоднородности $C_u = 1,44 < 3$). Начальная массовая влажность образцов составляла 15 %.

Измерительная система: Температурный мониторинг осуществлялся с помощью термопар типа К с 16-битным внешним АЦП цифрового датчика DS18B20, выполняющего функцию опорного температурного эталона для термопар.

Система охлаждения: Теплообменник, соединенный с криостатом «КРИО-ВТ-05-01» рабочий диапазон температур: от +20 °С до –40 °С измерение диэлектрических характеристик: емкостные зонды с рабочей частотой 12 кГц точность измерения диэлектрической проницаемости ± 2 %.

Процедура эксперимента: проводилось однонаправленное

замораживание образцов с верхней границы с одновременной регистрацией. Все измерительное оборудование было предварительно откалибровано с использованием эталонных материалов. Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,3$ °C, влажности – $\pm 1,5$ %.

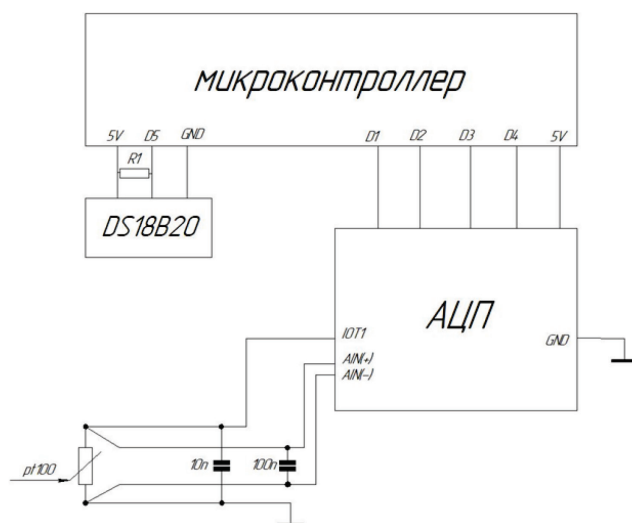


Рис. 1. Измерительная схема подключения термометра *pt100* с компенсацией на *ds18b20*

Температурные градиенты: В зоне фазового перехода (позиция 3 на рис. 2) зафиксирован резкий подъем ДП.

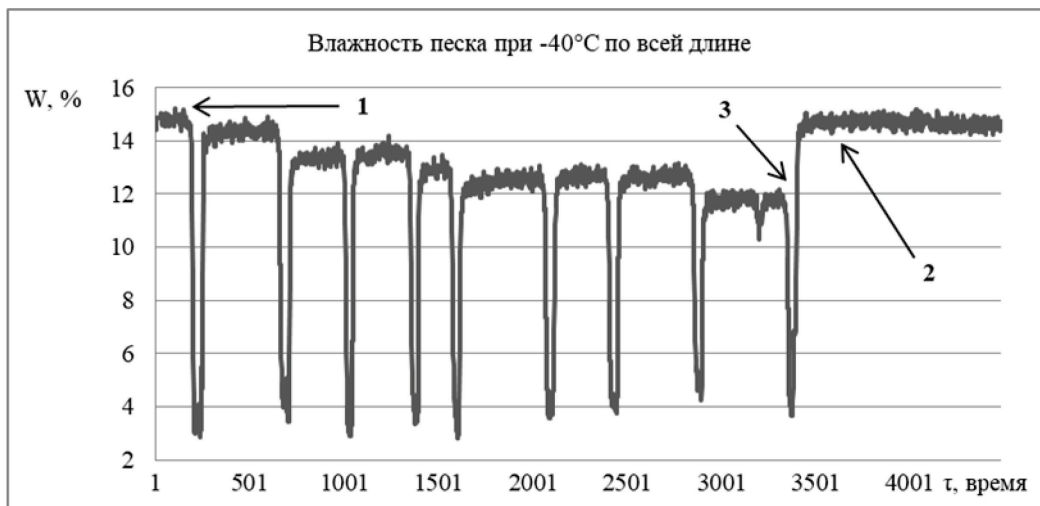


Рис. 2. График показателей влажности по высоте образца в процессе промерзания

Максимум влажности – в нижнем слое (позиция 1), из-за гравитации капиллярный подъем при промерзании верхнего слоя (позиция 2) увеличил локальную влажность на 2 %. Диэлектрические свойства: резкое падение ϵ' воды при переходе в лёд (с 80 до 3,2) подтвердило точность метода (см. рис. 3),

но есть нюансы при измерении в области фазового перехода из-за перколяции.

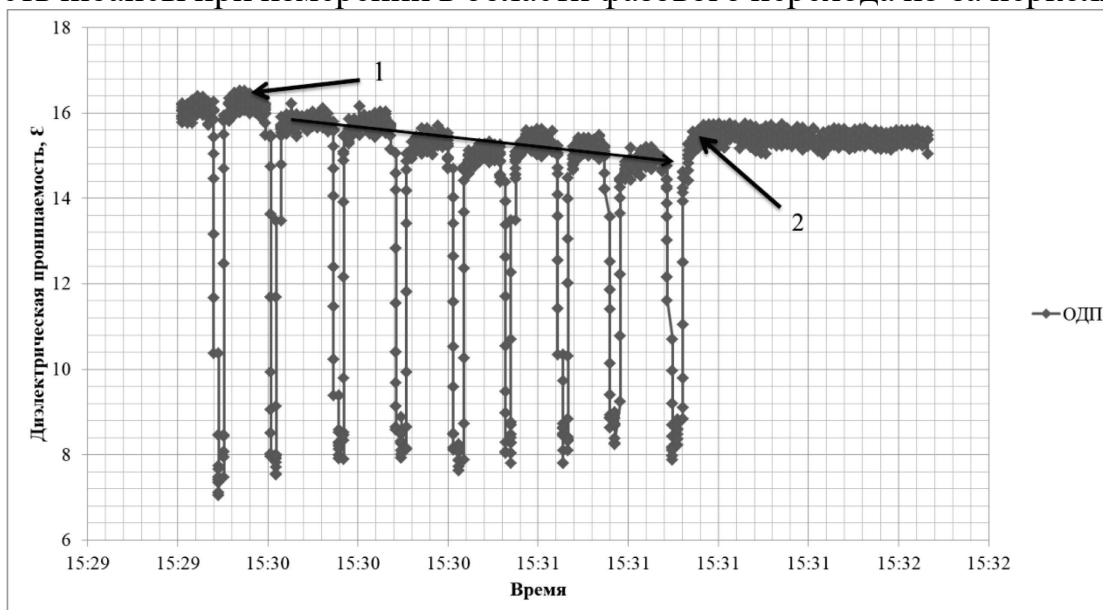


Рис. 3. График показателей диэлектрической проницаемости по высоте образца в процессе промерзания

Эффекты перколяции и капиллярного подъема согласуются с моделью [6], но требуют учета температурной поправки для ϵ' . Применение результатов возможно в расчетах теплозащиты фундаментов в мерзлоте, разработке методов контроля влажности грунтов.

Установка позволяет зафиксировать тепломассоперенос при фазовых переходах в реальном времени. Дальнейшие исследования включают анализ других дисперсных сред (глины, торф).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордонский, Г. С. Диэлектрические свойства мерзлых сред / Г. С. Бордонский – Новосибирск : Наука, 2002.
2. Ефимов, М. С. Влага гигроскопических материалов / М. С. Ефимов – М. : Наука, 1986.
3. Тепло- и массообмен во влажных материалах / АН СССР ; Якутский филиал Сибирского отделения ; Институт физико-технических проблем Севера. – Якутск : Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1975. – 148 с.
4. Теплофизические и массообменные свойства гигроскопических материалов : сборник научных трудов. – Якутск : Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1977. – 116 с.
5. Ефимов, М. С. Влага гигроскопических материалов / М. С. Ефимов. – Новосибирск : Наука, 1986.
6. Бордонский, Г. С. Влияние перколяции на диэлектрические свойства мерзлых дисперсных сред / Г. С. Бордонский, Т. Г. Филиппова // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2002. – Т. 4, № 1. – С. 21–26.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В КЕЛОРСКОМ ГОРИЗОНТЕ КЭДЭРГИНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сивцев А. И.¹, Рожин И. И.²

¹(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

²(ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа
СО РАН, Якутск)

В Предпатомском региональном прогибе и прилегающей части северо-западного склона Алданской антеклизы в последние годы открыты Кэдэргинское и Мухтинское крупные по запасам газоконденсатные месторождения (ГКМ), на которых залежи установлены в верхней части разреза. По сути, ознаменован новый верхний этаж газоносности на Предпатомском региональном прогибе.

Поскольку этот прогиб расположен в зоне сплошного и островного развития многолетнемерзлых пород, верхняя часть разреза имеет пониженные значения пластовых температур. В этой связи, в данной работе предпринята попытка рассмотрения возможностей образования газовых гидратов в пластовых условиях верхней части разреза Предпатомского прогиба на примере пластовых условий Кэдэргинского месторождения, которое открыто в 2021 году в пределах Среднебирюкского лицензионного участка (ЛУ) в 45 км северо-западнее г. Олекминска.

С 1982 по 1984 гг. Сангарской нефтегазоразведочной экспедицией ПГО «Ленанефтегазгеология» в пределах Кэдэргинской структуры пробурено 6 поисковых скважин (Кэдэргинские №№ 431, 432, 434, 435, 436, 438). Испытаниями в открытом стволе и эксплуатационной колонне скважин была подтверждена газоносность отложений билирской (осинский горизонт, пласт О-I) и ичерской (келорский горизонт, пласт А-I) свит нижнего кембрия.

Поисково-оценочная скважина Среднебирюкская-1П пробурена в 2020 г. на юге Среднебирюкского ЛУ, в северной части Кэдэргинской структуры. В результате испытаний установлено газоконденсатное насыщение юряхского и биркинского горизонтов и подтверждено газовое насыщение келорского горизонта. Самый верхний установленный уровень газоносности (келорский продуктивный горизонт) Кэдэргинского месторождения приурочен к метегеро-ичерским отложениям, представленным известняками и доломитами с прослоями аргиллитов и ангидритов.

Для расчетов равновесных условий гидратообразования по методике Слоана [1] взяты составы пластового газа и воды келорского продуктивного горизонта Кэдэргинского месторождения и состав воды метегеро-ичерского комплекса Бысахтахского месторождения. Компонентный состав пластового

газа в среднем (об., %): $\text{CH}_4 - 63,77$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 2,31$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,61$, $i\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,13$, $n\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,19$, $\text{C}_5\text{H}_{12+} - 0,26$, $\text{N}_2 - 2,22$, $\text{CO}_2 - 30,39$, $\text{He} - 0,03$, $\text{H}_2 - 0,089$.

На рис. 1 приведены кривые равновесных условий, выше которых находятся области гидратообразования для различных составов и степеней минерализации пластовых вод. Видно, что, если не учитывать минерализацию пластовой воды, возможно образование газовых гидратов, т. к. точки 5 и 6 лежат выше кривой 1. В условиях пластовых вод метегеро-ичерского комплекса Бысахтахского месторождения – хлоридно-натриевого и сульфатно-натриевого типов вод с минерализацией 16 г/л – газовые гидраты могут образовываться. Для них равновесные условия (кривые 2 и 3) немного смещены относительно условий для пресной воды (кривая 1) в область более высоких давлений и низких температур из-за антигидратной активности воды. Активность воды является единственным параметром, влияющим на состояние равновесия гидратов. При снижении активности воды температура равновесия гидратов также уменьшается.

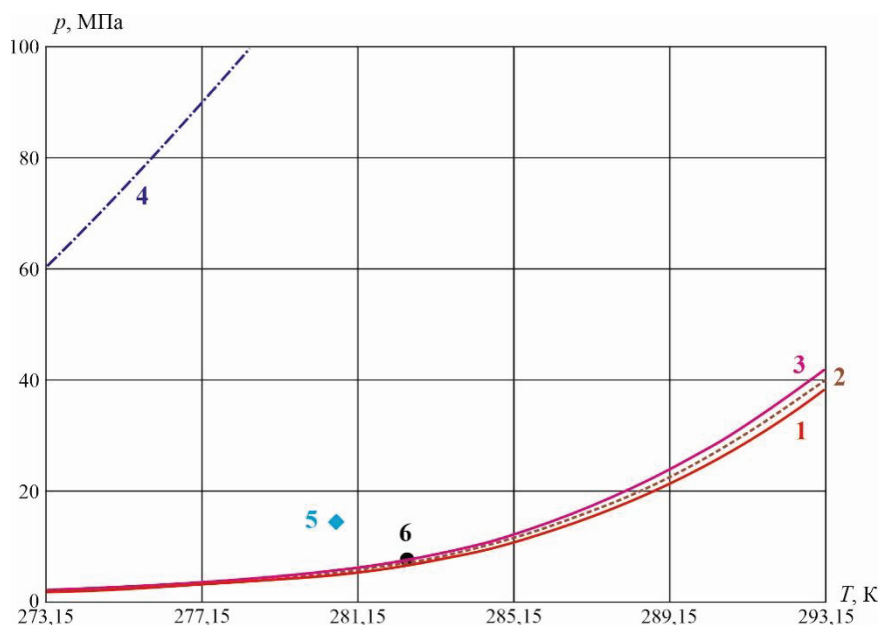


Рис. 1. Равновесные условия гидратообразования для пластового газа Кэдэргинского ГКМ: сплошная кривая 1 – для пресной воды; пунктирная кривая 2 – для воды сульфатно-натриевого типа с минерализацией 16 г/л; сплошная кривая 3 – для воды хлоридно-натриевого типа с минерализацией 16 г/л; штрих-пунктирная кривая 4 – для воды хлоркальциевого типа с минерализацией 323,95 г/л; точка 5 соответствует пластовому условию залежи чарской свиты Мухтинского ГКМ ($p_{\text{пл}} = 14,6$ МПа, $T_{\text{пл}} = 280,6$ К, интервал 1092–1122 м, минерализация воды 16 г/л); точка 6 – пластовому условию келорского горизонта Кэдэргинского ГКМ ($p_{\text{пл}} = 7,85$ МПа, $T_{\text{пл}} = 282,4$ К, интервал 821,1–858 м, минерализация воды 16 г/л)

При минерализации пластовых вод хлоркальциевого типа с концентрацией 311 г/л, гидраты не образуются, т. к. точки 5 и 6 лежат ниже кривой 4 на рис. 1. Высокая минерализация пластовых вод, обусловленная наличием соленосных отложений в верхней части разреза Кэдэргинского месторождения, препятствует образованию газовых гидратов.

Вместе с тем, химический состав пластовых вод верхней части разреза в регионе практически не изучен. На сопредельных площадях воды метегероичерского комплекса опробованы на Бысахтахской площади. При бурении скважин №№ 1871, 1874, 1875 с глубин 366, 31, 504 м в отложениях метегерской свиты вскрыты напорные самоизливающиеся воды с запахом сероводорода. Состав воды сульфатно-натриевого типа изменяется от хлоридно-сульфатного кальциево-натриевого с минерализацией 5,5 г/л (скв. № 1871) до сульфатно-хлоридного натриевого с минерализацией 16,0 г/л (скв. № 1875). Содержание в водах брома составляет 2,40–13,58 мг/л. Таким образом, в условиях Бысахтахского ГКМ – при небольших величинах минерализации пластовых вод гидратообразование возможно (рис. 1, точки 5 и 6).

Обращает на себя внимание повышенное содержание CO_2 (до 31 об.%) в составе газа келорского горизонта, которое традиционно связывают с процессами окисления жидких и газообразных углеводородов, катагенеза рассеянного органического вещества и гидролиза карбонатов. Залежи в верхней межсолевой части разреза Кэдэргинского месторождения могли образоваться при переформировании залежей из нижних этажей в ходе новейших тектонических процессов, происходивших в палеогеновое, неогеновое и неоплейстоценовое время. По всей видимости, высокое содержание CO_2 в келорском горизонте может быть связано с процессами окисления углеводородов в верхней части разреза, т. к. в нижних залежах повышенное содержание CO_2 не устанавливается.

Наличие повышенного содержания CO_2 в компонентном составе газа значительно уменьшает область гидратообразования. Если сравнить полученные равновесные условия образования гидратов природного газа с равновесными условиями гидратообразования газа, в котором принимаем отсутствие в его компонентном составе диоксида углерода, то кривые гидратообразования смещаются в сторону низких давлений и высоких температур, т. е. при отсутствии диоксида углерода в природном газе возможность образования смешанных газогидратов возрастает. При фиксированной температуре гидрат метана образуется при более высоком давлении, нежели гидрат диоксида углерода. Это объясняется тем, что энергия единицы объема, требуемая для образования гидрата метана, меньше, чем энергия, которая выделяется при образовании гидрата диоксида углерода.

Проведенные исследования показывают, что в верхней части разреза Кэдэргинского газоконденсатного месторождения газовые гидраты не образуются. Высокая минерализация пластовых вод и повышенное

содержание диоксида углерода исключают возможности образования газовых гидратов. Вместе с тем на территориях с небольшими величинами минерализации пластовых вод в верхней части разреза потенциальная возможность гидратообразования имеется. К таковым зонам можно отнести прискладчатое крыло Предпатомского прогиба, где отсутствуют соляные пласты в верхней части разреза. Возможно, данное явление связано с достаточно активными процессами водообмена, обусловившими размытие соляных пластов и ингибирование газогидратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sloan, E. D., Koh, C. A. Clathrate hydrates of natural gases. – Boca Raton : Taylor&Francis Group / CRC Press, 2008. – 720 p.

БЫСТРОВОЗВОДИМЫЕ ЗДАНИЯ ИЗ ЛСТК ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ: РАЗРАБОТКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Корнилов А. Т., Корнилов Т. А.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Поселения арктических районов Республики Саха (Якутия) имеют большую долю аварийного жилья и низкий уровень благоустройства населенных пунктов [1]. Для эффективного освоения Арктики и привлечения специалистов требуется повышение качества жизни в поселениях и создание комфортной среды путем внедрения современных инновационных технологий домостроения. Арктические районы с экстремальными природно-климатическими условиями характеризуются разбросанностью поселений на обширных территориях при малой плотности населения. Кроме того, основной сложностью ведения строительства зданий и сооружений в этих районах являются сложная логистика и слаборазвитая транспортная инфраструктура, ограниченный строительный сезон и отсутствие баз стройиндустрии. В этой ситуации одним из наиболее приемлемых конструктивно-технологических решений быстровозводимых зданий для арктических районов является технология строительства из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) или *lightweight steel-framed (LSF) construction* (англ.), широко применяемая в развитых странах [2]. Начиная с 2011 года, на территории Республики Саха (Якутия) внедрением технологии проектирования, производства и строительства малоэтажных зданий из ЛСТК активно занимается ООО «Адгезия-МК» при СВФУ. При непосредственном участии ООО «АМК» спроектированы и построены более 20 объектов различного назначения в арктических районах. Сегодня накопился определенный опыт строительства и эксплуатации малоэтажных зданий из ЛСТК в районах Якутии и разработаны конструктивные решения, отвечающие требованиям по тепловой защите зданий.

Основу каркасных зданий из ЛСТК представляют холодногнутые стальные профили, которые одновременно являются несущими и ограждающими конструкциями. Наличие многочисленных мостиков холода – стальных профилей усложняет обеспечение тепловой защиты зданий. Для холодных районов с целью улучшения теплотехнических свойств и снижения влияния термических мостов должны применяться многослойные ограждающие конструкции [2, 3]. При одинаковой общей толщине стены,

отличающейся исключительно расположением теплоизоляции и стального каркаса в стене, теплотехнические свойства могут отличаться значительно [2]. Наиболее эффективным является двухслойная стена с наружной теплоизоляцией стены из ЛСТК, при котором снижается влияние термических мостов в виде стоечных стальных профилей. При проектировании необходимо принимать толщину несущей каркасной стены минимальной, исходя из несущей способности стальных стоечных профилей, а толщину наружной теплоизоляции из расчета требуемого термического сопротивления согласно СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [3].

В представленных результатах численных исследований теплозащитных свойств зданий из ЛСТК моделирование теплопередачи фрагментов конструкций выполнено с использованием сертифицированной ПК HEAT 3, соответствующей стандарту EN ISO 10211 – 2022. Теплотехнические расчеты выполнены при температуре наружного воздуха $t_{\text{ext}} = -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре внутреннего воздуха $t_{\text{int}} = +21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для рассматриваемого арктического района с ГСОП = 11503 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$)/год требуемые сопротивления теплопередаче стен составляют для стен 5,43 ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)/Вт и цокольного перекрытия 7,95 ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)/Вт.

В рассматриваемом примере двухслойное стеновое ограждение состоит (от внутреннего к наружному): 2 слоя гипсокартонной плиты толщиной $\delta = 25\text{ мм}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,25\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$; пароизоляция; теплоизоляционные плиты $\delta = 150\text{ мм}$ и $\lambda = 0,04\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$; ориентированно стружечные плиты OSB-3 с $\delta = 12\text{ мм}$ и $\lambda = 0,13\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$; теплоизоляционные плиты $\delta = 100\text{ мм}$ и $\lambda = 0,04\text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$; ветро-гидрозащитная мембрана; воздушный зазор; профлист. Для каркасной стены применяются стальные тонкостенные профили S152×51×1,8 и T152×51×1,8. Стоечные профили устанавливаются с шагом 600 мм на направляющие профили. Из распределения температуры (рис. 1а) внутри двухслойной стены хорошо видно влияние стальных стоек. Тепловой поток интенсивнее направляется через стальные стойки, вследствие чего изотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ смещается в наружную сторону на участках расположения профилей.

С целью обеспечения огнестойкости стен из ЛСТК требуется создание защиты в виде внутреннего слоя из негорючих минераловатных плит толщиной 50 мм и двух слоев гипсокартонных плит. Для корректного сравнения данной стены с двухслойной толщина наружного теплоизоляционного слоя принята равной 50 мм (общая толщина теплоизоляции 250 мм). В трехслойной стене изотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ проходит с внутренней стороны стальных стоек, так как дополнительный теплоизоляционный слой препятствует прохождению теплового потока (рис. 1б). Теплотехнические свойства трехслойной стены по сравнению с двухслойной при одинаковой толщине теплоизоляционных материалов лучше по показателям минимальной температуры на внутренней поверхности и

тепловым потерям. Приведенное сопротивление теплопередаче трехслойной стены выше требуемого нормативного значения.

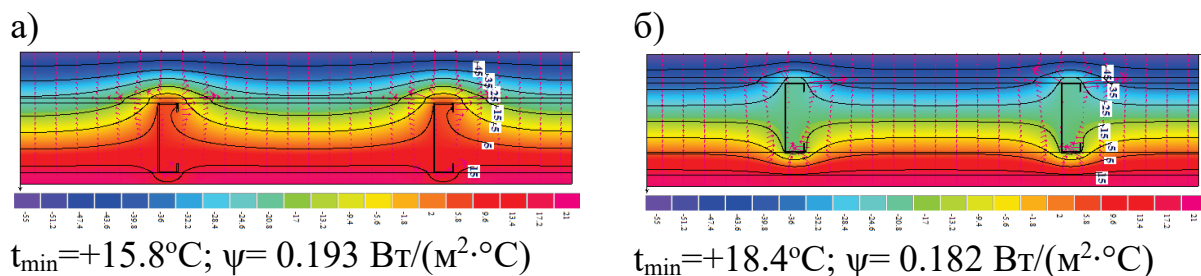


Рис. 1. Распределение температуры в двухслойной (а) и трехслойной (б) стенах

На первых построенных объектах основные проблемы по тепловой защите были установлены на первых этажах домов на винтовых сваях. На данных домах цокольные перекрытия выполнены с применением стальных профилей. В соединениях стен с цокольным перекрытием имелись прямые термические мосты, по причине которых и высокой инфильтрации воздуха в зимний период наблюдалась низкая температура в угловых участках пола (рис. 2). С учетом этого недостатка на последующих объектах для увеличения воздухонепроницаемости цокольное каркасное перекрытие было заменено на монолитную железобетонную плиту по профилированному настилу ($\delta = 90$ мм, $\lambda = 1,92$ Вт/м·°C) с теплоизоляцией из пенополистирольных плит ($\delta = 350$ мм, $\lambda = 0,04$ Вт/м·°C) и цементно-песчаной стяжкой ($\delta = 50$ мм, $\lambda = 0,76$ Вт/м·°C). В этом решении направляющие стальные профили стен крепятся к плите через полиэтиленовую ленту ($\delta = 10$ мм, $\lambda = 0,039$ Вт/м·°C).

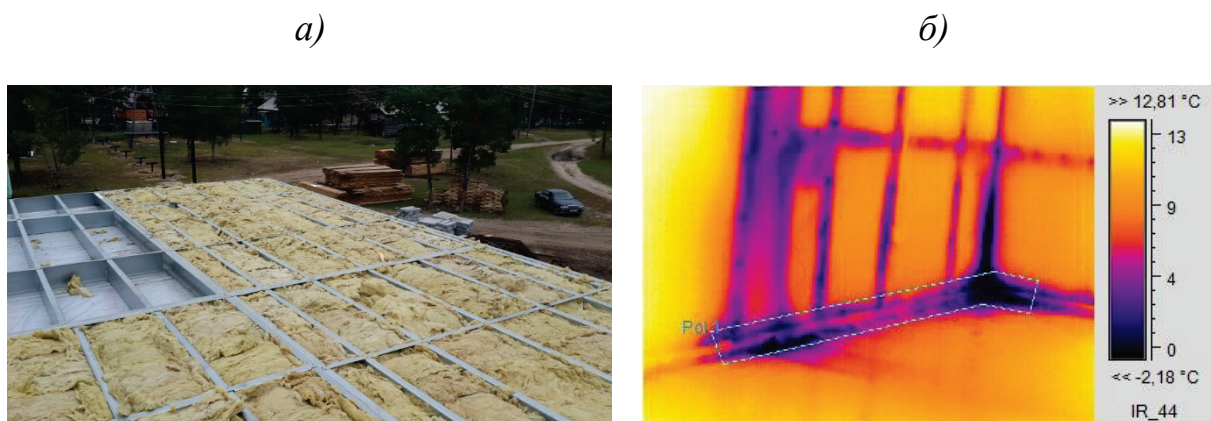


Рис. 2. Теплоизоляция плиты цокольного перекрытия (а) и термограмма при $t_{ext} = -42$ °C и $t_{int} = +21$ °C

Результаты моделирования теплопередачи применяемых типовых решений сопряжений наружных стен с цокольным перекрытием из

железобетонной плиты на рядовых и угловых участках приведены на рис. 3. Изотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в соединениях наружной стены с цокольным перекрытием проходит близко к внутреннему углу. Красные стрелки на рис. 3а отображают направления теплового потока, в основном, через теплопроводные элементы: стальной профиль и железобетонную плиту. Все это в целом указывает на неэффективность применения термического разрыва из полиэтиленовой ленты небольшой толщины. Удельные потери теплоты ψ рядового и углового фрагментов соединений наружных стен составляют соответственно 0,178 и 0,218 Вт/(м²·°C). Самое главное здесь – минимальная температура на внутренней поверхности сопряжения стены с цокольным перекрытием ниже температуры точки росы $t_{\min} = +10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это может привести к поверхностной конденсации на гипсокартонных плитах (рис. 3б). Особенно низкая температура наблюдается на угловом участке.

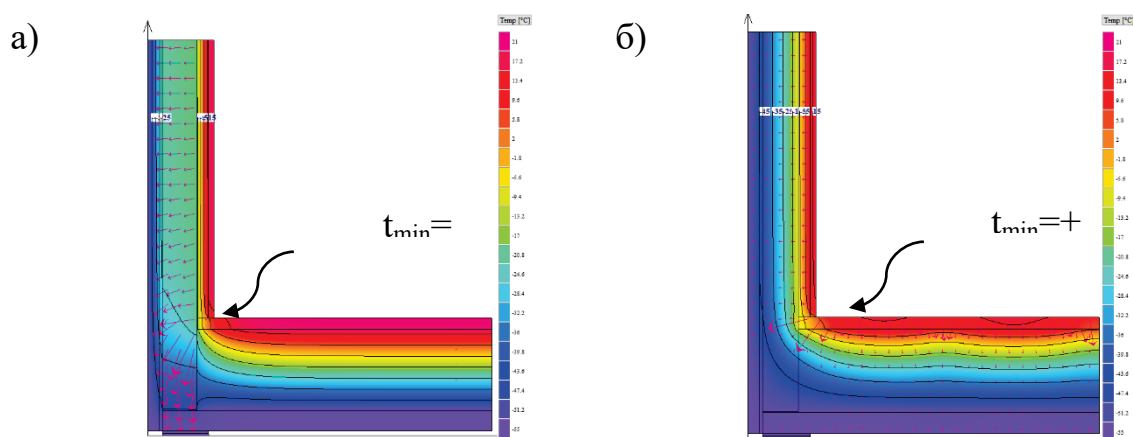


Рис. 3. Распределения температуры в вертикальных разрезах по стенке стальной стойки на рядовом участке (а) и по внутренней поверхности стены на угловом участке (б)

Сотрудниками СВФУ разработано новое решение соединений стен из ЛСТК с цокольным железобетонным перекрытием и получен патент RU2799676С. В данном конструктивном решении с помощью балки создается термический разрыв между каркасом стены и цокольной плитой. При таком конструктивном решении стальные профили смещаются в зону с более высокой температурой и теплоизоляционные плиты цокольного перекрытия соединяются с наружной теплоизоляцией наружной стены. Результаты моделирования теплопередачи фрагментов разработанных решений конструкций подтвердили их высокие теплозащитные свойства. Минимальная температура на внутренней поверхности соединения наружной стены с цокольным перекрытием при наличии терморазрывной балки составляет $15,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ на рядовом участке и $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на угловом участке. Удельные потери теплоты предлагаемых решений по сравнению с типовыми решениями

снижаются на 2,6 % на рядовом и на 7,3 % на угловом участках. Смещение опор терморазрывных балок от углов цокольного перекрытия и расположение их с шагом 1200 мм в зонах между стоечными профилями снижает влияние термических мостов стен из ЛСТК. Обеспечение неразрывности теплозащитной оболочки за счет надежного соединения теплоизоляционных слоев наружных стен и цокольного перекрытия также снижает общие потери теплоты здания из ЛСТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы обеспечения населения Российской Арктики комфортным жильем на примере Республики Саха (Якутия) / Т. А. Корнилов, Ф. Ф. Посельский, И. М. Потравный [и др.] // ЭКО. – 2023. – № 12. – С. 130–149.
2. Liang, H., Roy, K., Fang, Z., Lim, J.B.P. A Critical review on optimization of cold-formed steel members for better structural and thermal performances // Buildings. – 2022. – Vol. 34 (12). – DOI 10.3390/buildings12010034.
3. Kornilov, T., Nikiforov, A. Thermal protection of low-rise buildings from light steel thin-walled structures // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 84 (8). – P. 140–149.
4. Roque, E., Santos, P. (2017) The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to Its position // Buildings. – 2017. – Vol. 7 – Issue 1, 13. – DOI10.3390/buildings7010013.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Никифоров А. С., Матвеев А. Д., Егорова Г. Н.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Якутия является регионом с суровым климатом, где традиционное сельское хозяйство и энергоснабжение сталкиваются с серьезными трудностями. Большинство удалённых посёлков и фермерских хозяйств зависят от дизельных генераторов, что приводит к следующим проблемам:

1. Экологический вред – сжигание дизельного топлива сопровождается выбросами CO₂, сажи и токсичных веществ, что ускоряет таяние вечной мерзлоты и загрязняет хрупкую экосистему Арктики.

2. Высокая стоимость энергии – из-за логистических трудностей цена на топливо в отдалённых районах крайне высока, что тормозит развитие местного агропромышленного комплекса.

3. Экономическая зависимость – зависимость от поставок ГСМ делает энергоснабжение уязвимым и увеличивает себестоимость сельхозпродукции.

Эти проблемы требуют комплексного подхода к решению, включая развитие возобновляемых источников энергии, внедрение энергоэффективных технологий, локальное производство топлива,

инвестиции в инфраструктуру, государственную поддержку, образование и подготовку кадров, а также научные исследования и инновации. Все эти меры могут способствовать улучшению энергетической ситуации в регионе и устойчивому развитию сельского хозяйства, что, в свою очередь, повысит уровень жизни местного населения.

В данной работе был проведен расчет и сравнение использования дизельной электростанции и солнечной установки для обеспечения электрической энергией удаленной конебазы в Хангалассом районе. В табл. 1 представлены исходные данные для расчета выработки электрической энергии для солнечных панелей в количестве 26 штук в данной местности. Данные по значениям солнечной инсоляции были взяты с сайта [1].

Таблица 1. Данные для расчета выработки электрической энергии солнечными панелями

КПД	Солнечная инсоляция, кВт*ч/м ²	Кол-во солнечных дней	Кол-во пасмурных дней	Коэффициент полезности в пасмурный день	Номинальная мощность, Вт	Электро-энергии в год, Вт
0,203	3,38	102	263	0,5	300	1 263 600 (461214кВт*ч)
Кол-во панелей	26	Суммарная выработка в год, Вт	1 263 600	Стоимость электроэнергии, руб/кВт*ч (тарифный план ПАО «Якутскэнерго»)	6,01	Выработка в рублях
		Номинальная суммарная выработка в год, Вт	2 847 000			76 741
						172 904

Помимо расчета вырабатываемой электрической энергии, в таблице 2 представлен сравнительный экономический расчет для дизельной установки и солнечной установки. По результатам расчета окупаемость использования солнечных панелей составила 8 лет. Расчет был проведен с учетом нынешней стоимости оборудования и тарифа на дизельное топливо.

Таблица 2. Данные экономического расчета

Стоимость дизельного топлива, руб.	Генерирование ДЭ, час	Расход дизельного топлива, литр/час	Дней в году	Расходы, рублей в год	Стоимость дизельного топлива, руб.
ДЭГ	93,40 руб	17	0,4	365	327 273
СЭС + ДЭГ		0,8 (среднее значение 48 минут)			76 741
Экономия	76 741 руб	Срок окупаемости СЭС	8 лет	2920 дней	лет/дней
Стоимость СЭС	616 600 руб				

Внедрение солнечной энергетики в Якутии способно трансформировать энергетический и аграрный сектор региона. Переход от дизельной генерации к возобновляемым источникам энергии позволит снизить экологическую нагрузку, минимизировав выбросы вредных веществ и замедлив деградацию вечной мерзлоты. Также уменьшить затраты на энергоснабжение, что особенно важно для удалённых поселений и фермерских хозяйств. Повысить энергонезависимость региона, снизив риски, связанные с логистикой и ценами на топливо.

Реализация данного проекта не только улучшит качество жизни местного населения, но и создаст прецедент для развития зелёной энергетики в условиях Крайнего Севера. Дальнейшие исследования должны включать пилотные установки солнечных электростанций, анализ их эффективности в условиях полярного дня и ночи, а также разработку государственных программ поддержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Значение солнечной инсоляции в г. Якутске (Республика Саха). – Текст : электронный // betaenergy.ru : сайт. – URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/yakutsk/> (дата обращения: 20.03.2025).
2. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко – М. : Энергоатомиздат, 1991. — 208 с.
3. e-solarpower.ru : интернет-магазин : сайт. — URL: <https://e-solarpower.ru> (дата обращения: 20.03.2025). – Текст : электронный.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА НА УГЛЕ И ДРЕВЕСИНЕ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Ноев С. А., Троев Е. Я., Боякинов Е. Ф.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

В данной работе проведен анализ существующих методов газификации угля, которая включает преобразование угля в синтетический газ (смешанный газ) с использованием кислорода или пара. Выполнен расчет параметров газификации древесного угля, включая коэффициент полезного действия и выход газа.

Газификация угля представляет собой один из эффективных способов преобразования угля в синтетический газ, который может использоваться для производства электроэнергии, тепла и в качестве сырья для химической промышленности. Это позволяет снизить зависимость от ископаемого топлива и способствует переходу к более устойчивым энергетическим системам. Согласно данным [1], угольные запасы Республики Саха (Якутия) составляют

примерно 2,5 трлн тонн геологических запасов, что делает регион одним из крупнейших угольных бассейнов России и мира. Кроме того, площадь, покрытая лесной растительностью, в Якутии превышает 51 % территории, а запас древесины оценивается в 39,8 млрд м³. Это свидетельствует о высокой доступности древесного сырья, включая отдаленные районы. В 2013 году расчетная лесосека составила 39,8 млн м³, из которых было освоено лишь 5 %. [2].

Принцип работы газогенератора: Газогенератор, работающий на угле и древесине, функционирует по принципу газификации. В реакционной камере при высокой температуре и ограниченном доступе кислорода органическое сырье (уголь или древесина) разлагается, образуя газ, содержащий угарный газ, водород и метан. Этот газ может использоваться в качестве топлива для различных энергетических нужд. Газогенератор включает реакционную камеру для газификации, системы подачи сырья для угля и реагентов, а также системы теплообмена для поддержания нужных температур (см. рис.1).

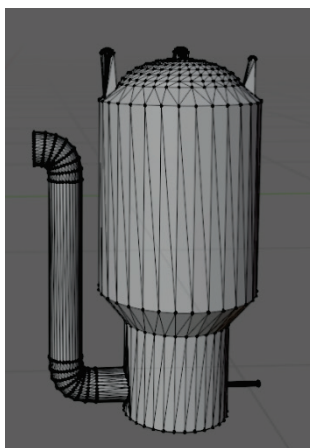


Рис. 1. Модель газогенератора

Коэффициент полезного действия газогенератора n_{Γ} определяется по следующей формуле (1):

$$n_{\Gamma} = \frac{V_g H_u}{H_H^p}, \quad (1)$$

где V_g – выход газа из 1 кг топлива (м³/кг), H_u – низшая теплота сгорания (теплотворная способность) газа при 0 °С и атмосферном давлении, H_H^p – теплотворность рабочего топлива (ккал/кг).

Расчет газификации древесного угля [3]. Состав древесного угля по массе включает в себя 83,5 % углерода (С), 5,0 % водорода (Н), 7,8 % кислорода (О), 2,6 % азота (N) и 1,0 % серы (S). Состав генераторного газа по

объему включает 2,1 % углекислого газа (CO_2), 0,15 % кислорода (O_2), 31,55 % угарного газа (CO), 4,9 % водорода (H_2), 2,1 % метана (CH_4) и 61,9 % азота (N_2).

Выход газа (м^3 на 1 кг топлива) определяется по формуле (2):

$$V_g = \frac{(0.867 \cdot C + 1.5 \cdot H)}{(CO^2 + CO + CH^4 + 9.2 + 20.9 + 21)} \cdot \quad (2)$$

Подставляя значения, получаем: $V_g \approx 2.5 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Низшая теплотворность газа рассчитывается по формуле:

$$H_u = 30.35 \cdot CO + 25.7 \cdot H_2 + 85.7 \cdot CH_4. \quad (3)$$

Подставляя значения: $H_u \approx 1100 - 1315 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$.

В дальнейшем планируется разработка конструкции газогенератора, моделирование процессов теплопередачи в газогенераторе и проведение тестовых испытаний получения синтетического газа для хозяйственных нужд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов, Э. И. Топливо-энергетическая база формирования регионального энергетического кластера в Республике Саха (Якутия) / Э. И. Ефремов // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – № 39 (391). – С. 33–40. – EDN SVROAJ.
2. Черноградская, И. А. Анализ лесосырьевого потенциала в республике Саха (Якутия) / И. А. Черноградская, Л. М. Михайлова // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства, Якутск, Россия, 20 марта 2019 года. – Якутск, Россия : Издательский дом СВФУ, 2019. – С. 32–36. – EDN ODBUVB.
3. Токарев, Г. Г. Газогенераторные автомобили / Г. Г. Токарев. – Рипол Классик, 2014.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Охлопков А. Ф., Боякинов Е. Ф.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

В работе представлена портативная солнечная электростанция с номинальной мощностью солнечной панели 100 Вт, оснащенная системой сбора климатических данных на базе программных модулей Arduino. Изучено и проанализировано влияние резко-континентального климата Якутии на электрофизические параметры монокристаллической солнечной панели. Проанализированы вольтамперные характеристики в зависимости от внешних

параметров в летний период, включая время суток, световой поток, температуру, погодные условия и концентрацию микрочастиц Р.М2.5. На основе эмпирических данных оценен срок окупаемости портативной солнечной электростанции. Электроэнергетические системы на основе солнечных панелей активно внедряются в инфраструктуру объектов, удаленных от традиционных источников электроэнергии. Такой подход при корректной эксплуатации позволяет значительно сократить капитальные затраты на энергоснабжение. В условиях Якутии, где снижение потребления ископаемого топлива является приоритетной задачей, использование возобновляемых источников энергии приобретает особую актуальность. Уникальность данного исследования заключается в анализе влияния резко-континентального климата Якутии на эффективность работы солнечных панелей.

Эксперименты проводились с 19.07.23 г. по 23.07.23 г. на базе полигона Малой академии наук РС(Я) в с. Чапаево (координаты: 61°39'40"N 129°23'33"E). В работе использовались: переносная монокристаллическая солнечная панель до 100 Вт, контроллер заряда, литово-железофосфатная (LiFePO_4) батарея на 12В и 48 А · ч, реостат, система сбора данных на базе Arduino (датчики освещенности PYZ20, микрочастиц РМ2.5, тока, напряжения, температуры), ноутбук, смартфон, мультиметр, инфракрасный термометр.

К прямым измеряемым параметрам относятся: освещенность (Вт/м^2), датчик микрочастиц РМ2.5, напряжение и ток, снятые с солнечной панели с использованием реостата. Разработаны автономные солнечные электростанции с возможностью сбора информации со спутников и датчиков посредством использования платформы Arduino.

Проведен сбор и анализ результатов работы солнечных панелей в климатических условиях г. Якутска (с. Чапаево), включая вольтамперные характеристики. Максимальная эффективность (10,5 %) зафиксирована в полуденные часы (12.00–13.00) при минимальном сроке окупаемости системы в 2,5 года.

Исследование подтвердило возможность эффективного использования солнечных панелей в условиях сурового климата Якутии. Полученные результаты могут быть применены при проектировании автономных энергосистем для удаленных районов.

В перспективе планируется использование солнечной энергии для электролитического получения газа Брауна.

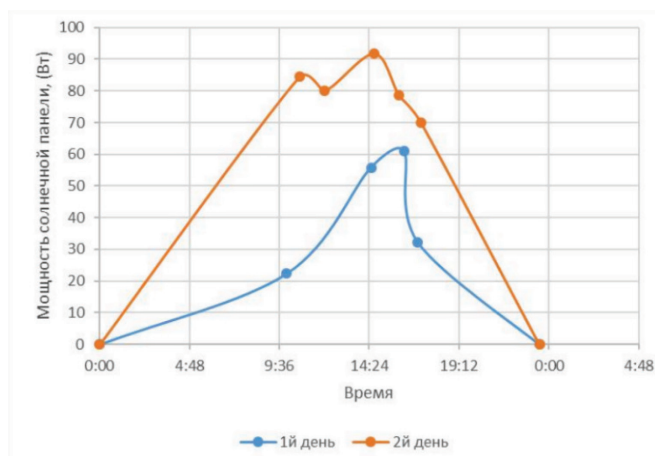


Рис. 1. Зависимость мощности солнечной панели на 100 Вт от времени суток

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, П. Ф. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей / П. Ф. Васильев, Н. П. Местников // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 1. – С. 57–64.
2. Анализ функционирования солнечных электростанций в децентрализованной зоне Республики Саха (Якутия) / И. Ю. Иванова, Д. Д. Ноговицын, Т. Ф. Тугузова [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 10–12. – С. 12–22.
3. Карасевич, В. А. Перспективы применения автономных источников энергии при транспортировке и распределении газа. – Текст : электронный / В. А. Карасевич, А. С. Черных, А. А. Яковлев // Научный журнал российского газового общества. – 2016. – №. 1. – С. 59–61. – URL: <https://gazo.ru/ru/media/publications/nauchnyy-zhurnal-rgo-1-2016/> (дата обращения 20.11.2025).
4. Местников, Н. П. Применение солнечной электростанции в условиях сельской местности Якутии / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар // Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12–14 апреля 2023 г. / Под ред. А. Н. Паршина. – Рязань : Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2023. – С. 216–217. – EDN CWBRME.
5. Об установлении тарифов на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Республике Саха (Якутия) на 2023 год : постановление Государственного комитета по ценовой политике Республики Саха (Якутия) от 17 ноября 2022 г. № 218 г. Якутск. – Текст : электронный // ПАО «ДЭК» : сайт. – URL : https://www.dvec.ru/private_clients/tariffs/2022/ykt_electro_20221117_218.pdf/ (дата обращения: 13.11.2025).
6. Об установлении тарифов на электрическую энергию, поставляемую населению и приравненным к нему категориям потребителей Чукотского автономного округа на 2023 год : постановление Комитета государственного регулирования цен и тарифов Чукотского АО от 17 февраля 2023 года № 3-э/1 г. Анадырь. – Текст : электронный // АО «Чукотэнерго» : официальный сайт. – URL: https://www.chukotenergo.ru/upload/sbit_tarif/Post_KGRCiT_17-02-2023_3-e1.PDF (дата обращения 20.11.2025).

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Петров А. В., Егорова Г. Н.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Тепловой насос – это устройство, переносящее тепловую энергию из окружающей среды в систему отопления и горячего водоснабжения. В отличие от традиционных нагревательных приборов, он не производит тепло напрямую, а преобразует низкопотенциальную энергию, что обеспечивает высокую энергоэффективность: при затрате 1 кВт электроэнергии на работу компрессора вырабатывается 3–5 кВт тепловой энергии.

Эффективность теплового насоса зависит от правильного выбора эксплуатационных параметров и хладагента – вещества, используемого в качестве рабочего тела для переноса тепла.

В данной работе рассматривается возможность использования теплового насоса типа «воздух – вода» в качестве дополнительного источника энергии для обеспечения горячего водоснабжения частного дома. Проведена оценка использования теплового насоса в сочетании с традиционным котлом или электрическим водонагревателем. Показано, что его применение позволяет снизить затраты на электроэнергию в межсезонье (см. рис. 1), поскольку рабочий диапазон теплового насоса «воздух – вода» составляет от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

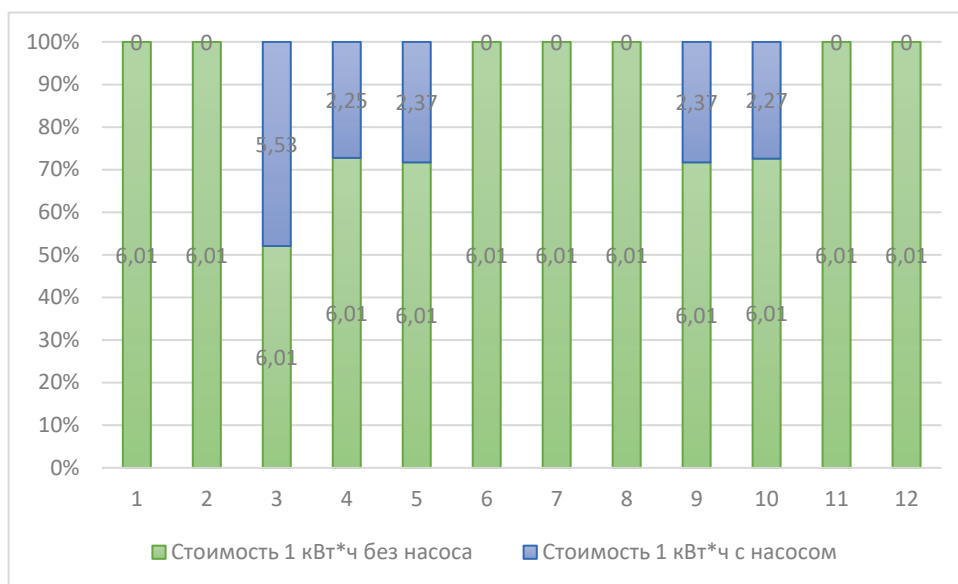


Рис. 1. Сравнение стоимости 1кВт*ч тепловой энергии с насосом и без при тарифе на э/энергию 6,01 руб/кВт*ч по месяцам

В условиях Якутии тепловой насос «воздух – вода» целесообразно использовать только в межсезонье (сентябрь–октябрь, март–май), когда

температура наружного воздуха не опускается ниже -25°C , что обеспечивает его эффективную работу.

При стоимости теплового насоса 408 000 рублей, срок его окупаемости составляет 14 лет.

Исходя из полученных результатов, использование теплового насоса типа «воздух – вода» имеет достаточно большой срок окупаемости в климатических условиях Якутии. Но, тем не менее, его использование способствует снижению вредных выбросов в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков, В. Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор / В. Г. Горшков // Справочник промышленного буроводования. – 2005. – № 4 (7).
2. Жидович, И. С. Системный подход к оценке эффективности тепловых насосов / И. С. Жидович, В. И. Трутаев // Новости теплоснабжения. – 2001. – № 11.
3. Васильев, Г. П. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии : методическое пособие / Г. П. Васильев. – Москомархитектура, 2001. – С. 57.

РАЗРАБОТКА ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧЕЙ NaOH И KOH

Петров М. Д., Боякинов Е. Ф.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Представлена разработка щелочного электролизера рабочей мощностью 300 Вт с возможностью регистрации электрофизических и термодинамических параметров. В качестве электролита использованы растворы гидроксидов натрия (NaOH) и калия (KOH). Приведены результаты измерений термодинамических параметров в зависимости от силы тока, напряжения, температуры и концентрации щелочного раствора. Оценены и оптимизированы формулы для расчета коэффициента полезного действия (КПД) электролизера при различных концентрациях электролита.

Актуальность исследования обусловлена перспективностью получения кислорода и водорода путем генерации газа Брауна в щелочном электролизере с использованием солнечной энергии.

Целью проекта является оптимизация и исследование процесса генерации газа Брауна в щелочном электролизере, работающем на солнечной энергии.

Задачи исследования:

- 1) анализ теоретических основ процесса щелочного электролиза;
- 2) разработка и оптимизация технологии получения газа Брауна методом щелочного электролиза;

- 3) интеграция портативной солнечной электростанции в систему электролизера;
- 4) оценка потенциала использования солнечной энергии для электролиза;
- 5) проведение электрофизических измерений и расчет КПД установки;
- 6) обработка и анализ экспериментальных данных.

Подготовка раствора и прототип щелочного электролизера.

Электролизер собран из 13 стальных пластин марки AISI304 (площадь одного $S = 0,2 \text{ м}^2$). Пластины изолированы термостойкой кислотощелочестойкой резиной и погружены в электролит. В качестве электролита использованы растворы NaOH и KOH квалификации «ХЧ» («химически чистый») производства АО «Экос-1».

Концентрация щелочи в растворе регулировалось в соответствии с формулой:

$$n = \frac{m_{\text{KOH}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + M m_{\text{KOH}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

При изменении концентрации масса дистиллированной воды оставалась постоянной, а добавление щелочи сопровождалось экзотермической реакцией, приводящей к повышению температуры раствора. Поскольку сила тока и количество носителей заряда в электролите напрямую зависят от температуры, все измерения проводились при температуре 33–35 °С. Электролизер подключен к блоку питания с пиковыми параметрами 30 В / 10 А (300 Вт). Подача напряжения осуществлялась следующим образом: пластина № 1 – анод, пластина № 13 – катод. При подаче напряжения в щелочном растворе происходит диссоциация на ионы: 1) KOH на K^+ и OH^- , 2) NaOH на Na^+ и OH^- . Образовавшиеся ионы обеспечивали перенос заряда в электролит.

Реакции на электродах. Основные электрохимические процессы в щелочном электролизере представлены на рис. 1 (на примере раствора KOH). В результате реакций на электродах выделяются кислород (на аноде) и водород (на катоде) в количественном соотношении один к двум.

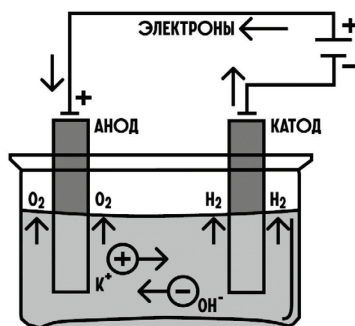


Рис. 1. Схема щелочного электролизера

Выделяющиеся ионы K^+ и Na^+ выступают в качестве переносчиков заряда. При длительной эксплуатации их производные накапливаются в виде осадка. Учитывая состав стали AISI304 (18 % хрома, 10 % никеля, основной компонент – железо, а также легирующие элементы – марганец и медь), напряжение подбиралось таким образом, чтобы минимизировать образование побочных ионов. Дополнительными источниками загрязнения электролита являются продукты коррозии конструкционных материалов, примеси из питающей воды и углекислый газ (CO_2), поглощаемый из воздуха.

На рис. 2 представлена зависимость КПД электролизера от мощности источника питания для растворов КОН с концентрациями 15 %, 20 % и 30 %.

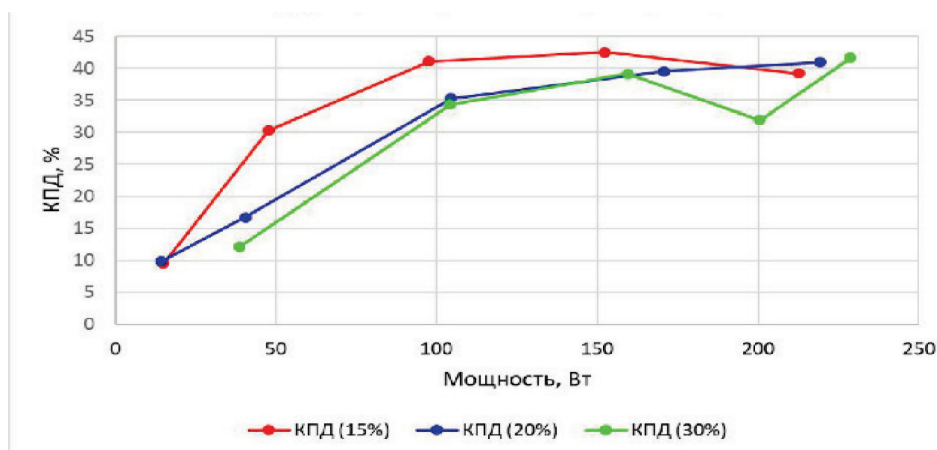


Рис. 2. Зависимость КПД электролизера от подаваемой мощности источника питания для раствора КОН с концентрациями 15 %, 20 % и 30 %

С увеличением мощности КПД возрастает до 30–40 %, однако дальнейший рост тока и напряжения приводит к вытеснению электролита выделяющимся газом, что снижает активную площадь электродов. При достижении определенных значений параметров КПД стабилизируется. Для всех исследованных концентраций КОН показатели КПД оказались сопоставимыми.

Выводы. Разработана и оптимизирована конструкция маломощного щелочного электролизера для генерации газа Брауна. Предложенная схема может быть использована для плавки и прогрева материалов (расчетная температура пламени 2235 °С). Установлено, что оптимальная концентрация щелочи составляет 15 %. Скорость генерации газа при мощности 300 Вт достигает 0,4 л/мин. Рекомендуемый температурный диапазон электролита: 60 ÷ 70 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Von Hofmann, A. W. Introduction to Modern Chemistry, Experimental and Theoretic: Embodying Twelve Lectures Delivered in the Royal College of Chemistry, London. – Walton and Maberley, 1865.
2. David, M., Ocampo-Martínez, C., Sánchez-Peña, R. Advances in alkaline water electrolyzers: A review // Journal of Energy Storage. – 2019. – Т. 23. – С. 392–403.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Прохоров С. А., Гермогенов А. Г., Боякинов Е. Ф., Троев Е. Я.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

Представлен проект экспериментальной установки, предназначенной для измерения теплопроводности твердых материалов (см. рис. 1а, б). В основе метода лежит принцип стационарного теплового потока, реализуемый с использованием калориметрической системы. Экспериментальная установка включает калориметр на основе модифицированного медицинского контейнера для минимизации тепловых потерь. Она состоит из двух тепловых блоков: горячего (точечный нагреватель) и холодного (система с хладагентом МХД-3). Для точного измерения температур используются платиновые термометры РТ100. Управление нагревателем и сбор данных осуществляются контроллером на базе Arduino с ПИД-регулированием, а обработка данных и расчет коэффициента теплопроводности выполняются с помощью Python.

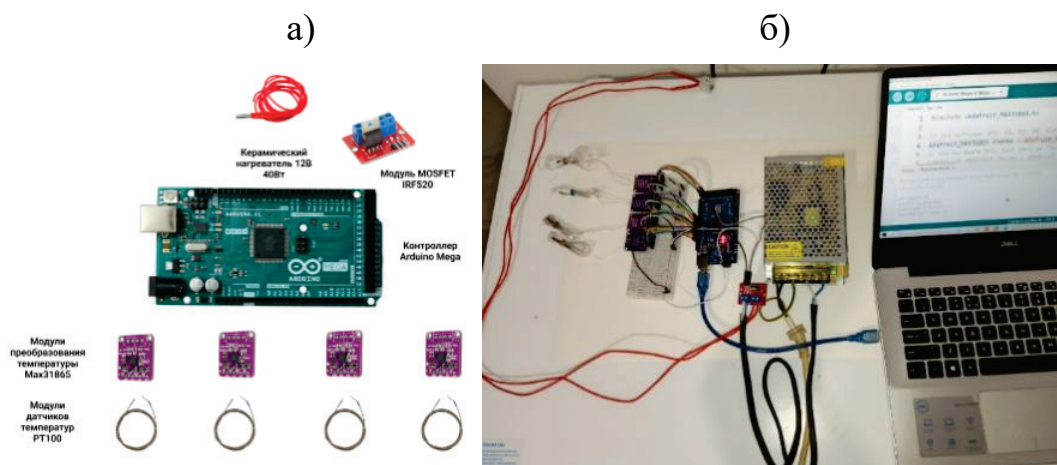


Рис. 1. а) схематическая диаграмма электронных компонентов устройства для измерения коэффициента теплопроводности; б) прибор для измерения коэффициента теплопроводности

Для измерений исследуемый образец нарезан в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие (лицевые) грани которого имеют форму квадрата с размерами 80×200 мм. Толщину образцов измеряли штангенциркулем в четырёх углах исследуемого образца. Среднеарифметическое значение результатов всех измерений составило около 35 мм. Грани образца, контактирующие с рабочими поверхностями измерительного прибора прижаты так, чтобы получились плоскими и параллельными. Отклонение лицевых граней жесткого образца от

параллельности составила не более 10 мм. Боковые потери, обусловленные не идеальностью тепловой изоляции измерительной ячейки, и тепловое сопротивление переходов образец-нагреватель и образец-холодильник, вызванные неравномерностью рабочих поверхностей образца не учитывались в этой работе.

Тестовые измерения проводились в течении 3 часов, в ходе которых были проведены 5 полных циклов измерений температуры, что достаточно для оценки параметров теплопроводности. Температура окружающей среды в течении цикла измерений поддерживалась стабильной $\pm 0,5$ °С; относительная влажность воздуха – не более 80 %.

Теплопроводность (λ) определяется на основе закона Фурье [1, 2, 3]:

$$\lambda = \frac{P \cdot d}{A \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность материала $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$, d – толщина исследуемого образца, A – площадь поперечного сечения, ΔT – разница температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин // М. : Физматлит, 2005. – 544 с.
2. Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. Solid State Physics (Saunders College) // New York. – 1976.
3. Armstrong, R. C. R. Byron Bird: The integration of transport phenomena into chemical engineering // AIChE Journal. – 2014. – Т. 60, №. 4. – С. 1219–1224.

МЕТОДЫ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ГАЗОВЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Слободчиков Е. Г., Сивцев И. П.

(Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск)

В целях обеспечения энергоэффективного отопления в северных климатических районах России, в газовых котлах малой мощности предусматривается установка теплообменных труб. Смысл этих устройств заключается в передаче тепла питательной воде за счёт отработанных продуктов сгорания. Важным условием для работы теплообменных труб является равномерное распределение температуры за счёт турбулизации уходящих газов. Для решения этой задачи предусматриваются устройства,

называемые турбулизаторами. Исследование методики турбулизации газов, рассматривается законами гидравлики и аэродинамики.

Глобальная тенденция к повышению энергоэффективности и снижению негативного воздействия на окружающую среду определяет актуальность исследований в области повышения эффективности работы газовых котлов. Газовые котлы малой мощности широко используются для отопления и горячего водоснабжения жилых домов, административных зданий и небольших промышленных объектов. В северных климатических условиях строительства существует необходимость в совершенствовании работы теплогенерирующих установок, так как существующие модели не приспособлены к работе с расчетными параметрами наружного воздуха. Кроме того, на фоне растущих цен на энергоносители и ужесточения экологических норм, повышение КПД и снижение выбросов вредных веществ являются критически важными задачами. Турбулизация продуктов сгорания – один из наиболее перспективных подходов к решению этих задач, обеспечивающий интенсификацию теплообмена и, как следствие, снижение расхода топлива и выбросов.

Газовые котлы малой мощности в основном применяются в хозяйственно-бытовых целях, для обеспечения в жилых домах горячего водоснабжения и отопления. Когда в горелке природный или сжиженный газ сгорает, потоки горячего отработанного газа поднимаются вверх к дымоотводной трубе. В конструкции котла предусматривается наличие теплообменных труб, расположенных между камерой сгорания и дымоотводной трубой. Продукты сгорания омывают теплообменные трубы и передают тепло питательной воде. Для интенсификации процесса теплообмена и повышения КПД газового котла рассматривается работа турбулизаторов.

Поведение продуктов сгорания описываются законами гидравлики и аэродинамики. Поток горячего газа характеризуется режимом течения вещества, и в теплообменных трубах без турбулизаторов является ламинарным, когда поток характеризуется слоистым и упорядоченным течением. При таком случае передача тепла не осуществляется, а, соответственно, отмечаются затраты энергии. Турбулизаторы препятствуют ламинарному потоку вещества, разбивая её слои. Возникает хаотичное движение с завихрениями. Интенсификация теплообмена обуславливается большей площадью контакта горячих газов с теплообменными трубами.

Режим течения жидкости характеризуется безразмерным критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu} \quad (1)$$

При малых значениях числа Рейнольдса течение является ламинарным, а при больших – турбулентным. Переход от ламинарного к турбулентному течению происходит при определенном критическом значении числа Рейнольдса.

Для цилиндрических трубопроводов значение $L = d$, для каналов и труб не круглой формы $L = R$. Для каналов:

$$Re_k = \frac{v_k d}{\nu} = 2320, \quad Re_k = \frac{v_k d}{\nu} = 2320 \quad (2), (3)$$

Турбулизаторы представляют из себя конструкции, помещаемые в теплообменные трубы. Они бывают разных видов и отличаются в основном формами и аэродинамическими характеристиками. Основная их задача – интенсифицировать потоки вещества, вплоть до преодоления критической скорости потока, при котором происходит переход от ламинарного режима течения жидкости к турбулентному.

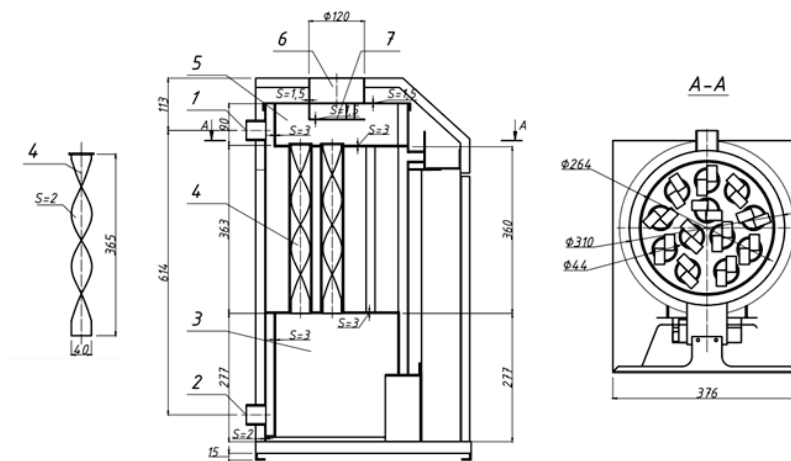


Рис. 1. Схема-чертеж напольного газового котла: 1 – выход в систему отопления; 2 – вход в систему отопления; 3 – топка котла; 4 – турбулизаторы дымовых газов; 5 – коллектор дымовых газов; 6 – дымоход; 7 – защита от задувания

За счёт простоты работы, относительной дешевизны и при этом высокой эффективности, установка турбулизаторов как метод турбулизации продуктов сгорания в газовых котлах малой мощности является наиболее распространённым методом. На данный момент чаще всего встречаются турбулизаторы лопастного вида, спирального, комбинированного и решетчатого. Они могут отличаться по материалу и по назначению.

Для обеспечения турбулентного режима течения вещества также рассматривается изменение геометрии теплообменных труб. В основном, в целях увеличения площади теплообмена, производится оребрение и изменение формы поперечного сечения труб. Данный метод не требует

дополнительных элементов котельной установки, однако требует изменение конструкции котла.

Помимо этого, турбулизация оказывает влияние на экологические показатели газовых котлов малой мощности. Это происходит благодаря полному смешению топлива с окислителем и увеличению времени контакта реагирующих веществ, что приводит к полному сгоранию топлива и снижению образования вредных веществ, таких как оксид азота NO и оксид углерода CO.

Для выявления наиболее эффективных форм и анализа работы турбулизирующих устройств эффективно используется инструментал вычислительной гидродинамики, также именуемый CFD–моделированием. Это раздел механики жидкости и газов, который использует численные методы и компьютерные технологии для анализа и моделирования поведения жидкостей и газов.

Благодаря возможностям численного моделирования текучего вещества решается ряд существенных проблем, препятствующих разработке совершенных методов турбуляции продуктов сгорания в газовых котлах малой мощности. Анализируются потоки вещества, распределение температуры и химические процессы, где прямое измерение этих явлений либо невозможно, либо затруднительно.

Возможности CFD–моделирования позволяют проанализировать работу различных типов турбулирующих устройств. Результаты анализа будут сравниваться с натурными показаниями рассмотренных турбулизаторов. Полученные данные исследования будут применены для разработки модели турбулизатора, с целью повышения энергоэффективности устройства и газового котла в целом.

Турбулизация продуктов сгорания является эффективным методом повышения энергоэффективности и снижения выбросов в газовых котлах малой мощности. Выбор конкретного метода турбулизации должен основываться на тщательном анализе конструкции котла, требуемых эксплуатационных характеристик и экологических требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева : монография / Д. У. Сугиров, С. М. Оспанова, М. К. Суйменова [и др.]. – М. : Мир науки, 2021. – Текст : электронный. – URL: <https://izd.mn.com/PDF/23MNNPM21.pdf> (дата обращения 13.11.2025).
2. Михайлов, А. Г. Эффективные поверхности теплообмена в топке газотрубного котла / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 120 с. : ил.
3. Мазурова, О. К. Генераторы тепла и автономное теплоснабжение зданий : учебное пособие / О. К. Мазурова, С. А. Тихомиров, В. Г. Федоровский. – Ростов-на-Дону : Рост. гос. строит. ун-т, 2015. – 180 с.

КОЛИЧЕСТВО НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Таппырова Н. И., Кравцова О. Н., Протождьяконова Н. А., Тимофеев А. М., Степанов А. В.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск)

На территории России вечная мерзлота занимает примерно 65 %, в основном это засоленные мерзлые грунты. Большой вклад в изучение засоленных многолетнемерзлых грунтов внесли Вотяков И. Н., Анисимова Н. П., Павлов А. В., Ершов Е. Д., Гаврильев Р. И. и другие авторы [1–6]. В последние годы широкое распространение получили расчетные методы, с помощью которых рассчитывается количество незамерзшей воды в засоленных мерзлых грунтах [5, 7].

В данной работе предложена методика, с помощью которой рассчитывается количество незамерзшей воды. Эта методика учитывает изменение начальной влажности, а также температуры и концентрации соли как для песчаного, так и для глинистого грунтов.

В работе [8] приведена зависимость температуры замерзания от концентрации объемного раствора хлорида натрия, а в работе [6] – температура замерзания порового раствора грунта, рассчитанная по формуле:

$$T = -kC(T), \quad (1)$$

где $C(T)$ – концентрация соли, %; $k = 0,7$.

Данные, полученные по формуле (1), практически совпадают с данными для объемного раствора $NaCl$ и не учитывают дисперсность грунта. Это вносит определенную погрешность в расчетах.

В наших ранних работах приведены результаты экспериментальных определений температурной зависимости количества незамерзшей воды при меняющейся степени концентрации соли порового раствора для грунтов с различной дисперсностью (рис. 2, 3). В качестве исследуемых материалов были взяты песчаный и глинистый грунты с территории вблизи г. Якутска [9].

Используя классические определения концентрации соли C , влажности W , количества незамерзшей воды в грунтах $W_{не}(T)$ и учитывая, что при промерзании влажного засоленного грунта образуется чистый лед, и вся оставшаяся вода (незамерзшая) растворяет соль, получаем:

$$\frac{W}{W_{не}(T)} = \frac{m_с}{m_{не}} = \frac{C(T)}{C}. \quad (2)$$

Отсюда:

$$C(T) = \frac{C \cdot W}{W_{нв}(T)} \quad (3)$$

Используя экспериментальные данные по фазовому составу порового раствора и меняя значения концентрации соли до замерзания, рассчитываем концентрацию порового раствора $C(T)$ в мерзлом грунте в зависимости от температуры. Расчеты, сделанные по формуле (3), показали, что с увеличением концентрации порового раствора температура начала замерзания понижается. При концентрации соли 5 % зависимости $C(T)$ объемного раствора $NaCl$ и порового раствора в грунте практически идентичны. С дальнейшим повышением начальной концентрации соли наблюдается расхождение. В глинистых грунтах это расхождение можно объяснить наличием прочносвязанной воды, которая, как известно, не растворяет соли [6]. При этом, происходит смещение равновесной температуры фазового перехода порового раствора, который имеет более высокую концентрацию. Для песчаных грунтов наблюдается совершенно другая картина: так как практически отсутствует связанная вода в них, то концентрация порового раствора не зависит от температуры замерзания.

Для песчаного грунта, используя формулы (1) и (3), количество незамерзшей воды вычисляем по формуле:

$$W_{нв}(T) = \frac{C_0 W_0^K}{|T|} \quad (4)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета $W_{нв}(T)$ по формуле (4). Видно, что $W_{нв}(T)$ зависит от начальных значений W_0 и C_0 .

Для глинистых грунтов, учитывая формулу (4) и аддитивность количества незамерзшей воды, получаем:

$$W_{нв}(T) = W_{нв}^0(T) + \frac{C_0 W_0^K}{|T|}, \quad (5)$$

где $W_{нв}^0(T)$ – влажность незасоленного грунта при температуре T , %.

На рис. 1 приведено сравнение экспериментальных [9] и расчетных зависимостей $W_{нв}(T)$, полученных по формуле (4) для разных значений C_0 и при определенной начальной влажности $W_0 = 10$ % для песчаного грунта.

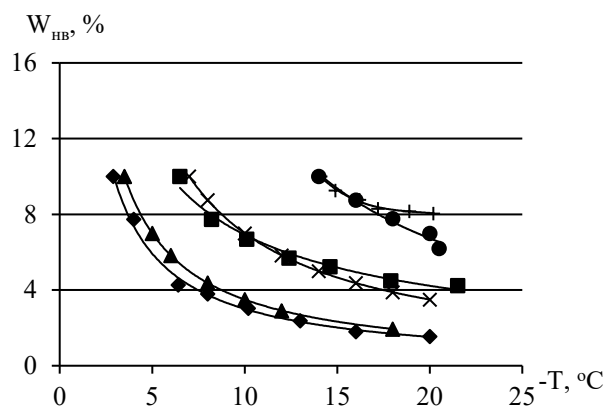


Рис. 1. Температурная зависимость $W_{нв}$ в засоленном песчаном грунте ($W_0 = 10\%$). Эксперимент: \blacklozenge – $C = 5\%$, \blacksquare – $C = 10\%$, $+$ – $C = 20\%$; расчет по формуле (4): \blacktriangle – $C = 5\%$, \times – $C = 10\%$, \bullet – $C = 20\%$

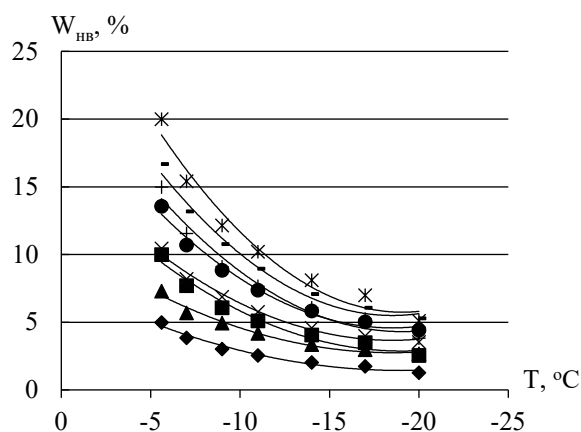


Рис. 2. Температурная зависимость $W_{нв}$ в засоленном глинистом грунте ($C = 5\%$). Эксперимент: \blacklozenge – $W_0 = 5\%$, \blacksquare – $W_0 = 10\%$, $+$ – $W_0 = 15\%$, $*$ – $W_0 = 20\%$; расчет по формуле (5): \blacktriangle – $W_0 = 5\%$, \times – $W_0 = 10\%$, \bullet – $W_0 = 15\%$, $-$ – $W_0 = 20\%$

Для глинистого грунта наблюдается такой же характер зависимости $W_{нв}$ от T . Сравнение расчетных значений по формулам (4), (5) и экспериментальных при C_0 равном 5 % и 10 % показывает хорошее совпадение. Расчеты, проведенные по этим формулам, при начальной концентрации соли выше 10 % дают заниженные значения. При этом, в глинистых грунтах количество незамерзшей воды выше, чем в песчаных.

На рис. 2 приведена зависимость $W_{нв}$ от T для глинистого грунта при постоянной концентрации соли 5 % для различных значений начальной влажности. Видно, что с увеличением начальной влажности в засоленных грунтах происходит увеличение $W_{нв}$. При этом, чем ниже температура замерзания порового раствора, тем меньше количество незамерзшей воды для любых значений начальной влажности и тем меньше расхождение между количеством незамерзшей воды при различных начальных влажностях и больше совпадения между расчетными и экспериментальными значениями. Этот вывод соответствует и для песчаных грунтов.

Исходя из вышеизложенной методики расчета, проведя один эксперимент при известных значениях начальной влажности и концентрации соли порового раствора грунта, рассчитываются количество незамерзшей воды и концентрация порового раствора для других начальных значений W_0 , C_0 . В результате установлено, что при промерзании любого засоленного грунта начальная влажность, концентрация соли и температура замерзания являются одними из основных критериев, влияющих на количество незамерзшей воды в нем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И. Н. Вотяков. – Новосибирск : Наука, 1975. – 176 с.
2. Анисимова, Н. П. Гидрогеохимические закономерности криолитозоны : автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук / Нина Петровна Анисимова. – Якутск, 1985. – 35 с.
3. Павлов, А. В. Теплофизика ландшафтов / А. В. Павлов – Новосибирск : Наука, 1979. – 284 с.
4. Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Е. Д. Ершов, Ю. П. Акимов, В. Г. Чеверев [и др.]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 190 с.
5. Гаврильев, Р. И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны / Р. И. Гаврильев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1998. – 280 с.
6. Ефимов, С. С. Влага гигроскопических материалов / Ефимов, С. С. – Новосибирск : Наука, 1986. – 160 с.
7. Xiao, Z., Zhu, L., Hou, Z. The change mechanism and a prediction model of unfrozen water content in sodium chloride soil // Geoderma. – 2022. – 419 : 115881. – DOI 10.1016/j.geoderma.2022.115881.
8. Перельман, В. И. Краткий справочник химика / В. И. Перельман – М. : Госхимиздат, 1954. – 560 с.
9. Количество незамерзшей воды в засоленных песчаных грунтах / Н. И. Таппырова, А. М. Тимофеев, А. В. Степанов [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 201–205.

СВЯЗЬ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ГРУНТОВ С ОСОБЕННОСТЯМИ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОРЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ CALMR40)

Андрюшин Д. С., Разумовский Р. О., Сериков С. И.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Енисейский Север является регионом с одними из самых высоких в России значений среднегодовой мощности снежного покрова. Существование и режим снега определяются климатическими условиями территории.

В ходе данной работы проведен анализ климатических данных за различные периоды времени на территории района города Игарки, относящегося к умеренному климатическому поясу. Среднегодовая температура участка работ за последние 20 лет составляет $-6,3^{\circ}\text{C}$, количество осадков – 610 мм в год [7].

Территория расположена в области прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, их мощность составляет от 30 до 50 м [5].

По архивным климатическим данным построены графики динамики различных показателей (среднегодовой температуры воздуха, годового количества осадков, высоты снежного покрова), определен их тренд и изменение за 1936–2024 гг. Расчеты проводились как в целом по годам, так и индивидуально для каждого месяца. Кроме этого, отдельно проанализированы результаты для теплого (июнь–сентябрь) и холодного (октябрь–май) периодов.

Результаты анализа динамики показателей по месяцам за весь период метеонаблюдений с 1936 по 2024 гг. представлены в табл. 1. В период с октября по декабрь отмечался существенный прирост выпавших осадков, что, в целом, наблюдалось на протяжении всей зимы. Этот фактор оказывает большое влияние на тепловой режим грунтов в момент установления низких температур, достаточных для промерзания грунта в холодное время года.

Табл. 1. Темпы изменения метеорологических показателей по месяцам

Величина	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ср. температура, $^{\circ}\text{C}/\text{год}$	0,00	0,02	0,05	0,03	0,03	0,04	0,01	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02
Осадки, мм/год	0,25	0,31	0,31	0,25	0,24	0,26	-0,10	0,09	-0,07	0,36	0,37	0,37
Ср. высота снежного покрова, см/год	0,22	0,34	0,43	0,38	0,24	–	–	–	0,00	0,02	0,09	0,15

Установлено, что значение среднегодовой температуры воздуха возросло на 1,3 °С в сравнении с периодом 1936–1966 гг. Среднемесячная сумма температур за теплый период увеличилась на 62 °С, за холодный – на 58 °С. В абсолютных значениях скорость прироста суммы температур для холодного периода составила 5,29 °С/год, в теплый – 2,82 °С/год. Тенденция к потеплению климата в наибольшей степени охватывает период холодного времени года, что отмечается также в публикациях [3].

Связь особенностей распространения снежного покрова и температурного режима сезонно-талого слоя исследуется, начиная с середины XX столетия и описана в работах [2, 4] и др. Более высокие значения глубины залегания подошвы сезонно-талого слоя приурочены, при прочих равных условиях, к участкам с наименьшей мощностью снежного покрова.

В настоящее время обработан ряд наблюдений за динамикой сезонно-талого слоя с 2008 по 2024 годы, установлено увеличение его мощности местами до 45 см, что, по-видимому, объясняется увеличением зимних осадков [1]. CALMR40 размером 100x100 м, расположена в 7 км северо-западнее Игарки. На момент заложения площадки средняя глубина сезонно-талого слоя (СТС) составила 77 см, в 2024 г. – составила 118 см.

Площадка расположена на поверхности озерно-ледниковой равнины, частично залесенной, с присутствием грядово-мочажинного комплекса. Литологическую основу ее составляют супеси и суглинки [6]

Авторами с октября 2024 г. по март 2025 г. еженедельно проводились наблюдения за высотой снежного покрова. Измерения выполнялись по десяти рейкам, установленным на площадке на различных элементах микрорельефа: гряды, мочажины, плоские сухие понижения, осложненные лесным покровом. На март 2025 г. высота снежного покрова для гряд составила в среднем 72 см, для мочажин – 156 см, для сухих понижений – 111 см, для лесных участков – 129 см. С начала октября по конец декабря накопилось 3/4 от максимальной мощности снежного покрова, приходящейся на начало марта (рис. 1).

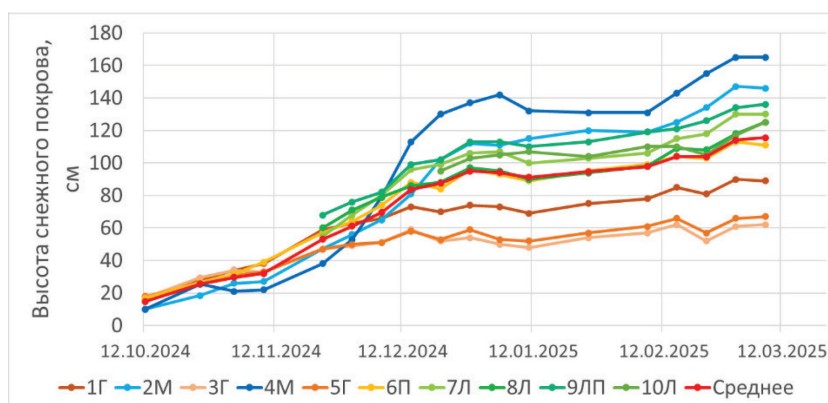


Рис. 1. Высота снежного покрова на площадке CALM за период октябрь 2024 – март 2025 гг. Г – точки, расположенные на грядах, М – в мочажинах, П – плоские сухие понижения, Л – в лесу

Ветровой перенос вызывает перераспределение снежного покрова с более высоких участков на более низкие. На основе цифровой модели рельефа Arctic DEM с разрешением 2 м был сформирован растр экспозиции склонов. Преобладание в зимний период ветров южных румбов приводит к уменьшению снежного покрова на склонах южной экспозиции и накоплению снега на склонах северной экспозиции, в результате чего последние промерзают значительно слабее.

Несмотря на общее увеличение глубины СТС, соотношение между склонами южной и северной экспозиции довольно стабильно и составляет от 15 до 25 см (рис. 2).

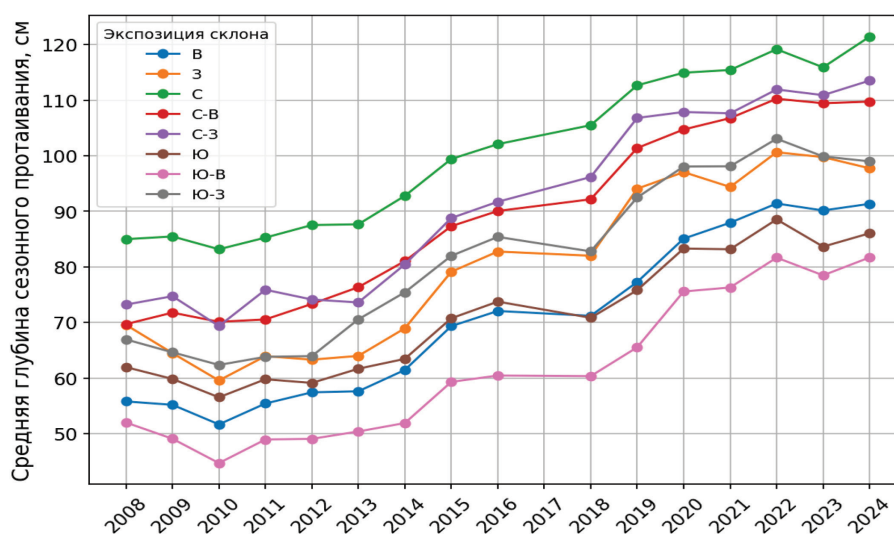


Рис. 2. Динамика распределения средней глубины СТС от экспозиции склона

На протяжении всего периода климатическая динамика характеризовалась устойчивой тенденцией к потеплению и увлажнению. Это проявлялось, в частности, в увеличении мощности снежного покрова и глубины сезонно-талого слоя (СТС). Особенности микрорельефа и ландшафтной структуры существенно влияют на пространственную неоднородность снежного покрова. Эти закономерности стабильны во времени, абсолютные различия зависят в целом от мощности выпавшего снега.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов, О. А. Мониторинг мощности сезонно-талого слоя на российских площадках CALM / О. А. Анисимов, А. П. Морозов, Е. Л. Жильцова // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2024. – Вып. 11. – С. 457–462.
2. Константинова, Г. С. Влияние снежного покрова на динамику сезонно- и многолетнемерзлых пород (на примере Игарки) / Г. С. Константинова // Труды ин-та мерзлотоведения им. В. А. Обручева. – Т. XVII. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – С. 46–52.

3. Современные тенденции приземной температуры воздуха в регионе Баренцева и Карского морей / Т. К. Карандашева, Б. В. Иванов, В. И. Демин [и др.] // Российская Арктика. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 55 – 64.
4. О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов / Н. И. Осокин, Р. С. Самойлов, А. В. Сосновский [и др.] // Материалы гляциологических исследований (МГИ). – 2000. – № 88. – С. 41–45.
5. Карпов, Е. Г. Состояние криолитозоны Игарского района Енисейского Севера / Е. Г. Карпов, Е. Л. Барановский ; отв. ред. С. И. Заболотник. – Якутск : Изд-во ФБГУН Институт мерзлотоведения им. акад. П. И. Мельникова. – 1999. – 89 с.
6. CALM Metadata. R40 (Игарка) : данные о площадке в системе мониторинга CALM. – Текст : электронный // Циркумполярная сеть мониторинга активного слоя (CALM) : сайт. – URL: https://www2.gwu.edu/~calm/data/webforms/r40_f.htm#_DATA (дата обращения: 02.03.2025).
7. Данные архива климатической информации. – Текст : электронный // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных : сайт – URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 15.01.2025).

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ К СОВРЕМЕННОМУ ПОТЕПЛЕНИЮ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ)

Варламов С. П.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Выявление региональных особенностей термической устойчивости мерзлотных ландшафтов основывается на реальных многолетних данных натурного комплексного экспериментального исследования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, организованного на экспериментальных площадках стационаров «Якутск» и «Чабыда», на мониторинговых полигонах на право- и левобережье р. Лены на широте г. Якутска за период 1981–2023 гг. Наблюдательные пункты охватывают элементарные ландшафтные комплексы 9 типов местностей с различными вариациями их литогенной основы.

Показателями изменения теплового состояния верхней толщи многолетнемерзлых пород (ММП) на изменения климата являются среднегодовая температура на подошве деятельного слоя (T_{ξ}) и в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) (T_0) и мощность сезонноталого слоя (ξ). В пределах исследуемой территории ξ при разном механическом составе, в зависимости от характера растительного, напочвенного покровов и влагосодержания отложений изменяется в больших пределах от 0,4 до 4,2 м, T_0 изменяется от +0,9 до –6,4 °C [1].

Для измерения температуры пород использовались стационарно установленные термокосы с датчиками температуры на глубинах 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10 м. В качестве регистраторов температуры пород служили полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С.

Проведены два вида наблюдений: первое – на стационарах, где замеры температуры в обсаженных скважинах и высоты снега производились ежемесячно, второе – на полигонах, где в скважинах с захороненными термокосами наблюдение проводили 3-4 раза в год, а высота снега определялась в декабре и в период максимального снегонакопления (конец марта–начало апреля). Мощность деятельного слоя определялась непосредственно в пунктах наблюдений ручным бурением, металлическим щупом в конце теплого сезона.

Диапазон пространственной изменчивости мощности сезонноталого слоя по типам местности следующий: пойменный – 0,56; надпойменно-низкотеррасовый – 0,47; песчано-грядовый – 1,24; межгрядово-низинный – 0,89; межаласный – 1,25; аласный – 0,98; мелкодолинный – 2,41; склоновый – 2,59 и плакорный – 1,30 м. Межгодовая изменчивость мощности сезонноталого слоя следующая: пойменный – 0,56; надпойменно-низкотеррасовый – 0,39; песчано-грядовый – 1,18; межгрядово-низинный – 0,76; межаласный – 0,97; мелкодолинный – 1,03; склоновый – 0,60 и плакорный – 1,30 м.

Тренды мощности сезонноталого слоя ($\alpha\xi$) по типам местности распределяются следующим образом: преимущественно отрицательные характерны для дренированных типов местности: в песчано-грядовом (–2,81–0,73 см/год), в склоновом (–1,16–0,43 см/год); преимущественно положительные: в надпойменно-низкотеррасовом (–0,19–0,32 см/год), в межгрядово-низинном (–2,72–0,60 см/год), в межаласном (–1,29–6,00 см/год), в мелкодолинном (–0,25–1,09 см/год). При этом зависимость между трендами $\alpha\xi$ и трендами суммы положительных среднемесячных температур воздуха ($\alpha T_{\text{вл}}$, °С/сезон) в дренированных типах местности (песчано-грядовом, межаласном, плакорном и склоновом) имеет обратную связь, в недренированных (мелкодолинном, межгрядово-низинном, пойменном и надпойменно-низкотеррасовом) – положительную, а в целом во всех типах местности преобладает обратная связь.

Диапазон пространственной изменчивости среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м по типам местности следующей: пойменный – 2,6; надпойменно-низкотеррасовый – 2,0; песчано-грядовый – 3,3; межгрядово-низинный – 3,4; межаласный – 4,5; аласный – 1,3; мелкодолинный – 5,3; склоновый – 2,1 и плакорный – 0,8 °С. Межгодовая изменчивость температуры грунтов в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м достигает максимальных значений по типам местности таким образом: пойменный – 1,0; надпойменно-низкотеррасовый – 1,1; песчано-грядовый – 1,7; межгрядово-

низинный – 2,7; межаласный – 3,5; аласный – 0,4; мелкодолинный – 3,7; склоновый – 1,1 и плакорный – 0,8 °С.

Рассчитаны коэффициенты линейного тренда среднегодовой температуры пород в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м (αT_0), как показателя отклика на потепление климата. Тренды по типам местности распределены следующим образом: положительные – в межаласном (0,0086–0,1009 °С/год), в плакорном (0,0134–0,0428 °С/год); преимущественно положительные – в песчано-грядовом (–0,0069–0,0287 °С/год), в межгрядово-низинном (–0,0571–0,0176 °С/год), в мелкодолинном (–0,0246–0,0339 °С/год), в склоновом (–0,0028–0,0222 °С/год); отрицательные и положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (–0,0087–0,0378 °С/год) и преимущественно отрицательные – в аласном (–0,0132–0,0342 °С/год). При этом отрицательные тренды часто встречаются в менее дренированных типах местности (аласном, мелкодолинном), приуроченным к отрицательным формам рельефа.

Проведен региональный анализ изменчивости коэффициента термической устойчивости многолетнемерзлых пород ($K\alpha = \alpha T_0 / \alpha T_{\text{вз}}$), предложенный А. В. Павловым [2]. При значениях $K\alpha < 0,50$ отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при $0,5 < K\alpha < 0,75$ – средняя устойчивость и при $0,75 < K\alpha < 1,0$ – слабая устойчивость мерзлых грунтов [3].

В плакорном типе местности $K\alpha$ изменяется от 0,19 до 0,59, в межаласном колеблется в больших пределах 0,18–3,54, в песчано-грядовом – –0,10–0,38, в межгрядово-низинном – –0,62–0,25, в мелкодолинном – –0,78–0,50, в пойменном – –0,33–0,65, в склоновом – –0,04–0,33, в аласном – –0,36–0,29, в надпойменно-низкотеррасовом – –0,10–0,53. Отрицательные значения коэффициента $K\alpha$ свидетельствуют об охлаждении многолетнемерзлых пород в условиях потепления климата и подтверждают аградационные процессы. Они встречаются в большинстве типов местности за исключением плакорного и межаласного. Положительные значения коэффициента $K\alpha$, превышающие 1,0, когда тренды повышения среднегодовой температуры грунтов равны и значительно превышает тренды роста среднегодовой температуры воздуха, мы считаем неустойчивыми. Это свидетельствует о деградации многолетнемерзлых пород. Например, это наблюдается в лесу в межаласном типе местности в период 2007–2023 гг., примыкающей к линейным сооружениям (железная дорога) участкам, в связи увеличением освещенности местности, из-за вырубki леса в полосе отвода дороги.

Таким образом для рассматриваемого региона количественно оценена реакция теплового состояния литогенной основы мерзлотных ландшафтов на современное потепление климата, определяемого совокупным влиянием изменчивости климатических параметров и компонентов мерзлотных ландшафтов (растительного, почвенного и снежного покровов, состава и льдистости (влажности) отложений).

Несмотря на существенное потепление современного климата на исследуемой территории, динамика термического состояния многолетнемерзлых пород в естественных ландшафтах имеет разнонаправленную тенденцию, объясняемую в основном большой межгодовой изменчивостью режима снегонакопления и увеличением биомассы ландшафтов при благоприятных условиях (увлажнения и тепла). В годы уменьшения мощности снежного покрова происходит переохлаждение грунтовой толщи, что может циклически нивелировать общую тенденцию к потеплению.

Современный период характеризуется, в зависимости от ландшафтных условий, преимущественно высокой и средней термической устойчивостью ММП. Также на локальных участках наблюдаются аградационные процессы связанные основным с режимом снегонакопления и увеличением биомассы, а деградационные процессы – на участках, подвергшихся антропогенному воздействию, с близко залегающими подземными льдами, где происходит активизация термокарста. Мощность сезонноталого слоя в естественных ландшафтах является преимущественно достаточно стабильной величиной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Тенденция возрастания мощности СТС статистически незначимая. В то же время локально встречаются участки со значимой тенденцией как возрастания, так и уменьшения мощности СТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варламов, С. П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии / С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрыбин. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 218 с.
2. Павлов, А. В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России / А. В. Павлов, Г. В. Малкова // Криосфера Земли. – 2009 – Т. XIII, № 4. – С. 32–39.
3. Малкова, Г. В. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата / Г. В. Малкова, А. В. Павлов, Ю. Б. Скачков // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV, № 4. – С. 33–36.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ В СУБАКВАЛЬНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ТОЛЩАХ В ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Григорьев М. Н.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Институт мерзлотоведения СО РАН в течение почти семи десятилетий изучает распространение и эволюцию субаквальных многолетнемерзлых пород, а также динамику береговой мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне арктических морей Восточной Сибири. В ходе буровых исследований подводной мерзлоты на прибрежном шельфе моря Лаптевых, проводившихся с морского льда, нередко фиксируются достаточно мощные газопроявления в виде «факелов» метана на различных глубинах проходки. Буровые профили закладывались в прибрежно-шельфовой зоне при максимальной глубине моря в первые десятки метров. Подобные газовые сипы также обнаруживаются в мерзлых и оттаивающих отложениях морских лагун, под прибрежными озерами и под руслами проток в дельтах рек. Как правило, их выявляли случайно, при огневом прогреве бурового снаряда для облегчения извлечения кернового материала из колонковой трубы, а также при пузырьковом выделении газа в околоскважинном пространстве (рис. 1–4).



Рис. 1. Горящий газ в устье скважины на мелководном шельфе моря Лаптевых (губа Буор-Хая)



Рис. 2. Бурление метана в устье скважины на Омуде лагуне (Быковский п-ов)

Обычно такой горящий газовый факел имеет высоту от 20 до 40 см, а его цвет варьирует от красно-желтого до зеленовато-голубого. Максимальная продолжительность горения достигала около 30 минут. Анализ проб воздуха из устья скважины показал, что концентрация метана в них может достигать 30–45 %.



Рис. 3. Горящий газ в устье скважины на льду Туматской протоки (дельта Лены)



Рис. 4. Горящий газ в устье скважины на льду прибрежного озера Гольцового (Быковский п-ов)



Рис. 5. Большое количество органики (в данном случае древесного детрита) в буровом керне (губа Буор-Хая)

В публикациях, посвященных газовыделению из промерзших и оттаивающих толщ подводной мерзлоты, активно обсуждаются источники столь значительных газопроявлений в шельфовой зоне Восточно-Арктических морей. Во многих работах утверждается, что основной объем метана продуцируется из глубинных газогидратов. Однако, по нашему мнению, проявление газовых сипов на относительно малых глубинах связано, в первую очередь, с бактериальным разложением органического вещества в верхних десятках метров субаквальных отложений. Доля органического материала в них нередко достигает 10 %, а в отдельных кернах – до 30 % по массе (рис. 5).

Скопления метановых пузырей часто наблюдаются во льду в приустьевых частях арктических рек (рис. 6), а также во льду многочисленных прибрежных арктических озер (рис. 7).

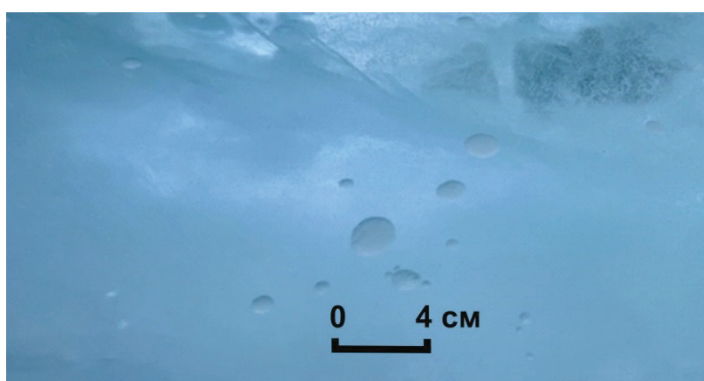


Рис. 6. Скопление метановых пузырей во льду в приустьевой зоне Сардахской протоки (авандельта р. Лены)



Рис. 7. Скопление метановых пузырей во льду прибрежных арктических озер (о. Гольцовое, Быковский п-ов)

Исследование выполнено при поддержке научного проекта НИОКТР 122011400151-0 «Деградация мерзлоты и трансформация рельефа в береговой зоне и на шельфе арктических морей восточного сектора РФ: Динамика, прогноз и риски».

СЛОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ПРОМОРОЖЕННОСТИ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

Ефремов В. Н.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

С позиций здравого смысла и практического опыта геофизических исследований нами было выдвинуто предположение о существовании промежуточного слоя между тальми и многолетнемерзлыми грунтами, характеризующегося переходными параметрами температуры и электрических свойств. Необходимость учета подобного слоя стала очевидной уже при первых результатах радиоимпедансного зондирования [1], проведенного в ходе мониторинга состояния мерзлых грунтов на стационаре ИМЗ СО РАН «Туймаада». Без включения этого слоя в геоэлектрический разрез невозможно было добиться приемлемой сходимости расчетных и экспериментальных данных при решении обратной задачи геофизики. Этот слой, названный нами слоем переходной промороженности (СПП) [2] сыграл важную роль в интерпретации данных радиоэлектромагнитного мониторинга состояния мерзлых грунтов [3].

По результатам радиоимпедансного зондирования получена модель геоэлектрического строения толщи мерзлых дисперсных грунтов на территории стационара ИМЗ СО РАН «Туймаада», состоящая из трех основных горизонтов (рис. 1). Верхним горизонтом является известный деятельный слой (ДС). В подошве деятельного слоя выделяем промежуточный слой переходной промороженности (СПП) [3] с градиентным изменением льдистости и удельного электрического сопротивления (УЭС), в зависимости от температуры грунтов. Уже под ним, находится опорный горизонт стационарно промерзшей многолетнемерзлой толщи грунтов (СПМТ) с постоянными величинами, указанных в СПП параметров. В СПП льдистость грунтов увеличивается с понижением температуры, что объясняет рост его УЭС. Как известно, с понижением температуры грунтов последовательно замерзают свободная, рыхлосвязанная и связанная вода, что определяет максимальную промороженность в зависимости от влажности и минерального состава. Таким образом, температура грунтов непосредственно влияет на их льдистость и, соответственно, на УЭС. В СПМТ льдистость постоянна и

прочность таких грунтов с изменением климата не вызывает особых опасений, поэтому именно СПП, наряду с ДС, представляется основным объектом наблюдения для мониторинга изменения состояния многолетнемерзлых грунтов, поскольку его переход из твердомерзлого в пластично-мерзлое состояние может привести к деформациям грунтовых оснований.

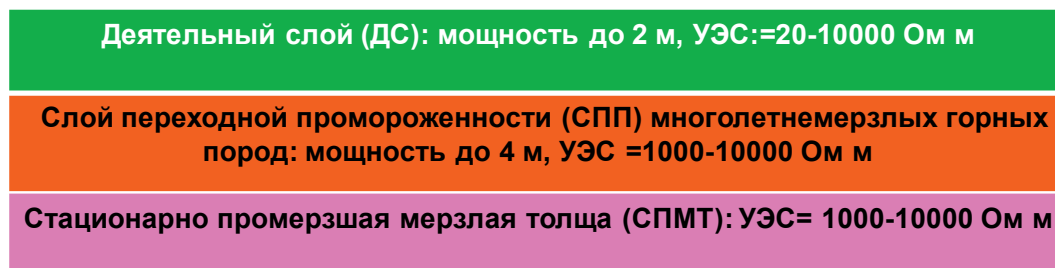


Рис. 1. Горизонтально-слоистая модель геоэлектрического строения мерзлых грунтов

Трехслойная модель подтверждается экспериментально полученными результатами радиоимпедансного зондирования, отражающими изменение геоэлектрического разреза (ГЭР) во временном ряду с апреля по октябрь (рис. 2).

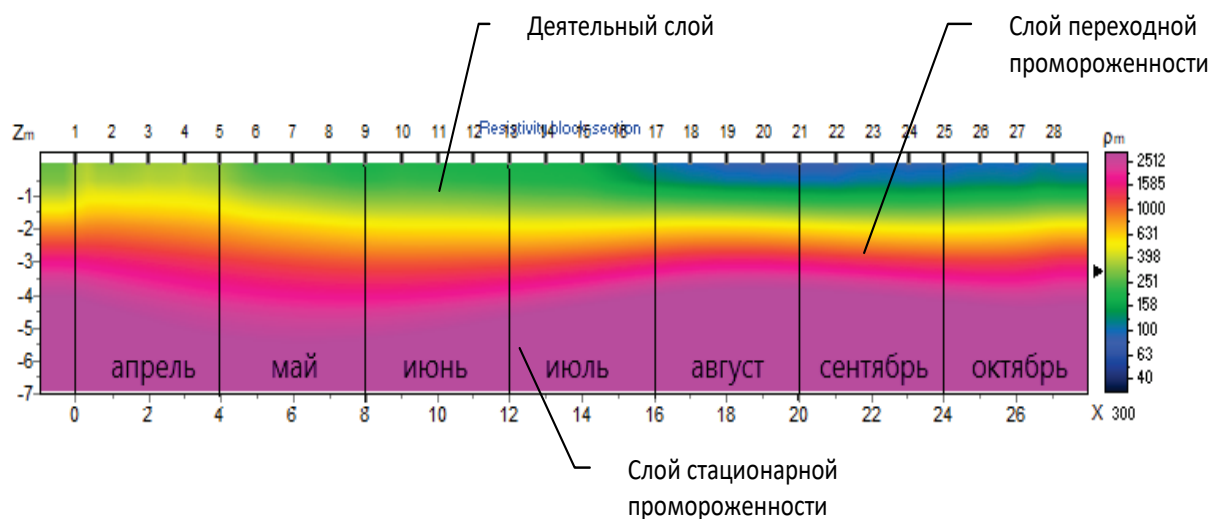


Рис. 2. Временной разрез изменения удельного электрического сопротивления мерзлых грунтов на стационаре ИМЗ СО РАН «Туймаада» в период с апреля по октябрь 2008 г.

ДС характеризуется УЭС в пределах от 50 до 500 Ом·м (зеленый тон), мощностью от 1 до 2 м и низкоомной водонасыщенной верхней его частью (синий тон), вызванной дождевыми осадками в августе–октябре.

Подстилающий его СПП выделяется значениями УЭС от 500 до 2500 Ом·м и мощностью от 2 до 4 м (красный тон). Опорный горизонт СПМТ имеет УЭС более чем 2500 Ом·м, достигая 10000 Ом·м (сиреневый тон).

Дополнительным подтверждением служат температурные измерения в скважине, сопряженной с точкой радиоимпедансного зондирования. Полученные значения температуры с интервалом 0,25 м в диапазоне глубин 0–3,5 м подтверждают наличие слоя переходной промороженности (рис. 3).

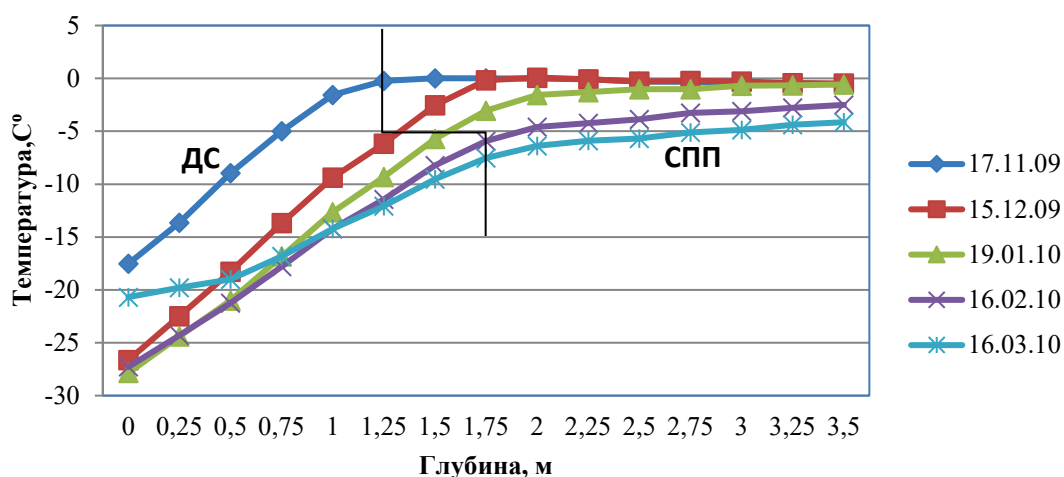


Рис. 3. Температура грунтов деятельного слоя (ДС) и слоя переходной промороженности (СПП) в зимний период на глубине от 0 до 3,5 м

Очевидно, что СПП выделяется горизонтальными, либо близкими к ним линейными зависимостями температуры от глубины, в отличие от наклонных кривых в ДС. СПП выделяется на глубине 1,8 м и представляет собой ствол так называемого на практике, «дерева» мерзлотных температурных кривых (на рис. 3 ствол «дерева» расположен горизонтально).

Наблюдения в 2008–2010 гг. показали, что минимальная температура СПП ($-7,5^{\circ}\text{C}$) зафиксирована в марте 2010 г. при меньшей высоте снежного покрова (19 см против 23 см в 2009 г.). С февраля по апрель температура СПП продолжает снижаться, тогда как в ДС уже начинается прогрев. Максимальная температура СПП ($+0,7^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в августе как в 2009, так и в 2010 гг. Полученное по результатам радиоимпедансного зондирования изменение УЭС показано на рис. 4.

Изменение УЭС СПП (рис. 4) демонстрирует сложную зависимость от температуры: с ноября по февраль УЭС снижается, затем возрастает при дальнейшем охлаждении, что указывает на нелинейность связи между температурой и электрическими свойствами грунтов.

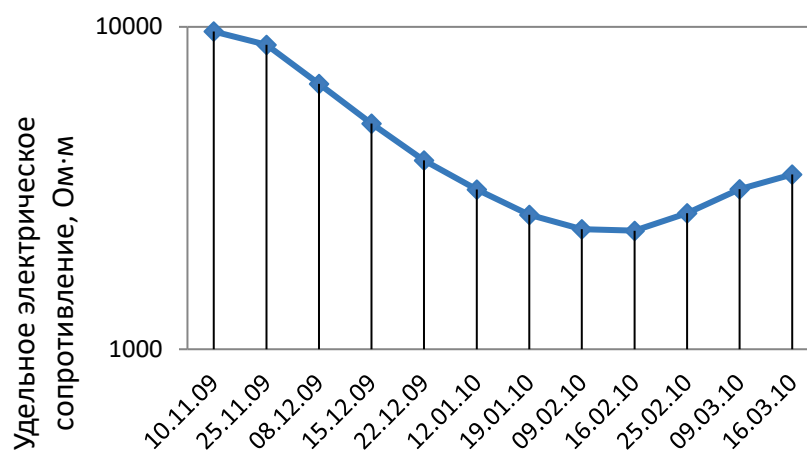


Рис. 4. Изменение УЭС СПП на глубине 3 м в зимний период 2009–2010 гг.

Состояние многолетнемёрзлых грунтов зависит не только от температуры приземного воздуха, но и от теплопроводности ДС, на которую влияют снежный покров, дождевые осадки, иссушение грунтов и др. Комбинация этих факторов может привести к аномальному растеплению СПП, что чревато деструкцией грунтовых оснований [3].

Таким образом, слой переходной промороженности, регистрируемый двумя различными методами в подошве деятельного слоя песков, является важным объектом мониторинга при оценке состояния многолетнемёрзлых песчаных оснований, причем с обязательным применением геофизического мониторинга. Наиболее приемлемым является радиоэлектромагнитный мониторинг, дающий всю необходимую информацию для оценки естественной влажности деятельного слоя, объемной льдистости и плотности грунтов слоя переходной промороженности [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов, В. Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов / В. Н. Ефремов. – Якутск : Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2013. – 204 с.
2. Ефремов, В. Н. Новый подход к мониторингу состояния грунтов криолитозоны: наблюдения за степенью их промороженности с оценкой льдистости по электрическому сопротивлению / В. Н. Ефремов // Мониторинг в криолитозоне : сборник докладов шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. – С. 392–398.
3. Ефремов, В. Н. Геофизический мониторинг состояния мерзлых грунтов / В. Н. Ефремов // Целостность и ресурс в экстремальных условиях : сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, 19–23 сентября 2024 г. – Киров : Изд-во АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2024. – С. 146–149.

РАСЧЕТНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Литвинцев К. Ю.¹, Финников К. А.², Пономарева Т. В.³, Пономарев Е. И.³

¹(ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск)

²(ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Красноярск)

³(ФГБУН ФИЦ «КНЦ СО РАН» Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск)

Почвенный покров в пределах сплошного распространения мерзлоты в Средней Сибири (территория Красноярского края, Россия) характеризуется значительной неоднородностью, что связано с разнообразием природно-экологических условий. Глобальные изменения климата и интенсивное промышленное освоение территорий, особенно в условиях криолитозоны, приводит к изменению состояния почв, значительной вариации уровня сезонно-талого слоя, нарушению физических свойств, тепловых и влажностных режимов почвенного профиля. Прогнозирование процессов деградации и восстановления мерзлоты возможно лишь при наличии комплексных данных о теплофизических характеристиках почв и грунтов, надежность которых должна подтверждаться сопоставлением этих характеристик, полученных различными методами в натурных и лабораторных измерениях. Среди методов определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности почв в натурных условиях можно выделить:

- измерения зондовыми датчиками;
- зондовые измерения плотности теплового потока в почве с одновременным измерением температурного профиля;
- восстановление значений коэффициентов из данных долговременных измерений температурных профилей.

Таблица 1. Измерения коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К)

Объемн. доля влаги, %	λ , TEMPOS	λ , метод цил. слоя	Расхождение, %
0	0,18	0,35	+94
8,9	1,7	1,42	-16
17,8	2,6	1,61	-38
26,7	2,9	2,1	-28

Измерения зондовыми датчиками могут обладать значительной погрешностью ввиду того, что диаметр (или другой характерный размер) зонда может быть сравним с характерным размером структуры почвы. Как показывают измерения авторов, эта погрешность в наибольшей степени проявляется в состояниях почвы, далеких от влагонасыщенных. В таблице 1 результаты измерений коэффициента теплопроводности кварцевого песка мобильным прибором TEMPOS Thermal Properties Analyzer (диаметр зонда

3,9 мм) сопоставлены с результатами измерений методом цилиндрического слоя (внутренний диаметр слоя 9,5 мм, внешний – 32 мм).

В настоящей работе представлены результаты расчета коэффициента теплопроводности по данным натурных измерений теплового потока прибором ИТП-МГ4.03/5(III) «Поток» и температурного профиля, проводимым через стенку разреза. Измерения проводились на двух пробных участках: ненарушенного торфянокриозема и грубогумусового криозема с признаками аэротехногенного нарушения в пределах Норильского промышленного района. Измеренные температурные профили аппроксимировались полиномиальными зависимостями температуры от глубины, из которых определялись величины градиента температуры.

Таблица 2. Рассчитанные коэффициенты теплопроводности, рассчитанные и измеренные значения удельного (на ед. массы сухой почвы) влагосодержания

Ненарушенный торфянокриозем				
Глубина, см	$q_{\text{ЭКС}}, \text{Вт/м}^2$	$\lambda_{\text{расч}}/ \lambda_{\text{sat}} / \lambda_{\text{dry}}, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$W_{\text{расч}}, \text{ вес \%}$	$W_{\text{ЭКС}}, \text{ вес \%}$
10	15,9	0,42/0,25/0,05	350	350
15	12,0	0,41/0,25/0,05		
20	8,0	0,37/0,25/0,05		
25	6,1	0,42/0,25/0,05	69	76
35	5,1	0,29/0,25/0,05		
Нарушенный грубогумусовый криозем				
Глубина, см	$q_{\text{ЭКС}}, \text{Вт/м}^2$	$\lambda_{\text{расч}}/ \lambda_{\text{sat}} / \lambda_{\text{dry}}, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$W_{\text{расч}}, \text{ вес \%}$	$W_{\text{ЭКС}}, \text{ вес \%}$
20	33,1	1,7/7,0/0,15	40	38

В таблице 2 приведены данные измерений теплового потока и рассчитанных коэффициентов теплопроводности, а также величин удельного влагосодержания, определенного в соответствии с моделью [1] и путем анализа отобранных проб. Результаты сопоставления показывают хорошее соответствие.

Для оценки коэффициента температуропроводности по данным натурных измерений временных зависимостей температуры на разных глубинах зачастую используется подход, основанный на сопоставлении амплитуд или фаз гармонической (с периодом 1 сутки) колебаний температуры. Данному подходу присуща погрешность, связанная с наличием перепадов в свойствах почв (например, при переходе от органогенного слоя к минеральному) даже при условии, что такой перепад лежит вне диапазона глубин, для которого определяется изменение амплитуды и фазы колебаний. Аналитическое рассмотрение задачи распространения гармонической температурной волны показывает, что на изменение амплитуды и фазы

колебаний на протяжении слоя $0 < y < h$ влияют свойства среды при $y > h$, причем тем существеннее, чем больший перепад в точке $y = h$ испытывает величина *тепловой инерции* среды, определяемая как $(\lambda \rho C)^{1/2}$.

В настоящем исследовании рассматривается метод оценки теплофизических свойств почвы путем анализа данных полевых измерений температуры, являющийся развитием [2]. Метод основан на сопоставлении результатов измерений с результатами решения уравнения теплопроводности. Для применения метода требуются измерения температуры на трех и более глубинах, причем временные зависимости температуры для самой малой и самой большой глубины используются в качестве граничных условий, а данные для промежуточных глубин сопоставляются с результатами решения уравнения теплопроводности. Коэффициенты теплоемкости и теплопроводности считаются кусочно-постоянными и их значения на каждом интервале выбираются такими, чтобы суммарное квадратичное отклонение расчетных результатов от измерений было минимальным. Суммарное квадратичное отклонение наиболее чувствительно к величинам коэффициентов температуропроводности, поэтому именно этот параметр следует считать определенным наиболее надежно.

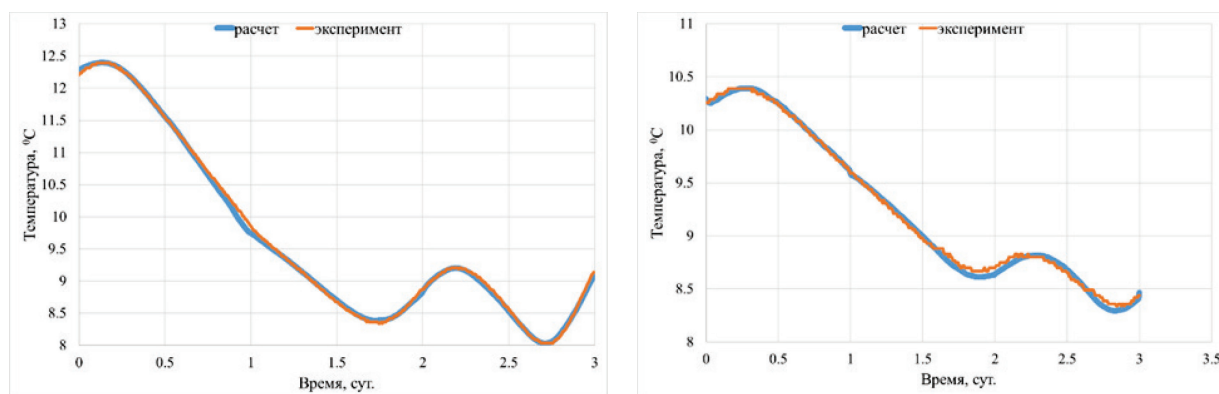


Рис. 1. Расчетная и измеренная температура на глубине 20 см. Слева: участок с восстанавливающей растительностью, справа: минерализованный участок

Пример результатов расчетов приведен на рис. 1. Измерения температуры для данных расчетов получены для двух участков нарушенного грубогумусового криозема, на одном из которых верхний горизонт почвы имеет восстанавливающую растительность (слева), а на другом – минерализован (справа). В результате расчетов определены коэффициенты температуропроводности, для обоих участков близкие к постоянным $\approx 0,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ на глубинах от 10 до 30 см. Рассчитанное по этим данным значение влагосодержания близко к измеренному в ходе анализа проб.

Исследования выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007/>, Красноярского краевого фонда науки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johansen, O. Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1975. (CRREL draft transl. 637, 1977) ADA 044002. – P. 291
2. Karashbayeva, Z., Berger, J., Orlande, H. R. B., Rysbaiuly, B. Estimation of ground thermal diffusivity using the conjugate gradient method with adjoint problem formulation // Urban Climate. – 2023. – № 52, 101676. – DOI 10.1016/j.uclim.2023.101676.

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СМЕРЗАНИЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Попов В. И.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт горного дела Севера имени Н. В. Черского СО РАН, Якутск)

Радикальным способом предотвращения смерзания влажных сыпучих материалов является предварительное их обезвоживание до уровня безопасной влажности, индивидуальной для каждого материала. К сожалению, этот процесс в широком применении энергетически не выгоден и экономически приводит к большим затратам. Широко распространены различные профилактические мероприятия по борьбе со смерзаемостью, цель которых предупредить смерзание и обеспечить сохранение сыпучести мерзлого груза [1–3]. Используются различные гидрофильные и гидрофобные препараты: первые связывают влагу материала в своем объеме, вторые создают на поверхностях раздела покрытия, препятствующие смерзанию. Широко применяются физические и механические способы борьбы со смерзаемостью. К первым относят замораживание материала груза, которое снижает содержание жидкой фазы воды, а последующее разрушение промерзшей корки классифицируют как механический способ.

Наиболее рациональны профилактические меры заключающиеся в снижении влажности груза путём заморозки перед погрузкой с последующим механическим рыхлением (пересыпанием).

Постановка задачи

Таким образом складывается следующая картина подготовки влажного сыпучего материала к складированию или последующей транспортировке. Влажный материал размещается в виде слоя фиксированной толщины на

площадке определенных размеров, исходя из плановых потребностей узла подготовки. Первоначально определяется время промерзания слоя заданной толщины размещенного на площадке под действием конвективного теплообмена со средой охлаждения T_{cp} на верхней поверхности слоя. Для простоты допускаем, что на нижней поверхности слоя материала теплообмен отсутствует и охлаждение происходит только с верхней поверхности.

Процесс промерзания слоя $(0, L)$ влажного сыпучего груза с начальной температурой $T_0 = 10^\circ\text{C}$ описывается системой двух параболических уравнений диффузионного переноса тепла и влаги [4].

1) Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L\rho \frac{\partial m}{\partial t}; \quad (1)$$

2) Уравнение переноса влаги:

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial m}{\partial t}. \quad (2)$$

Система уравнений замыкается уравнением состояния поровой влаги, определяющим зависимость фазового состояния от температуры и концентрации солей $m = m(T, C)$ [4]. Граничные условия обеспечивают отсутствие диффузионных потоков с обеих сторон слоя для уравнения переноса влаги, конвективное охлаждение с верхней стороны слоя и теплоизоляцию с другой стороны.

Суть предлагаемого подхода подготовки смерзающихся сыпучих грузов к складированию и транспортировке заключается в процедуре выбора оптимального момента применения операции рыхления (перемешивания) промораживаемого слоя влажного материала [5]. При этом происходит процесс интенсификации конвективного теплообмена на поверхности слоя материала, а средняя температура слоя после перемешивания соответствует диапазону окончания в нем интенсивных фазовых переходов. Выбор оптимального момента применения операции рыхления определяется из имитационного анализа поведения целевой функции, представляющей разность квадратов температур среды охлаждения T_{cp} и температур груза T_i по толщине слоя. В качестве целевой функции, отражающей степень завершенности процесса промерзания слоя при температуре среды охлаждения равной T_{cp} введем функцию:

$$B = \sum_{i=1}^{i=N} (T_{cp}^2 - T_i^2),$$

где индекс i обозначает суммирование по узловым значениям температуры.

Алгоритм оптимизации профилактических действий в рамках метода динамического программирования [5] сводится к следующим операциям.

1. Решается задача теплопроводности и диффузии влаги в слое груза при замерзании. Определяется время достижения температуры нижней границы слоя равной $-0,5^{\circ}\text{C}$. Это будет время $T_{\text{зам1}}$ промерзания слоя при чистой теплопроводности без применения процедуры рыхления (перемешивания). Время достижения температуры нижней границы слоя значений, равных $-0,5^{\circ}\text{C}$, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Время промораживания $T_{\text{зам1}}$ (час) без перемешивания

Толщина слоя, м	Температура среды, $^{\circ}\text{C}$			
	-10	-20	-30	-40
0,1	30,1	18,6	13,7	11,2
0,2	110	67,2	50,4	41,3
0,3	241	147	110	90,2
0,4	422	257	193	158

2. Вводится управляющее однократное воздействие, которое представляет процесс рыхления (перемешивания) слоя по вертикали. Затем в диапазоне времени 0, $T_{\text{зам1}}$ решается спектр задач по промораживанию слоя груза. При этом дискретно с шагом h_T для каждой задачи в интервале $[0, T_{\text{зам1}}]$ меняется время приложения управляющего воздействия $T_y = T_y + h_T$. В расчетах принято $h_T = 1$ час.

3. На основе анализа значений целевой функции определяется оптимальное время приложения воздействия, которое приводит к ускорению процесса промерзания.

Результатами расчетов установлено, что при конкретном значении температуры среды -20°C и толщине подготовленного к проморозке слоя, равного 0,2 м, оптимальное время для однократного перемешивания начинается с момента процесса, равного 14 часам, когда примерно 33 % толщины слоя будет иметь отрицательную температуру в диапазоне $[T_{\text{ср}}, -0,5^{\circ}\text{C}]$.

Таблица 2. Полное время промораживания слоя с перемешиванием

Толщина слоя, м	Температура среды, $^{\circ}\text{C}$			
	-10	-20	-30	-40
0,1	15,2	20,7	15,1	5,2
0,2	46,2	27,8	21,1	15,9
0,3	92,2	49,2	37,7	32,5
0,4	147,7	89,5	64,4	55,4

Выводы. Разработан и представлен алгоритм решения задач ускоренного промораживания слоя горной породы с использованием управляющего воздействия (перемешивание, рыхление), отличающийся сокращением времени промораживания в два-три раза (таблица 2) по сравнению с процессом естественного промораживания (таблица 1), обеспечивающий сохранение сыпучих свойств материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маталасов, С. Ф. Борьба со смерзаемостью металлургического сырья при перевозке по железным дорогам / С. Ф. Маталасов. – М. : Металлургия, 1974. – 248 с.
2. Кожевников, Н. Н. Прогнозирование процессов промерзания в сыпучих материалах при железнодорожных перевозках / Н. Н. Кожевников, В. И. Попов. – Новосибирск : Наука, 1978.
3. Смерзаемость насыпных грузов. – Текст : электронный // Энциклопедия машиностроения. XXL : сайт. – URL: <https://mash-xxl.info/info/220713/> (дата обращения 13.11.2025).
4. Попов, В. И. Приближенный метод решения задач тепломассопереноса при замерзании влаги в горных породах криолитозоны / В. И. Попов, А. С. Курилко // ГИАБ. – 2018. – № 12. – С. 57–64. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-12-0-57-64.
5. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман ; пер. с англ. И. М. Андреевой и др.; под общ. ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Попов С. Н.¹, Федоров Ю. Ю.¹, Унжаков А. С.²

¹(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск)

²(Публичное акционерное общество «Якутскэнерго», Якутск)

В последние годы практика эксплуатации линий электропередач на территории Якутии показывает интенсификацию выпучивания опор из грунта повышенной влажности. Основной причиной наблюдающихся процессов является потепление климата и связанное с ним увеличение толщины сезонного протаивания грунта, обуславливающее повышение размеров его объемного расширения при замерзании влаги, содержащейся в грунте в осенне-зимний период. Например, в г. Якутске это явление особенно заметно для стальных опор уличного освещения. В связи с высокой теплопроводностью металла ореол протаивания грунта у них существенно выше, чем у железобетонных или деревянных. В результате этого выпучивание стальных опор при установке в грунтах с повышенной

влажностью может достигать 8–10 см в течение одного года. На фотографии (см. рис.1) представлены основания стальной опоры, выпученной на 90 см в течение восьмилетней эксплуатации. С учетом того, что заглубление опор уличного освещения не превышает трех метров, при сохранении темпов выпучивания срок их службы может не превысить 15 лет и потребуются значительные затраты для восстановления их работоспособности.



Рис. 1. Выпученная стальная опора уличного освещения в г. Якутске

Анализ известной научно-технической и патентной информации показывает, что для снижения выпучиваемости опор линий электропередач из грунта предлагается, как правило, два подхода. Во-первых, нанесение на подземную часть основания криофобного покрытия, понижающего адгезию примерзания влажного грунта к опоре в слое сезонного протаивания. Такой способ позволяет уменьшить величину касательных сил морозного пучения. Во-вторых, в некоторых патентах предлагается повышать сцепление основания опоры с грунтом ниже слоя сезонного протаивания с использованием различных технологических способов.

Например, в патенте [1] в зоне сезонного протаивания предлагается поверхность основания опоры покрывать термоусаживающимся полимерным рукавом. Полимерные материалы типа полиэтилена характеризуются высокими криофобными свойствами, что может в значительной мере обеспечить снижение выпучиваемости опор из грунта. Недостатком такого рода покрытий является технологическая сложность их реализации в полевых условиях и возможность разрушения при транспортировке.

Более сложным и дорогостоящим является техническое решение, предлагаемое в патенте [2], в котором верхняя часть основания опоры, расположенная в зоне сезонного протаивания выполнена в виде монолитного

блока из несмерзающего с грунтом полимера, а нижняя часть имеет форму решетчатого каркаса. Объединение в одном конструктивном оформлении двух подходов к решению проблемы выпучиваемости является наиболее эффективным, однако реализация рассмотренного предложения в широких масштабах весьма затруднительна.

Наиболее предпочтительными для снижения выпучиваемости опор из грунта, на наш взгляд, являются способы, сочетающие применение полимерных покрытий (типа лакокрасочных) в верхней части оснований с простейшими механическими сцепляющими с грунтом устройствами в нижней части.

В качестве полимерного криофобного покрытия [3] можно использовать, например, покрытия на эпоксидной основе, предлагаемые Уральским заводом полимерных технологий «Маяк» типа ПСПП «Reline» по ТУ 20.30.12-001-75457705-2018, качественное нанесение которых возможно, как ручными, так и механизированными способами.

Механическое зацепление нижних частей оснований опор можно предусмотреть с использованием технических решений, достаточно подробно представленных в описаниях патентов [4, 5]. Для опор трубчатой конструкции с использованием стальных или стеклопластиковых труб предлагается ниже границы максимально возможного сезонного протаивания в стенках закреплять в шахматном порядке стальные шпильки, выступающие за внешние пределы труб на ширину зазоров между опорой и котлованом [4] (см. рис. 2).

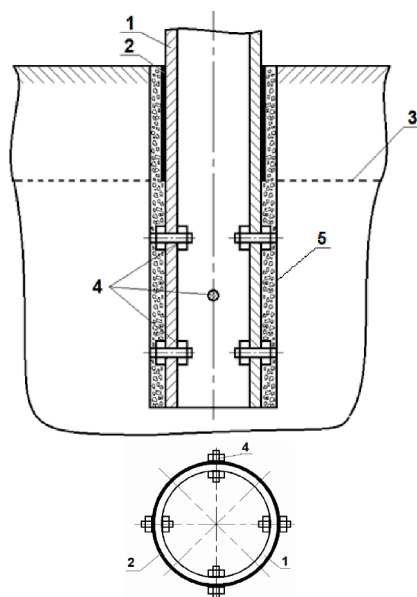


Рис. 2. Опора по патенту [4]. 1 – стойка; 2 – покрытие; 3 – слой протаивания; 4 – шпилька; 5 – грунт

После заполнения котлована грунтом шпильки в него вмерзают и фиксируют положение основания, затрудняя его вертикальные перемещения.

Для железобетонных опор прямоугольного и трапециевидного сечения возможно ниже слоя сезонного протаивания по их внешнему периметру устанавливать стяжные хомуты в виде ребер, соединения деталей которых расположены по боковым сторонам [5] (см. рис. 3).

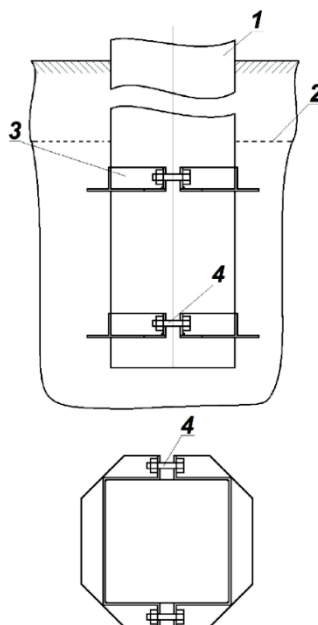


Рис. 3. Опора по патенту [5]. 1 – опора бетонная; 2 – слой протаивания; 3 – хомут; 4 – стяжка

Описанные технические решения отличаются простотой конструктивного оформления и значительно более широкими возможностями практической реализации. Испытания разработанных конструкций на стендах и в эксплуатационных условиях планируются начать в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 89541 Российская Федерация, МПК E02D 5/60 (2006.01), E02D 27/35 (2006.01). Противопучинная свая и покрытие для нее : № 2009132336/22 : заявл. 26.08.2009 : опубл. 10.12.2009, бюл. № 34 / Алявдин Д. В., Малюшин Н. А.: заявитель и патентообладатель Д. В. Алявдин, Н. А. Малюшин. – 2 с.
2. Патент 2054093 Российская Федерация. МПК E02D 27/35 (1995.01), E02D 31/14 (1995.01). Фундамент опоры : № 93003692 /33, заявл. 28.01.1993 : опубл. 10.02.1996, бюл. № 4. / А. Л. Лязгин, А. П. Осипов, С. В. Остробродов [и др.] : заявители и патентообладатели А. Л. Лязгин, А. П. Осипов, С. В. Остробродов [и др.].
3. Уральский завод технологий полимеров : официальный сайт. – Текст : электронный. – URL: [http: polymerpro.ru](http://polymerpro.ru) (дата обращения 13.11.2025).
4. Патент 217853 Российская Федерация, МПК E04H 12/00 (2006.01). Опора линии электропередачи : № 2022129786 : заявл. 17.11.2022. : опубл. 21.04.2023, бюл. № 12 /

Попов С. Н., Федоров Ю. Ю., Унжаков А. С. ; заявитель и патентообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН. – 6 с.

5. Патент 215710 Российская Федерация, E04H 12/02 (2006.01), E02D 27/42 (2006.01). Противопучинная опора линии электропередачи : № 2022129787 : заявл. 17.11.2022 : опубл. 22.12.2022 : бюл. № 36 / Попов С. Н., Федоров Ю. Ю., Унжаков А. С. ; заявитель и патентообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН. – 5 с.

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Семенов В. П., Мисайлов И. Е.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Якутская алмазоносная провинция – крупнейшая алмазоносная провинция в стране по разведанным запасам. Она расположена в северо-восточной части Сибирской платформы, в западной части Якутии, в бассейнах рек Вилюй, Муна, Оленек и др., занимая площадь около 1 млн км². Включает в себя Центральносибирскую и Лено-Анабарскую алмазоносные субпровинции.

В разные годы, начиная с конца 1950-х годов, геокриологическими и гидрогеологическими проблемами алмазоносной провинции занимались, привлекаемые производственными организациями (в н. в. – АК «АЛРОСА») различные научно-исследовательские академические организации, такие как Институт мерзлотоведения СО РАН, Институт Земной коры СО РАН, ООО «Геостройпроект», Институт химии нефти СО РАН и др. В результате выполнения этих исследований было выявлено сложное вертикальное строение мерзлой толщи. По характеру льдораспределения ее подразделили на два горизонта: верхний – собственно многолетнемерзлая толща мощностью 200–300 м, содержащая воду в виде льда, и нижний (охлажденный) – насыщенный криопэгами [1–3].

В геотермическом же плане рассматриваемая территория изучена неравномерно. Более детально исследованы Ботубинская седловина и южный склон Анабарской антеклизы, в пределах которых в течение последних 50 лет ведется освоение коренных месторождений алмазов: трубки «Мир», «Интернациональная», «Айхал», «Сытыканская», «Юбилейная», «Удачная», «Зарница» и другие.

С 2022 г. сотрудниками Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в рамках сотрудничества с Институтом «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО) проводятся комплексные региональные геотермические исследования рассматриваемой территории,

целью которых является исследование и оценка современного состояния геотемпературных полей криолитозоны Якутской алмазоносной провинции.

На данный момент комплексные геотермические исследования выполнены в трех алмазоносных районах: Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Далдыно-Алакитском. По полученным данным составлены сводные температурные кривые по отдельным районам (рис.1).

В ходе проведения геотермических исследований получены новые данные и выявлены особенности современного геотемпературного поля и криолитозоны рассматриваемой территории. В характере температурных кривых в интервале отрицательных значений температур отмечаются 3 области с различным знаком и значением геотермического градиента: 1 – область с отрицательным градиентом; 2 – безградиентная или слабоградиентная область; 3 – область с положительным градиентом в интервале отрицательных значений температуры горных пород.

Установлена неоднородность геотемпературных полей криолитозоны, обусловленная сложностью природно-климатических условий, структурно-тектоническим строением, разностью состава и свойств горных пород, слагающих регион. Температура пород на подошве слоя годовых теплооборотов изменяется от положительных значений (+0,4) до $-6,4^{\circ}\text{C}$, при этом минимальные значения температуры фиксируются в интервале глубин 50–280 метров.

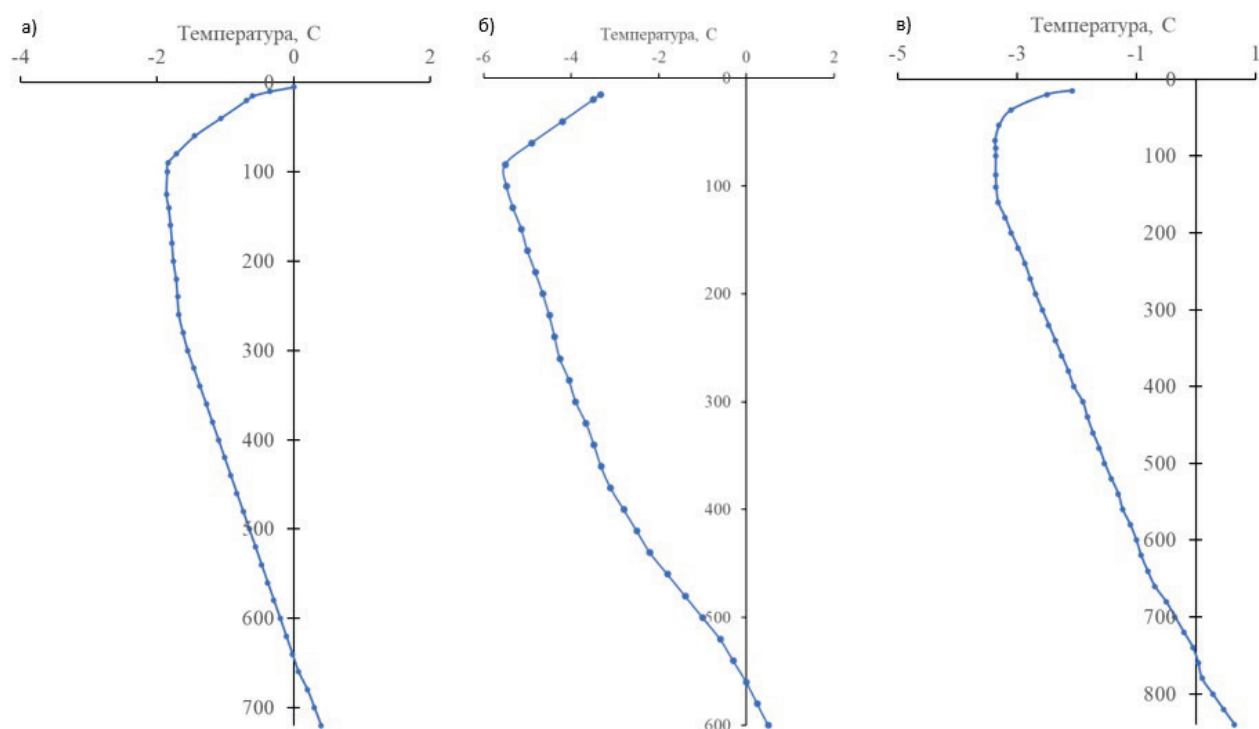


Рис. 1. Графики сводных температурных кривых глубоких горизонтов. Алмазоносные районы: а) – Мало-Ботуобинский; б) – Далдыно-Алакитский; в) – Средне-Мархинский

Проведенная региональная оценка повышения температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов (15 метров) показала значения от 1,0 до 2,0 °С, что согласуется с фактическими данными, полученными по скважинам Далдыно-Алакитского района (месторождение трубка «Удачная»), где за период с 1990-х по 2024 гг. она повысилась на 1,2–2,2 °С. Наблюдаемый процесс формирования отрицательного градиента температуры горных пород в верхних горизонтах литосферы на наш взгляд обусловлен наложением техногенного фактора на глобальное изменение климата.

Криолитозона региона имеет сложное вертикальное строение, осложнена наличием высокоминерализованных меж- и подмерзлотных вод (рассолов). Оцененная и установленная современная мощность в пределах исследуемого региона изменяется в широких пределах от 400 до 800 метров. Мощность же многолетнемерзлой толщи варьирует от 100 до 650 метров, и повсеместно контролируется кровлями подмерзлотных водоносных комплексов с высокоминерализованными водами (рассолами).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов, А. И. Гидрогеологические особенности района месторождения алмазов трубки «Мир» в юго-западной Якутии / А. И. Ефимов // Труды II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. – Вып. II. – Иркутск, 1959. – С. 79–87.
2. Ломоносов, И. С. Вертикальная гидрогеохимическая зональность в районе месторождения алмазов трубки «Мир» / И. С. Ломоносов // Труды Восточно-Сибирского ин-та СО АН СССР. Серия геол. – 1962. – Вып. 9. – С. 103–117.
3. Устинова, З. Г. Особенности мерзлотно-гидрогеологических условий алмазного месторождения трубки «Удачная» / З. Г. Устинова // III совещание по подз. водам и инженерной геологии Сибири и Дальнего Востока: тезисы докл. – Вып. 2. – Иркутск, 1961. – С. 108–109.

ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В Г. ЯКУТСКЕ И РЕАЛИИ

Скачков Ю. Б.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Главной энергетической характеристикой климата является температура воздуха. Прогнозы изменения среднегодовой температуры воздуха в Якутске в институте мерзлотоведения производились трижды за последнюю четверть века.

Первый прогноз был сделан еще в конце прошлого века [1]. Для анализа использовался многолетний ряд наблюдений температуры воздуха в г. Якутске с 1829 г. Данные брались с сайта ГУ «ВНИИГМИ – МЦД»

(ГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных») [2].

«Спрогнозировать динамику среднегодовой температуры воздуха (1 °С) можно с помощью методов гармонического анализа, имея достаточно длительный для этих целей ряд натурных наблюдений и предполагая существование в природе ряда разнопериодных колебаний, обусловленных различными причинами и характеризующихся определёнными периодами (T , годы), амплитудами (A , °С) и сдвигами фаз (φ , годы). В общем виде непрерывная кривая хода $t(\tau)$ является результатом сложения выделенных при этом элементарных гармоник и описывается уравнением:

$$t(\tau) = t_0 + \sum A_i \sin \omega_i (\tau - \tau_0 + \varphi_i), \quad (1)$$

где t_0 – свободный член уравнения, численно равный средней за период наблюдений температуре воздуха, °С; $\omega_j = 2/T_j$; $\tau_0 = \tau_1 - 1$; τ_1 – год начала наблюдений; τ – год, за который производится расчёт $t(\tau)$. Этот метод позволяет выявить общую закономерность изменения температуры воздуха за исследуемый отрезок времени, а также, в соответствии с возможностями метода с определённой погрешностью, спрогнозировать её ход на 1/3 этого отрезка как вперёд (перспективный анализ), так и назад (ретроспективный анализ) [1].

Итогом гармонического анализа стала расчётная температурная кривая, которая позволила представить изменение температуры воздуха как в прошлом, так и в будущем. Для последнего показаны период потепления до 2020 г. (средняя за этот период, начиная с 1990 г., температура воздуха в Якутске составляет –8,3 °С, что выше средней многолетней на 1,7 °С) и период похолодания, приходящийся на 2040–2060 гг., по средней температуре почти на 0,5 °С ниже таковой периода похолодания, отмеченного в 50–70-е гг. двадцатого столетия (рис. 1).

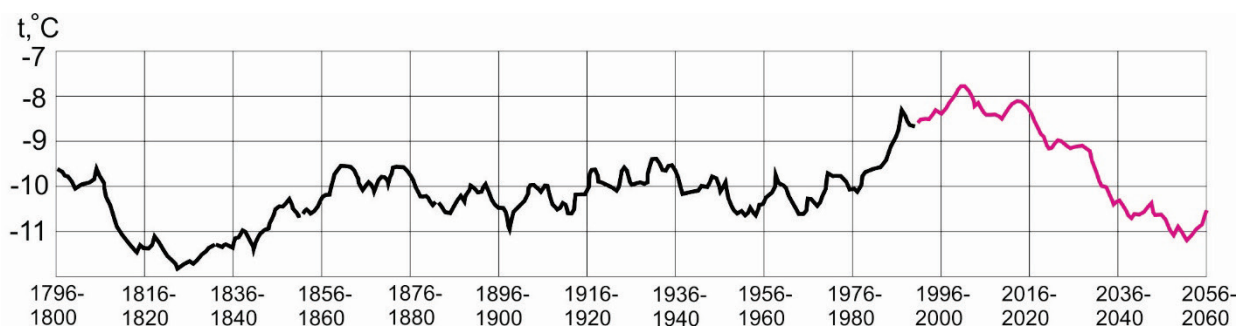


Рис. 1. Кривая хода средних пятилетних скользящих температур воздуха в г. Якутске: черная линия – по данным натурных измерений, красная линия – прогноз

Определяющими колебаниями климата в Якутске, как и на всей территории Центральной Якутии, являются естественноисторические колебания его с периодами 300, 110, 75 и 14 лет. Анализ полученных данных в целом склоняет авторов к выводу об обусловленности колебаний климата природными причинами, о практическом отсутствии влияния на его изменение факторов антропогенного происхождения.

В работе следующих авторов [3] также с помощью метода гармонического анализа изучены закономерности изменения во времени температуры воздуха и мерзлых пород в г. Якутске за предыдущие 200 лет наблюдений. Выявлены три гармонические функции, которые обобщенно описывают этот температурный ряд. С их помощью составлена формула для расчета хода температуры во времени и сделан прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 г.

Авторы утверждают, что ход температуры в будущем (после 2008 г.) можно достаточно хорошо описывать формулой 2:

$$T = A_1 \cos\left(2\pi \frac{t-2008}{P_1}\right) + A_2 \cos\left(2\pi \frac{t-2008}{P_2}\right) + A_3 \cos\left(2\pi \frac{t-2008}{P_3}\right) - A_4 \cos\left(2\pi \frac{t-2008}{P_4}\right) - 10, \quad (2)$$

где $A_1 = 0,63^\circ$, $A_2 = 0,67^\circ$, $A_3 = 0,67^\circ$, $A_4 = 0,25^\circ$ – амплитуды гармоник, $P_1 = 300$ лет, $P_2 = 110$ лет, $P_3 = 75$ лет, $P_4 = 14$ лет – периоды гармоник, t – дата, на которую рассчитывается температура (годы).

Результаты анализа указывают на окончание потепления в 2005–2017 гг., когда температура достигнет $-8,0^\circ\text{C}$. После этого, вплоть до 2054 г., будет наблюдаться интенсивное понижение температуры до -11°C , которое сменит очередной период потепления до 2088–2098 гг., когда температура поднимется до $-8,5$ ч $-9,0^\circ\text{C}$. Следующее столетие будет характеризоваться относительным постоянством температуры, но к его концу она понизится до $-11,5^\circ\text{C}$. Это будет самая низкая температура, начиная с 1900 г.

Третий прогноз был представлен в работе [4]. Потепление в г. Якутске будет продолжаться с выходом на максимальный уровень (минус $7,5^\circ\text{C}$) в 2015 г. После этого, начиная с 2020 г., начнется монотонное понижение температуры воздуха. На конец прогнозного периода оно достигнет уровня минус $9,5^\circ\text{C}$.

По мнению авторов, вероятнее всего, перелом в сторону длительного и сурового похолодания климата начнется в Якутии, где-то с середины 50-60-х годов текущего века и достигнет температурного минимума в начале следующего века (рис. 2).

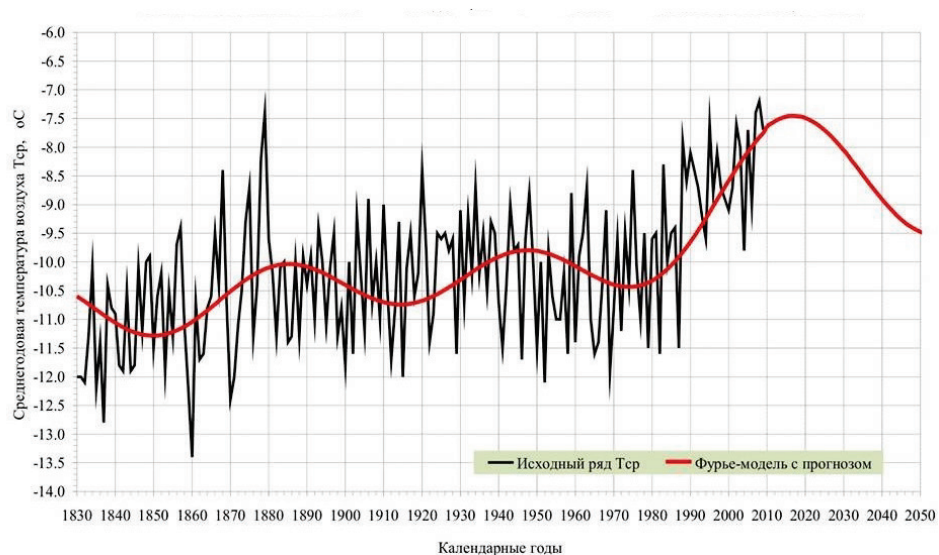


Рис. 2. График исходного температурного ряда $T_{вз}$ и его Фурье-модели с прогнозом до 2050 г.: а – сглаженная модель в 10-летнем окне осреднения; б – с фильтрацией периодических составляющих длительностью более 60 лет

А что же происходит в действительности? Потепление климата в Якутске продолжается. Об этом наглядно свидетельствует рис. 3. Средняя температура воздуха за последнее десятилетие (2015–2024 гг.) составила $-7,0^{\circ}\text{C}$. В 2020 г. установлен абсолютный рекорд среднегодовой температуры воздуха за всю историю метеонаблюдений в г. Якутске – минус $5,9^{\circ}\text{C}$, при норме $-8,0^{\circ}\text{C}$ (1991–2020 гг.).

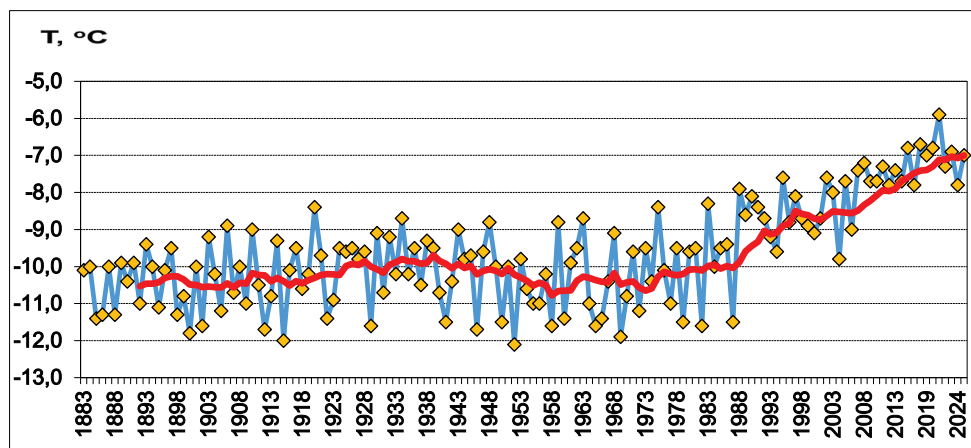


Рис. 3. Многолетняя изменчивость среднегодовой температура воздуха в г. Якутске, $^{\circ}\text{C}$. Красная линия – скользящая десятилетняя средняя

ЛИТЕРАТУРА

1. Шендер, Н. И. Прогноз естественноисторических колебаний климата городов Якутска и Фэрбенкса / Н. И. Шендер, В. Е. Романовский, А. С. Тетельбаум // Наука и образование. – 1999. – № 2. – С. 24–29.

2. Специализированные массивы метеорологических данных. – Текст : электронный // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных : официальный сайт. – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 13.11.2025).
3. Балобаев, В. Т. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 года / В. Т. Балобаев, Ю. Б. Скачков, Н. И. Шендер // География и природные ресурсы. – 2009. – № 2. – С. 50–56.
4. Нерадовский, Л. Г. Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г. / Л. Г. Нерадовский, Ю. Б. Скачков // Проблемы инженерного мерзлотоведения : материалы IX Международного симпозиума, Мирный, 3–7 сентября 2011 г. – Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – С. 389–393.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ НА УЧАСТКЕ 148 КМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «КОЛЫМА»

Сыромятников И. И., Литовко А. В., Кириллин А. Р., Шапошников Г. И., Смирнов Ю.
(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

В условиях интенсификации процессов глобального потепления климата приоритетной задачей современной науки являются оценка и прогноз темпов их развития на базе многолетних наблюдений [1]. В последние десятилетия на территории Центральной Якутии отмечается значительное изменение климата и его влияние на устойчивость природно-техногенных комплексов [2]. Как известно, повышение среднегодовой температуры воздуха и среднегодовой суммы осадков приводит к активизации криогенных процессов и ускорению темпов деградации многолетнемерзлых грунтов основания инженерных сооружений, вследствие чего происходит снижение их устойчивости и возникновение аварийных ситуаций на объектах инфраструктуры в области криолитозоны [3].

В современном мире автомобильные дороги являются одним из важнейших объектов инфраструктуры, которые имеют значительное влияние на развитие и жизнедеятельность любого региона страны. В северных и арктических регионах безопасная эксплуатация автомобильных дорог значительно осложняется деформациями земляного полотна по причине деградации мерзлых грунтов основания и активизации опасных криогенных процессов [4]. Как показывает опыт, в области распространения многолетнемерзлых грунтов деформации на автомобильных дорогах в основном проявляются в виде просадок и расползания земляного полотна, морозного растрескивания и пучения дорожного полотна, а также разрушений откосов под действием термоденудации.

Для мониторинга за температурным режимом насыпи и грунтов основания был выбран участок на 147–148 км федеральной автомобильной

дороге «Колыма». Рассматриваемая автодорога относится к IV категории и на участке имеет асфальтобетонное покрытие. Здесь основной ландшафтной единицей является межаласный тип местности с широким развитием пород ледового комплекса [5, 6]. Эти породы характеризуются высоким содержанием залежеобразующих и текстурообразующих подземных льдов, которые на этом участке служат в качестве грунтов основания земляного полотна автодороги.

В ходе эксплуатации и содержания автомобильной дороги было выявлено, что на этом участке часто проявляются просадки земляного полотна, вследствие вытаивания подземных льдов. По данным бурения, верхняя часть инженерно-геологического разреза представлена слабльдистыми пылеватыми супесями светло-коричневого цвета мощностью 1–2 м. Под этим горизонтом до глубины 12–15 м залегают темно-серые льдистые суглинки с линзовидной и слоистой криотекстурой. В нижней части разреза были вскрыты слабльдистые мелкозернистые пески серого цвета.

По данным метеостанции, установленной на участке мониторинга, величина амплитуды колебаний температуры воздуха за период наблюдения (26.10.2022–29.06.2023 гг.) имела значение 90,2 °С (рис. 1). При этом минимальная температура –55,8 °С была зафиксирована 15 января, а 27 июня была отмечена максимальная температура +34,4 °С. Толщина снежного покрова в середине марта на полосе отвода изменялась в пределах 45–50 см, а на откосах земляного полотна достигала 60 см.

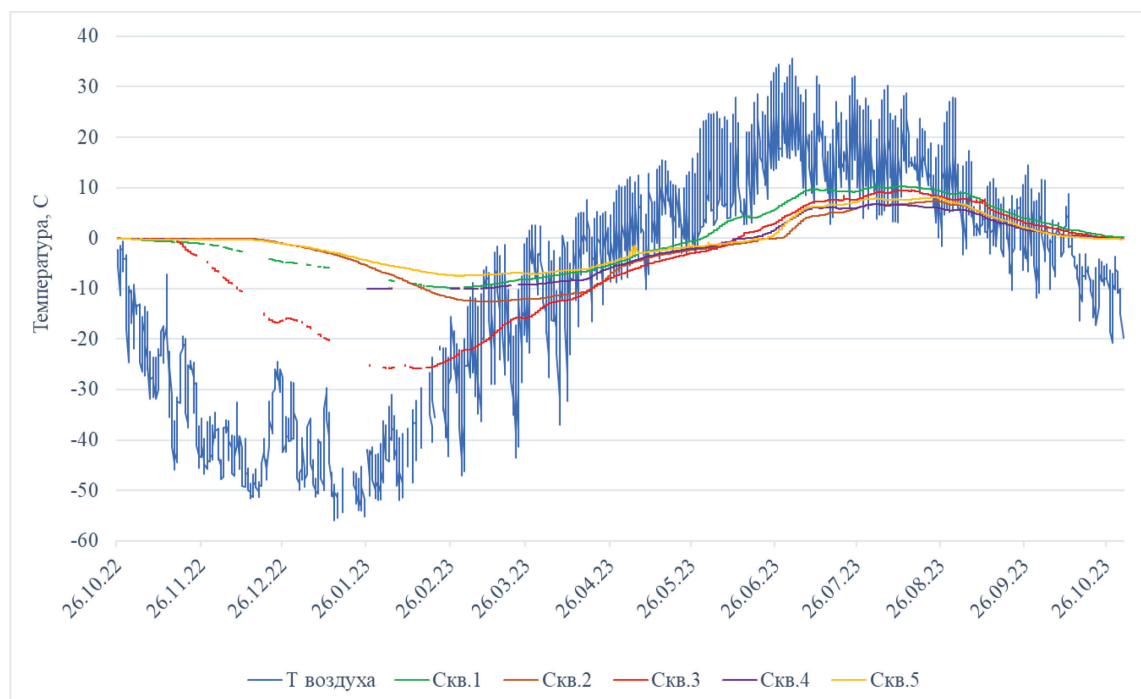


Рис. 1. Динамика изменение температуры воздуха и грунтов на глубине 1 м (расположение скважин: скв. 1 и скв. 5 – на полосе отвода; скв. 2 и скв. 4 – на откосе насыпи; скв. 3 – на оси автодороги)

В результате геотермических измерений выявлено, что наибольшая амплитуда колебаний (от $+12,1$ до $-44,6$ °С) температуры на поверхности наблюдается в скв. 3, которая расположена на оси автомобильной дороги. При этом в скв. 5, которая находится на полосе отвода за период наблюдения температура на поверхности изменялась от $+9,2$ до $-13,8$ °С.

Ход изменения температурного поля со временем по буровому профилю показывает, что в зимний период охлаждение грунтов основания земляного полотна происходит более интенсивно по сравнению с полосой отвода, где снежный покров играет роль теплоизолятора. В октябре под земляным полотном на глубине 9–12 м еще остается мерзлотное ядро с температурой грунтов около -4 °С (рис. 2а). С начала декабря и до конца марта происходит интенсивное поступление холода с поверхности в грунты основания (рис. 2б, 2в). В конце марта в скв. 3 температура грунтов на глубинах: 1; 3; 6 и 10 м достигают значений -14 ; -11 ; -5 и $-3,5$ °С соответственно. В этот период температура грунтов в скв. 5 на тех же глубинах имеет следующие значения: -7 ; $-2,5$; -2 и $-2,8$ °С.

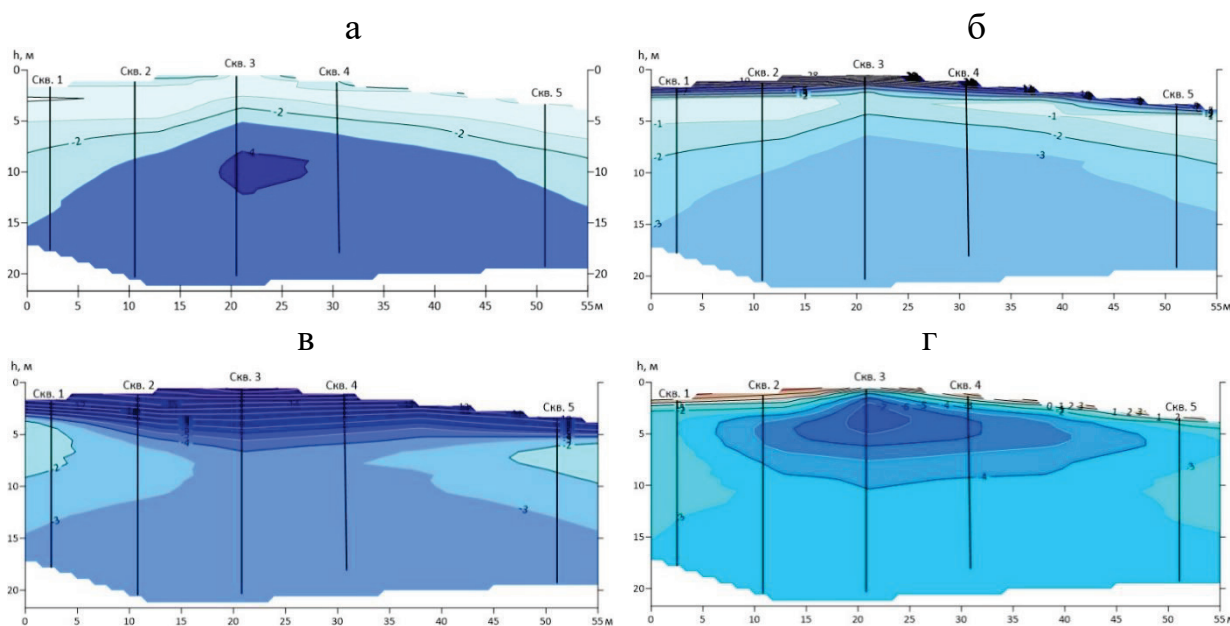


Рис. 2. Ход изменения температурного поля со временем по буровому профилю: а – 15.10.2022 г.; б – 15.12.2022 г.; в – 15.03.2023 г.; г – 15.05.2023 г.

Начиная с конца апреля происходит протаивание мерзлых грунтов с поверхности. В середине мая глубина сезонного протаивания под дорожным покрытием достигла до 0,7–0,8 м, а на полосе отвода – около 0,5 м (рис. 2г).

Предварительные результаты геотехнического мониторинга показали, что в пределах участка наблюдений на формирование температурного режима грунтов основания автодороги существенное влияние оказывает снежный

покров. Регулярная уборка снега с поверхности асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги способствует интенсивному промерзанию земляного полотна и грунтов основания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малкова, Г. В. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата / Г. В. Малкова, А. В. Павлов, Ю. Б. Скачков // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 4. – С. 33–36.
2. Варламов, С. П. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии / С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрябин. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2021. – 156 с.
3. Сыромятников, И. И. Особенности динамики температуры грунтов на территории г. Якутска / И. И. Сыромятников, И. В. Дорофеев // Наука и образование. – 2014. – № 4 (76). – С. 42–45.
4. Гребенец, В. И. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск-Талнах и методы борьбы с ними / В. И. Гребенец, В. А. Исаков // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 69–77.
5. Соловьев, П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П. А. Соловьев. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 143 с.
6. Иванов, М. С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины / М. С. Иванов. – Новосибирск : Наука, 1984. – 125 с.

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Тихонова С. А., Шеин Н. С., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск)

Первостепенное значение в контексте обеспечения надежности трубопроводных систем приобретает проблематика трансформации состояния многолетнемерзлых грунтов, выступающих в качестве основания для инженерных сооружений.

Вопросы прогнозирования и оценки работоспособности подземных магистральных трубопроводов (МТ) в условиях вечной мерзлоты являются одним из ключевых направлений современных научных исследований, так как сбои в работе таких систем могут критически повлиять на безопасность целых регионов [1, 2].

В области геоинформационных систем метод аналитической иерархии применяется для расчета весов, присваиваемых слоям пространственных данных, которые служат критериями для создания карт. Ключевым этапом в оценке риска развития термокарста является выбор предикторов. Факторы,

способствующие образованию термокарста, были выявлены по обзору научной литературы, анализу результатов предыдущих исследований авторов и экспертные оценки. Критерием оценки опасности участка МТ в данной постановке является степень опасности возникновения и развития термокарста (ТК).

Для создания предикторов в виде тематических растров использовались данные дистанционного зондирования, полученные из открытых источников: Landsat 8, Sentinel 1 и Sentinel 2. Растровые предикторы (льдистость, грунты, расстояние от газопровода, талые/мерзлые грунты, индекс AWEI, уклон) были перераспределены по классам в зависимости от их воздействия на риск развития ТК. Оценка 1 была присвоена очень низкой категории, а 5 – очень высокой, что соответствует низкому и высокому уровням опасности образования термокарста. Обработка данных и их визуализация осуществлялись с применением ГИС на основе растровых данных.

Метод аналитической иерархии (МАИ), разработанный Томасом Саати [8] предназначен для анализа и решения сложных проблем, включающих разнородные данные или несколько критериев, путем приоритизации этих проблем. Суть этого подхода заключается в сравнении пар факторов, участвующих в принятии решений, расположенных в иерархической структуре с распределением весовых факторов. Предлагаемый метод дает возможность оценивать важность одного критерия по отношению к другому с использованием матрицы попарного сравнения. Данный подход применяется для расчета весов предикторов, представленных в формате растровых слоев пространственных данных, с целью создания комбинированных карт с помощью функции «взвешенного наложения» в ArcGIS.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее значимым предиктором был признан «расстояние от газопровода», которому был присвоен вес 0,25. Следующими по значимости предикторами оказались «льдистость» с весом 0,22 и индекс «AWEI». Слоям «грунты» и «уклон» были установлены веса 0,15 и 0,06 соответственно. Такому фактору как «талые/мерзлые грунты» – 0,1.

После определения весовых коэффициентов предикторов уровень риска рассчитывается путем суммирования, используя ГИС. Итогом применения МАИ и ГИС стала карта, показывающая уровни опасности наледообразования. По результатам анализа экспертных данных и специальной литературы выделены 5 рангов интенсивности воздействия ТК на инженерные сооружения: катастрофический – 5; высокий – 4; средний – 3; низкий – 2; очень низкий – 1.

Предложенный подход оценки геоэкологической опасности участков трубопровода на основе использования данных ДЗЗ, ГИС и метода анализа иерархий позволяет оценить уровень потенциальной опасности на разных участках трубопровода и выбрать приоритетные для проведения профилактических мер по снижению факторов риска. Состояние безопасности

объектов магистральных трубопроводов в мерзлых грунтах во многом определяется своевременным проведением необходимых инженерных мероприятий, позволяющих сократить вероятность возникновения аварий или уменьшить тяжесть их последствий. Однако данный подход является начальным этапом, так как взаимодействия подсистем природно-технической системы представляют собой сложный многофакторный процесс и требуют разработки моделей взаимного влияния природных процессов и технических систем друг с другом в динамике с учетом изменения характеристик геологической среды, климатических факторов и технологических режимов.

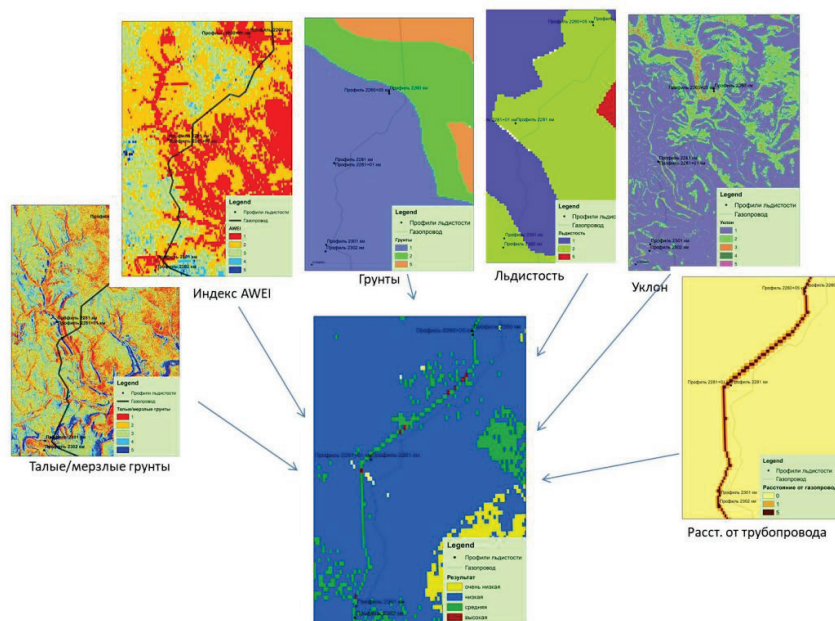


Рис. 1. Растры и результирующая карта опасности развития термокарста

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность газодобывающей отрасли / О. И. Слепцов, А. И. Левин, Г. П. Стручкова [и др.] // Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экономические и техногенные проблемы. – Новосибирск : Наука, 2008. – С. 249–257.
2. Исследование техногенных аварий и антропогенных воздействий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия) / О. И. Слепцов, А. В. Лыглаев, Т. А. Капитонова [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4. – С. 88–94.
3. Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Л. Саати ; пер. с англ. – М. : ЛКИ, 2008. – 360 с.
4. Родионова, Н. В. Использование радарных данных Sentinel 1 для идентификации талых/мерзлых почв в нескольких районах Арктической зоны России в 2017–2018 годах / Н. В. Родионова // Распространение радиоволн : труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. – 2019. – С. 310–314.
5. Родионова, Н. В. Обратное рассеяние от приповерхностного слоя талых/мерзлых почв Аляски по радарным данным Sentinel 1. / Н. В. Родионова //

Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ). – 2019. – 11 (1). – С. 21–30.

6. Mironov, V. L., Muzalevsky, K. V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra // Russian Phys. J. – 2013. – Vol. 55. – № 8. – P. 899–902.

7. Haralick, R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE. – 1979. – 67 (5). – P. 786–804.

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ В ОКОЛОСВАЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Турантаев Е. Е., Набережный А. Д.

(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Как правило, устройство свай в криолитозоне производится в период максимального промерзания грунта, т. е. с конца февраля по середину апреля. При этом сваи имеют начальную низкую отрицательную температуру, вследствие чего, при погружении в скважину на их поверхности образуется слой льда, снижающий удельные силы смерзания грунтового раствора со свай [2].

Для наблюдения за миграцией влаги в мёрзлых грунтах и грунтовых растворах были проведены экспериментальные исследования, включающие:

- наблюдения за температурным режимом раствора и вмещающего грунта;
- измерение продолжительности замерзания;
- определения влажности раствора и вмещающего грунта;
- определение прочности раствора.

Образцы были залиты в пенополистирольные коробки размером 580×440×240 мм. Коробку с песком (влажность 20 %) и подготовленной скважиной диаметром 180 мм в центре оставили на верхнем этаже подземной лаборатории при температуре воздуха –15 °С. Для имитации свай в скважине использовались бетонные кубики класса В25 размером 100×100×100 мм с начальной температурой –25 °С. После шоковой заморозки грунта в коробке образец переместили в другое помещение с температурой воздуха –3,5 °С. После стабилизации температуры в массиве песка в грунт установили бетонный куб и цементно-песчаный раствор. Раствор был замешан при комнатной температуре (+20 °С).

Для наблюдения за миграцией и изменением температуры грунта и цементно-песчаного раствора, в определенных участках была использована система автоматического мониторинга «САМ-Н». Система автоматического мониторинга «САМ-Н» предназначена для удалённой автономной регистрации и сбора данных с множества датчиков.

составляла 0,7 %, 1,5 % и 3,0 % от массы цемента. Оптимальное количество добавки – 0,7 % при температуре грунта от 0 °С до –5 °С.

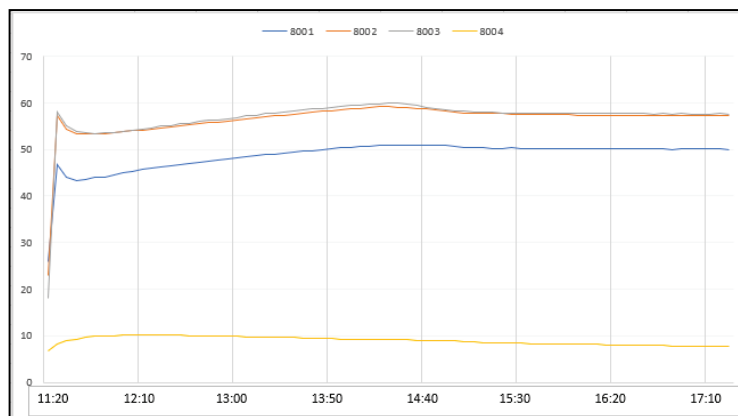


Рис. 4. Раствор с добавкой 0,7 %. Значение влажности от времени

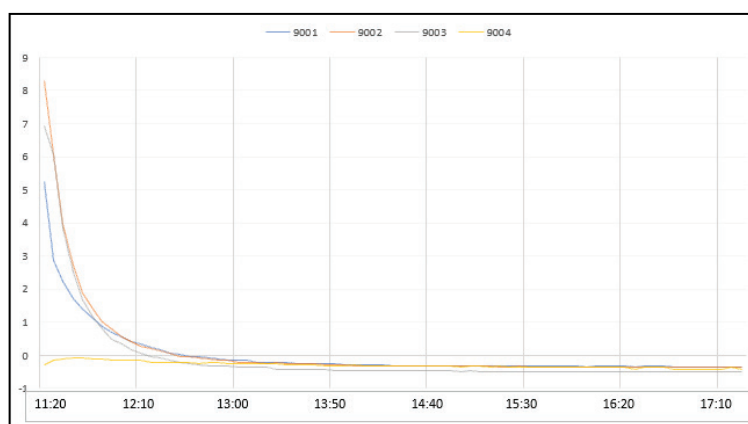


Рис. 5. Раствор с добавкой 0,7 %. Значение температуры от времени

Определили среднюю прочность растворов на сжатие на гидравлическом испытательном прессе. Средняя прочность раствора без добавки – 3,26 кгс/см², с добавкой 0,7 % – 2,91 кгс/см², с добавкой 1,5 % – 6,91 кгс/см², с добавкой 3,0 % – менее 0,5 кгс/см² [1].

С увеличением количества ускорителя твердения, увеличивается количество влаги, сохраняемой в растворе, при этом увеличивается скорость теплообмена раствора. В связи с этим раствор с избыточным количеством добавки теряет прочностные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 5802—2002. Растворы строительные. Методы испытаний.
2. Проектирование и устройство свайных фундаментов: учебное пособие для строит. вузов / Бельский, С. Б., Дикман, Л. Г., Косоруков, И. И. [и др.] – М. : Высш. шк., 1983. – 328 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ МЕРЗЛЫХ/ТАЛЫХ ГРУНТОВ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Шеин Н. С., Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Тарская Л. Е.

(ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск)

Оценка технического состояния магистральных трубопроводов (МТ), эксплуатируемых в условиях экстремального климата, проводится на регулярной основе с применением современных методов технической диагностики. Основной целью данного исследования является использование возможностей радиолокационных данных Sentinel-1 для: InSAR-мониторинга деформационных процессов [1–3] в термокарстовых ландшафтах в зонах прохождения магистральных трубопроводов; дифференциации талых и мерзлых грунтов [4–6] на участках развития термокарстовых процессов.

Мы рассматриваем участки с термокарстом с проходящим по нему магистральным трубопроводом. Для интерферометрической обработки были использованы радиолокационные снимки, полученные спутником Sentinel-1 при VV поляризации за период 2017–2018 годов в режиме интерферометрического широкополосного обзора (IW).

Для анализа радарных изображений использовалось программное обеспечение с открытым исходным кодом SNAP. Для обработки одной пары интерферометрических данных Sentinel-1 была выполнена следующая последовательность операций: TOPSAR сплит, точные орбиты, обратный геокодинг, интерферограмма, дебарст, некогерентное накопление, фильтр Голдстейна, развертка фазы, геокодирование фазы высот, корректировка по местности [7].

Для отображения результатов можно использовать любое программное обеспечение, которое поддерживает работу с растровыми данными в формате GeoTiff, что позволяет анализировать информацию о деформациях земной поверхности. На рисунках 1 и 2 показаны карта изменений земной поверхности на участках с проходящим магистральным трубопроводом за период 2017–2018 гг., полученные InSAR-методом.

В данной работе рассматривается проблема идентификации талых и мерзлых почв в приповерхностном слое на основе радарных данных Sentinel-1 в С-диапазоне с поляризацией VV за июнь–август, ноябрь–февраль 2017–2018 гг. Определение состояния грунта (мерзлые или талые) осуществлялось методом установления порогового значения КОР, при котором температура верхнего слоя почвы снижается ниже 0 °С.

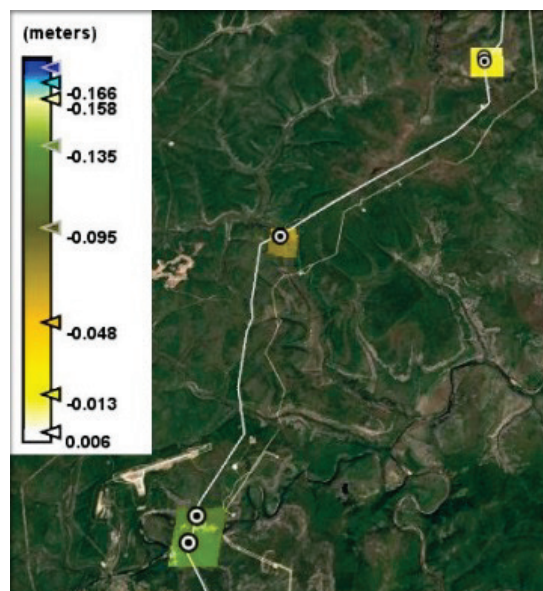


Рис. 1. Карта деформаций земной поверхности, сентябрь 2017–2018

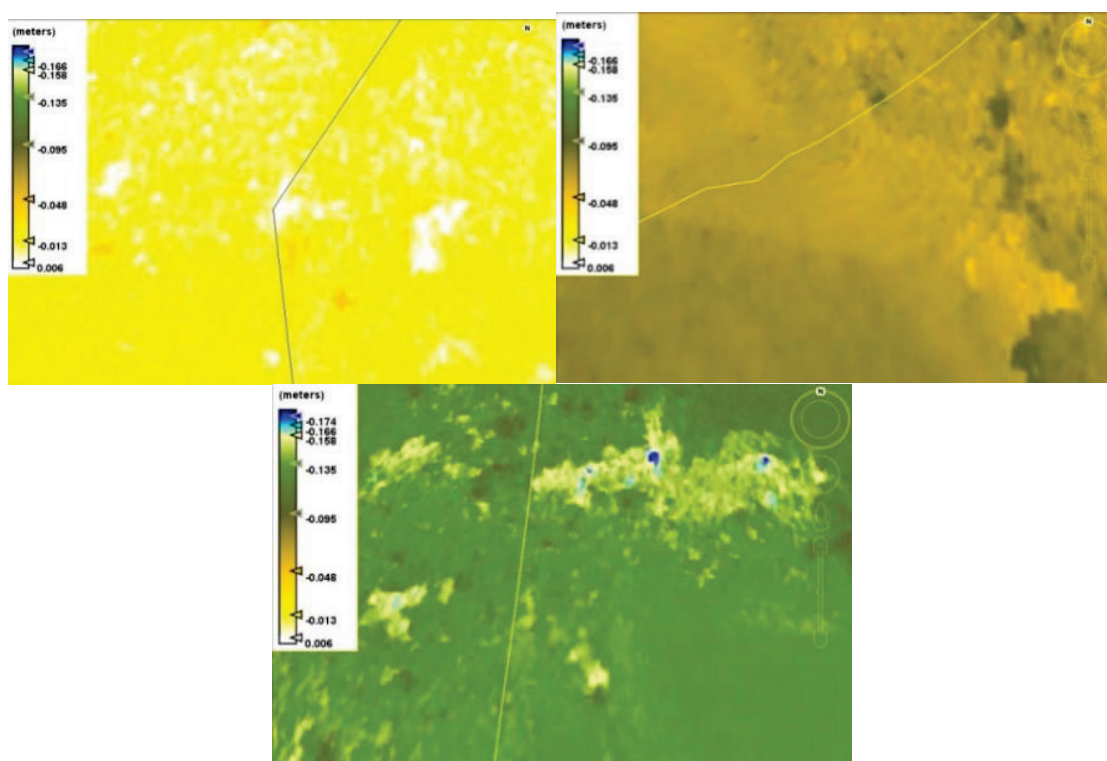


Рис. 2. Участки карты деформаций земной поверхности, сентябрь 2017–2018

В работе [8] рассматривается метод оценки состояния почвенной поверхности, основанный на применении фактора состояния поверхности (СПФ), который определяется по формуле 1:

$$\text{СПФ} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{\text{лето}}^0}{\sigma_{\text{лето}}^0 - \sigma_{\text{зима}}^0}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{лето}}^0$ и $\sigma_{\text{зима}}^0$ – средние значения КОР летом и зимой в дБ, $\sigma^0(t)$ – текущее значение КОР, t – время.

Если значение СПФ, измеренное с помощью радара, оказывается отрицательным, приповерхностный слой почвы можно считать замерзшим. Пороговым значением для СПФ является значение, при котором СПФ становится равным нулю, обозначаемое как $\sigma_{\text{порог}}^0$. Рассчитав средние значения коэффициента обратного рассеяния (КОР) на радарных снимках за летний и зимний периоды ($\sigma_{\text{лето}}^0 = -10,24$ и $\sigma_{\text{зима}}^0 = -16,46$), пороговое значение составило $\sigma_{\text{порог}}^0 = -11,37$. Используя это пороговое значение, можно создавать локальные карты распределения мерзлой и талой почвы: области с КОР ниже порога обозначают замерзшую почву (синий цвет), а значения КОР выше порога соответствуют талой почве (желтый цвет) (рис. 3).

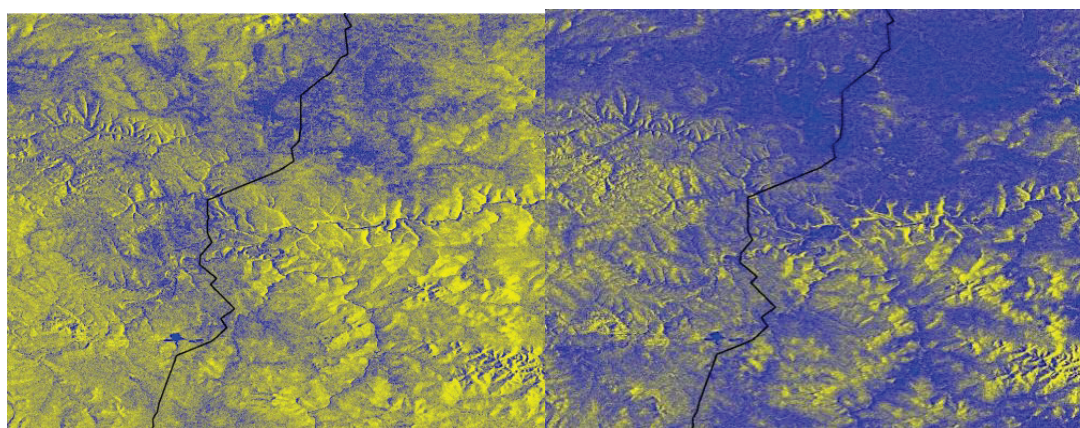


Рис. 3. Талые и мерзлые почвы сентябрь (слева), октябрь (справа) 2018 г.

Проведенное исследование подтвердило эффективность использования радиолокационных данных Sentinel-1 и методов интерферометрической синтетической апертурной радиолокации (InSAR) для мониторинга деформационных процессов в термокарстовых ландшафтах. Разработанная методология позволяет надежно идентифицировать талые и мерзлые почвы на основе анализа коэффициента обратного рассеяния (КОР) и фактора состояния поверхности (СПФ).

Полученные результаты демонстрируют, что применение спутниковых данных обеспечивает достаточно высокую точность в выявлении сезонных изменений мерзлоты и прогнозировании потенциальных деформаций, что особенно важно для контроля состояния магистральных трубопроводов в условиях экстремального климата. Разработанный подход может быть

использован для совершенствования систем мониторинга инженерных объектов и оценки геологических рисков в северных регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширшова, В. Ю. Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург / В. Ю. Ширшова // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64, № 4. – С. 399–408. – DOI10.30533/0536-101X-2020-64-4-399–408.
2. Определение смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии: опыт применения и перспективы использования / Ю. С. Исаев, М. О. Лебедев, В. О. Михайлов [и др.] // Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения : сборник статей / Под ред. М. О. Лебедева. – Москва : Изд-во «Перо», 2021. – С. 106–117.
3. Смольянинова, Е. И. Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи / Е. И. Смольянинова, Е. А. Киселева, В. О. Михайлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 147–155.
4. Родионова, Н. В. Анализ радарных данных Sentinel 1 для идентификации талых и мерзлых почв в районе Анадыря (Чукотка) и Белой Горы (Якутия) / Н. В. Родионова // Исследование земли из космоса. – 2019. – № 1. – С. 29–37.
5. Родионова, Н. В. Использование радарных данных Sentinel 1 для идентификации талых/мерзлых почв в нескольких районах Арктической зоны России в 2017–2018 годах / Н. В. Родионова // Распространение радиоволн : труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции, 1–6 июля, Казань, Россия. – Казань : Изд-во Казан. ун-та. – С. 310–314.
6. Родионова, Н. В. Обратное рассеяние от приповерхностного слоя талых/мерзлых почв Аляски по радарным данным Sentinel 1 / Н. В. Родионова // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ). – 2019. – № 11 (1). – С. 21–30.
7. Braun, A., Veci, L. Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial. – Текст : электронный // STEP – Scientific Toolbox Exploitation Platform : сайт. – URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox> (дата обращения 13.11.2025).
8. Mironov, V. L., Muzalevsky, K. V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra // Russian Phys. J. – 2013. – Vol. 55, № 8. – P. 899–902.

Электронное сетевое издание

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ И
ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ В АРКТИЧЕСКИХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ
ТЕРРИТОРИЯХ (ТЭГАСТ–2025)

Расширенные тезисы докладов

Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 95-летию
со дня рождения члена-корреспондента РАН, д.г.-м.н. Балобаева Вениамина
Тихоновича и 95-летию со дня рождения д.г.н. Павлова Александра
Владимировича, г. Якутск (Россия), 4–6 июня 2025 г.

Ответственный редактор
Михаил Николаевич Железняк

Утверждено к публикации учёным советом
ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН.
Редактор Г. К. Мозолевская
Компьютерная верстка А. А. Федорова.

ИД 05324 от 09 июля 2001 г. Принято к публикации 09.12.2025.

Системные требования:

операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux, браузер

Программное обеспечение для чтения файлов PDF.

Режим доступа: свободный. URL:

<https://имзсоран.пф/wp-content/uploads/2025/12/Sbornik-tezisov-TEGAST-2025.pdf>

Усл. печ. л. 5,12. Объем данных 12,7 Мбайт.

Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН.

677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН.