

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ
Николай Константинович

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ВОДОУПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ МЕРЗЛОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЛЬДОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность: 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе
«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
имени Б.Е. Веденеева» (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Научный руководитель:

Шаталина Ирэн Николаевна, кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Давиденко Вячеслав Михайлович, доктор технических наук,
старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела
«Диагностика сооружений, механического оборудования и сопровождения
спецработ» Открытого акционерного общества «Всероссийский научно-
исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева»

Сняжков Леонид Николаевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
(ФГБОУ ВПО СПбГПУ)

Ведущая организация:

Нижегородский государственный архитектурно-строительный
университет

Защита состоится «__» _____ 2013 г. в ____ часов на заседании
объединенного диссертационного совета ДМ 512.001.01
при ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»
по адресу 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Т. В. Иванова

Актуальность темы работы

Анализ всех видов аварий грунтовых плотин в северной строитель-
но-климатической зоне (ССКЗ) показывает, что наиболее опасными и час-
то наблюдаемыми ситуациями являются снижение несущей способности и
водонепроницаемости конструкций водоупорных элементов при повыше-
нии температуры или при периодическом замерзании и оттаивании вплоть
до полной потери прочности и противофильтрационной устойчивости.
Такие конструкции грунтовых плотин, как оголовки, сопряжения с осно-
ванием и бортовые примыкания подвержены промерзанию – оттаиванию с
возможностью развития опасных криогенных процессов с потерей водоне-
проницаемости водоупорных элементов. Вместе с тем, опыт эксплуатации
конструкций гидротехнических сооружений (ГТС) из мерзлого грунта и
льда позволяет утверждать, что при определенных условиях технически
возможны конструктивно-технологические решения, при которых исполь-
зование мерзлых грунтов и льда не приводит к снижению их эксплуата-
ционной надежности. Одним из таких эффективных конструктивно-техноло-
гических решений является создание конструкций на основе композици-
онных материалов – ледяных и льдогрунтовых композитов. Эти конструк-
тивно-технологические решения позволяют значительно повысить сроки
безопасной эксплуатации мерзлых плотин и ледяных конструкций для
проведения работ со льда в гидротехническом строительстве на Арктиче-
ском шельфе и для создания ледяных переправ, причалов и других вре-
менных ГТС. Разработка надежных конструкций ГТС с максимальным
учетом природных условий и использованием местных материалов, дости-
гаемая конструктивно-технологическими решениями с применением ледя-
ных и льдогрунтовых материалов, является актуальной задачей.

Цель и задачи работы

Цель работы – разработка надежных усовершенствованных конст-
рукций водоупорных элементов ГТС мерзлого типа с использованием ледя-
ных и льдогрунтовых композитов.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Обобщение и анализ существующих конструкций и технологий
по возведению водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа и
временных ГТС в ССКЗ.

2. Научное обоснование конструктивно-технологических решений,
направленных на повышение надежности водоупорных элементов и кон-
струкций ГТС мерзлого типа с использованием ледяных и льдогрунтовых
композитов.

3. Исследование ледяных и криогелевых льдогрунтовых композитов и
регулирование их свойств в зависимости от назначения конструкции ГТС.

4. Разработка надежных конструкций льдогрунтовых водоупорных
элементов грунтовых плотин мерзлого типа с использованием криогене-

левых льдогрунтовых композитов, обладающих высокой фильтрационной прочностью.

5. Усовершенствование конструкций временных ГТС из льда (при проведении строительных работ, ледяных причалов, переправ) и удлинение сроков их безопасной эксплуатации.

Научная новизна:

1. В разработке конструкций водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа из криогелевых льдогрунтовых композитов, обладающих высокой фильтрационной прочностью при замораживании-оттаивании.

2. В проектировании конструкционных и технологических схем создания надежных водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа и конструкций ГТС с использованием криогелевых льдогрунтовых композитов на основе поливинилового спирта (ПВС).

3. В разработке конструктивно-технологических решений применения армированных льдокомпазитов в конструкциях временных ледовых ГТС, удлинения сроков безопасной эксплуатации и повышения несущей способности.

Все разработки выполнены автором диссертации впервые, многие из них подтверждены патентами и авторскими свидетельствами на изобретения.

Основные положения, выносимые на защиту:

конструктивно-технологические решения для создания надежных водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа на основе криогелевых льдогрунтовых композитов;

усовершенствованные конструкции временных ледовых ГТС с удлиненными сроками безопасной эксплуатации и повышенной несущей способностью, и способы их возведения из ледяных и льдогрунтовых композитов;

технология получения и состав криогелевых льдогрунтовых композитов, обладающих высокими прочностными и противofильтрационными свойствами в мерзлом состоянии, при оттаивании и воздействии знакопеременных температур.

Методы исследований

Работа носит расчетно-экспериментальный характер и выполнена с использованием комплексных методов исследований, включающих: патентно-информационный анализ, стандартные и специальные экспериментальные методы определения физико-механических свойств создаваемых композитов и математическую обработку полученных результатов.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена методически обоснованным комплексом исследований, проведенных в соответствии с государственными стандартами и рекомендациями нормативных документов, корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата и сопоставлением

результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта. В работе применены математические методы статистической обработки результатов экспериментов.

Практическая значимость и реализация работы

Разработанные новые конструкции противofильтрационных элементов (ПФЭ) грунтовых плотин: мерзлотных завес, экранов, ядер на основе криогелевых льдогрунтовых композитов, обладающих высокой фильтрационной прочностью при оттаивании в летний период и в условиях знакопеременных температур, обеспечивают надежную работу водоупорных элементов грунтовых плотин и дамб. Новые конструктивно-технологические решения для временных ГТС из льда позволяют повысить их несущую способность и удлинить сроки безопасной эксплуатации.

Разработанные конструкции применимы для гидроизолирующих покрытий ложа и дамб золоотвалов, в транспортном и гидротехническом строительстве на Арктическом шельфе (ледяные аэродромы, ледовые острова для бурения).

Результаты исследований, полученные в диссертационной работе, были использованы в составе проекта «Разработать технологию круглогодичного строительства земляных сооружений для низконапорных гидроузлов в северных условиях» (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева), в научно-техническом проекте «Разработка способов улучшения эксплуатационных характеристик ледяных аэродромных покрытий и ледовых аэродромов» организации «Ленаэропроект» (акт внедрения).

Разработанные способы создания ледяных и льдогрунтовых композитов с требуемыми для применения в конструкциях ГТС физико-механическими свойствами, составы и конструкции защищены авторскими свидетельствами и патентами, имеются акты использования изобретений.

Личный вклад автора

Личное участие автора состоит: в разработке новых надежных конструкций ПФЭ грунтовых плотин мерзлого типа и конструкций временных ГТС, в разработке конструктивно-технологических решений и схем создания конструкций из ледяных и льдогрунтовых композитов; в проведении исследований физико-механических свойств ледяных и льдогрунтовых композитов; в обработке и анализе экспериментальных данных.

Публикации и апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, опубликованы в 19 печатных работах, из которых 9 – авторские свидетельства и патенты на изобретения. Основные положения диссертации доложены на научно-технических конференциях: «Гидротехническое строительство в районах Крайнего Севера» (г. Красноярск, 1986 г.), «Ледотермические проблемы в северном гидротехническом строительстве и вопросы продления навигации» (г. Архангельск, 1987 г.), «Исследование влияния сооружений гидроузлов на ледовый режим рек и окружающую

среду. Лед-89» (г. Дивногорск, 1989г.), на международных конференциях по портовой и океанической технике в арктических условиях (РОАС) в 2003, 2009, 2011 гг., на симпозиуме «Последние исследования, достижения и технологии укрепления грунтов» (IS-GI Brussels-2012), на 6-ой и 7-ой конференциях «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» (СПб, 2011 г., 2012 г.), на конференции «Полярная механика-2012» (г. Новосибирск) и на международном симпозиуме МАГИ по льду (IAHR – 10) в г. Лахти, Финляндия, в 2010 году.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 148 страниц сквозной нумерации, включая 49 рисунков, 10 таблиц и приложение.

Автор выражает признательность сотрудникам лаборатории Статических исследований механики грунтов ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» за помощь при выполнении отдельных экспериментов, особо отмечает неоценимую помощь А.А. Иванова и В.О. Сая; д.х.н., проф. В.И. Лозинскому, д.т.н. В.И. Моисееву, д.т.н., проф. В.Н. Жиленкову за консультации и ценные советы, высказанные при обсуждении отдельных этапов исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, указана основная цель исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы исследований, рассмотрены особенности работы конструкций ГТС, расположенных в ССКЗ и эксплуатируемых в мерзлом состоянии. Вопросами строительства в ССКЗ и разработкой конструкций водоупорных элементов грунтовых плотин и временных ГТС занимались и занимаются ведущие гидротехники страны: В.И.Белан, Г.Ф.Биянов, В.А.Вайкум, К.Ф.Войтковский, С.С.Вялов, В.Б.Глаговский, А.Л.Гольдин, В.М.Давиденко, В.Н.Жиленков, Ю.К.Зарецкий, П.Л.Иванов, А.А.Каган, Н.Ф.Кривоногова, Я.А.Кроник, Л.И.Кудояров, В.С.Кузнецов, В.Л.Куперман, Е.Д.Лосев, В.Д.Макаров, И.А.Максимов, В.Г.Мельник, В.А.Мельников, И.С.Моисеев, Н.А.Мухетдинов, Ю.Н.Мызников, М.П.Павчич, С.И.Панов, Б.В.Проскуряков, В.Н.Придорогин, В.Г.Радченко, Л.А.Розин, Л.Н.Расказов, Д.Д.Сапегин, В.И.Телешев, В.В.Тетельмин, В.А.Турчина, Н.А.Цытович, С.Б.Ухов, В.И.Федосеев, М.П.Федоров, В.Н.Фрумкин, А.М.Цвик, Р.В.Чжан, И.Н.Шаталина, И.Н.Шишов, В.П.Ягин.

Анализ причин высокой аварийности грунтовых плотин мерзлого типа показывает, что в большинстве случаев разрушения обусловлены конструктивно-технологическими особенностями ПФЭ. Наиболее опасными нарушениями являются снижение прочности мерзлых грунтов при повышении температуры, нарушение водонепроницаемости мерзлых

грунтов тела плотины, ПФЭ и вечномерзлого основания вплоть до полной потери противодиффузионной устойчивости при их оттаивании или воздействии переменных температур. Зоны возможных нарушений ПФЭ грунтовых плотин показаны на рис.1.

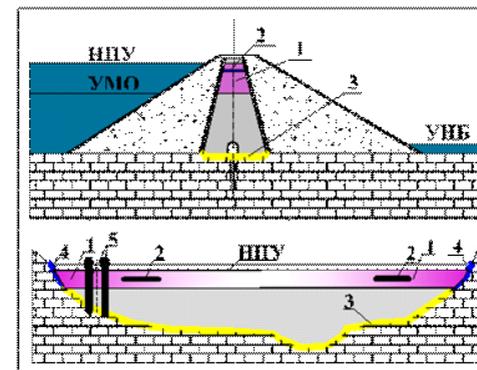


Рис.1. Зоны наиболее вероятных нарушений фильтрационной прочности ПФЭ грунтовых плотин:

- 1 – зоны в оголовках грунтовых плотин (морозобойные трещины, потери прочности при переменных температурах и др.);
- 2 – возможные горизонтальные трещины в оголовках за счет «арочного» эффекта;
- 3 – зоны сопряжения мерзлотной завесы с основанием;
- 4 – бортовые примыкания;
- 5 – зоны возможного несмыкания льдогрунтовых цилиндров мерзлотной завесы

Приведены патентный и литературный обзоры применяемых на практике методов создания конструкций из ледяных и льдогрунтовых композитов. Сформулированы и обоснованы основные задачи исследований, решаемые в диссертационной работе.

В результате анализа современного состояния проблемы исследований по повышению надежности конструкций ГТС мерзлого типа выявлено, что:

1. Применение в грунтовых плотинах мерзлого типа конструкций ПФЭ из негрунтовых материалов (пленочных экранов, бетонных, асфальтобетонных диафрагм) не всегда устраняет проблемы потери противодиффузионной надежности сопряжений различных по свойствам материалов, характеризуется снижением эксплуатационных характеристик ПФЭ при многократном промерзании и оттаивании.

2. Разработки конструктивно-технологических решений по устройству, ремонту и реконструкции ПФЭ с использованием конструкций из криогелевых льдогрунтовых композитов в сочетании с сезонно-охлаждающими устройствами (СОУ) перспективны для повышения надежности грунтовых плотин мерзлого типа.

3. Разработки конструкций из армированного льда и ледяных композитов смогут позволить существенно повысить эффективность работы временных ГТС из льда и увеличить сроки их безопасной эксплуатации

4. Применение конструкций из ледяных и льдогрунтовых композитов сдерживается недостаточной разработанностью методов и технологии их создания.

Во второй главе рассмотрены основы создания элементов композитных конструкций с заданными свойствами, прогнозирование свойств, исходя из положений механики композиционных материалов, и дано научное обоснование выбора входящих в композитную конструкцию компонентов.

Еще в 60-е годы прошлого столетия была показана возможность упрочнения льда высокомолекулярными соединениями, обладающими растворимостью в воде, предназначенной для намораживания льда, экологической безопасностью, упрочняющим воздействием на хрупкую ледяную матрицу посредством создания в ней непрерывной сетки пластичной фазы, состоящей из макромолекул полимера. Полученные автором экспериментальные данные по прочности ледяных композитов на основе водорастворимых полимерных соединений показали, что наибольшей армирующей способностью для льда обладает ПВС.

Определяющим фактором выбора ПВС, широко используемого в промышленности экологически чистого материала в качестве основного компонента для льдогрунтовых композитов является способность ПВС создавать гель при положительных температурах и криогель в процессах замораживания – оттаивания. С увеличением количества циклов замораживания – оттаивания криогеля улучшаются его механические свойства: увеличиваются прочность и упругость, усиливаются адгезионные свойства сцепления. Водонерастворимость ПВС достигается «закрепителями» - соединениями бора и некоторыми другими неорганическими соединениями.

В конструкциях временных ГТС из льда материалами армирования являются древесные, стеклянные и растительные волокна.

В третьей главе представлены результаты исследований физико-механических свойств различных видов разработанных автором ледяных и льдогрунтовых композитов для применения их в грунтовых плотинах и во временных ледяных сооружениях ГТС.

Для проведения экспериментальных исследований использовалось современное высокоточное оборудование Лаборатории статических исследований механики грунтов ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Основное внимание было уделено определению прочностных свойств композитов и противифльтрационных свойств криогелевых льдогрунтовых композитов при их оттаивании и при воздействии знакопеременных температур.

Прочностные характеристики криогелевых грунтовых композитов, как в мерзлом, так и в талом состояниях, испытывались методом одноплос-

костного среза в соответствии с принципами, изложенными в ГОСТ 12248-2010. Испытания по определению прочности при изгибе ледяных композитов проводились в соответствии с ГОСТ 310.4-81. Для создаваемых ледяных и льдогрунтовых композитов в качестве основного метода выбран метод сравнения характеристик созданных композитов с эталоном, в качестве которого служили контрольные образцы льда, выращенные и испытанные в идентичных условиях с исследуемым композитом. Для определения K_{ϕ} слабоводопроницаемых материалов, к которым относятся криогелевые композиты, использовалась методика измерения объема воды, профильтрованной через образец на стадии установившейся фильтрации при постоянном градиенте напора и обжатии образца всесторонним давлением. Опыты по определению теплопроводности композитов проведены по ГОСТ 7076-99. Статистическая обработка результатов испытаний проводилась в соответствии с ГОСТ 20522-96.

В испытаниях криогелевых грунтовых композитов определялись их физико-механические свойства при различных количествах циклов замораживания - оттаивания, при варьировании содержания входящих компонентов и параметров испытаний: температуры, нагрузок, скорости деформации. Содержание ПВС в исходном водном растворе изменялось от 4 до 10 вес.% при постоянном отношении борной кислоты и ПВС (1:10) в растворе и постоянном отношении объема раствора к дисперсному наполнителю 1:5 (в некоторых сериях испытаний это соотношение варьировалось от 1:4 до 1:7). В качестве дисперсного наполнителя использовался мелкий песок с преобладающей фракцией 0,1 – 0,25 мм. Испытаниями установлены снижение водопроницаемости и рост прочностных характеристик криогелевых льдогрунтовых композитов с повышением содержания ПВС и количества циклов «замораживания – оттаивания». При оттаивании композиты сохраняют прочностные и водоупорные свойства, в отличие от неармированного контрольного грунта, который их полностью теряет.

В мерзлом состоянии криогелевые льдогрунтовые композиты, как и все мерзлые грунты, являются водоупорами. При оттаивании коэффициент фильтрации криогелевых грунтовых композитов составил 10^{-8} – 10^{-9} см/сек.

На рис. 2 приведены диаграммы среза. Установлено, что криогелевые льдогрунтовые композиты при оттаивании имеют высокую пластичность и способность к самозалечиванию трещин. Высокую пластичность криогелевых композитов иллюстрирует рис. 3. В мерзлом состоянии исследуемые криогелевые композиты достаточно пластичны за счет образования в ледяных включениях мерзлого грунта непрерывной сетки пластичной фазы из макромолекул полимера ПВС. Диапазоны регулирования физико-механических свойств криогелевых грунтовых композитов представлены в таблице для мерзлого и талого состояний.

На основании проведенного комплекса исследований оптимальными концентрациями содержания ПВС в криогелевом грунтовом композите

Характеристики криогелевых грунтовых композитов в мерзлом и талом состояниях

Свойства	Мерзлое состояние		Талое состояние	
	лед	криогелевый грунтовый композит	песок	
Прочность при срезе, τ , МПа	0,5 – 0,7	0,7 – 1,2	–	–
Угол внутреннего трения, град	–	–	22 – 30	22 – 25
Сцепление, МПа	–	–	0,01 – 0,05	0
Модуль деформации, МПа	3000 – 5000	2000 – 3000	0,5 – 5,0	20 – 40
Водопроницаемость, м/с	–	–	$10^{-8} – 10^{-11}$	$10^{-4} – 10^{-5}$
Плотность, кг/м^3	910 – 930	1240 – 1650	1240 – 1650	1600–1750
Влажность, %	100	14 – 25	14 – 25	7 – 10
Плотность скелета, кг/м^3	0	990 – 1440	990 – 1440	1450 – 1630
Теплопроводность, Вт/м град	2,2	0,25 – 1,1	0,3 – 0,5	0,6 – 1,3

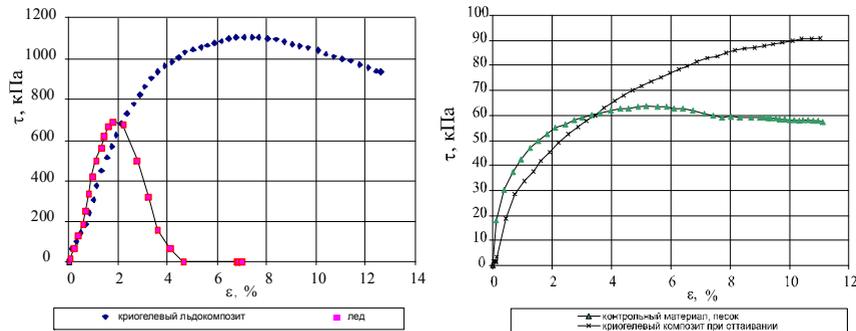


Рис. 2. Диаграммы среза: «напряжение – деформация» пористого криогелевого льдокомпозиата и льда при вертикальном давлении 100 кПа (слева – в мерзлом состоянии при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$; справа – в талом состоянии после оттаивания при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Рис. 3. Образец криогелевого грунтового композита после оттаивания. (слева – перед приложением изгибающего усилия, справа – при приложении)

Проведенные исследования установили положительное влияние незначительных количеств добавления сульфата натрия (Na_2SO_4) в раствор ПВС. Присутствие в растворе ПВС сульфата натрия (Na_2SO_4). 0,25 – 0,5 вес. % позволило уменьшить концентрацию ПВС в растворе с 10% до 8%, причём водопроницаемость композита в талом состоянии достигла 10^{-9} см/с с сохранением пластичных свойств.

По своим экспериментально определенным свойствам криогелевые грунтовые композиты эффективны для создания конструкций и водопорных элементов ГТС мерзлого типа.

Для разработки конструкций временных ГТС из льда проведены исследования по упрочнению льда твердыми дисперсными частицами: глины, песка, мелкого гравия, керамзита, кристаллогидратами солей (эвтектические композиции) и по регулированию их теплофизических свойств воздушными включениями. Из полученных данных следует, что в конструкциях изо льда, упрочненного дисперсными частицами, необходимо стремиться к использованию более мелких дисперсных частиц и высокому их содержанию (рис.4).

Проведенные испытания на изгиб льдокомпозитов, армированных короткими волокнами, показали, что их разрушение сопровождается множественным растрескиванием матрицы (льда) с последующим адгезионно-когезионным выдергиванием волокон из матрицы, так как деформация волокон при их разрыве, как правило, больше аналогичной деформации для льда. В армированных волокнами композитах процесс разрушения сдерживается адгезионным сцеплением волокон со льдом.

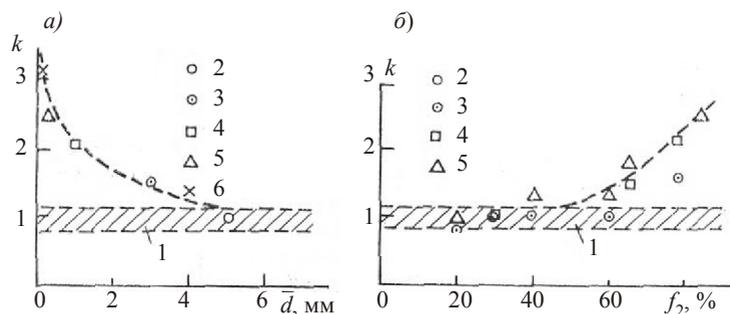


Рис. 4. Относительная прочность k при изгибе ледяных композитов в зависимости:

a – от среднего размера дисперсных частиц d ,

b – от весового содержания частиц f_2 (температура испытаний -20°C)

1 – лед без добавок; 2 – льдокомпозиты с частицами: 2 – керамзита $d=5$ мм, $f_2=30\%$;

3 – мелкого гравия, $d=3$ мм, $f_2=74\%$; 4 – песка крупного, $d=1,1$ мм, $f_2=78\%$;

5 – песка мелкого, $d=0,2$ мм, $f_2=80\%$; 6 – глины, $d=7$ мкм, $f_2=72\%$

В связи с послойной технологией намораживания льда для создания временных ледяных ГТС практический интерес представляет плоскостная хаотическая укладка волокон в плоскости намораживания слоев. Для этого расположения волокон длиной менее критической длины l_c , определяемой соотношением $l_c = \sigma_2 d / 2\tau$, и при их объемном содержании $\Phi_2 < 0,25$ определены зависимости прочности при изгибе льдокомпозитов от температуры, содержания волокон и отношения l длины волокон к d диаметру:

$$\sigma_c = 1,4 (1 + 0,07 |t|) (1 - \Phi_2) + K |t|^{0,63} \Phi_2 l/d;$$

где σ_c – предел прочности композита при изгибе в МПа, $|t|$ – модуль температуры в $^\circ\text{C}$, σ_2 – прочность армирующих волокон; τ – адгезионная прочность связи волокна и матрицы, коэффициент $K = 0,23$ и $K = 0,36$ для стеклянных и древесных волокон, соответственно.

С увеличением содержания волокон Φ_2 возрастает отличие прочности композита от прочности, рассчитанной из закона смеси. При содержании волокна выше Φ_{2m} , для волокон в ледяной матрице ее значение $0,4 - 0,45$, прочность композита резко падает, что обусловлено нехваткой связующего и технологическими трудностями создания густоармированных

композитов. Принимая во внимание технико-экономические показатели, определены оптимальные содержания коротких волокон, которые равны $0,15 - 0,25$.

С точки зрения повышения несущей способности конструкций временных ГТС наиболее эффективны стеклянные волокна. С другой стороны, при доступности древесных и растительных материалов в районе строительства их применение может быть экономически оправдано (в зимниках на заболоченной местности, в лесовозных дорогах).

Четвертая глава посвящена конструктивно-технологическим решениям, направленным на повышение надежности водопорных элементов и конструкций ГТС мерзлого типа с использованием ледяных и льдогрунтовых композитов. Разработаны конструкции водопорных элементов для каменно-земляных и каменно-набросных плотин мерзлого типа и для узлов их сопряжений с береговыми примыканиями в виде диафрагмы из криогелевого материала. На рис. 5, 6 представлены схемы узла сопряжения с береговыми примыканиями и фрагмента каменно-набросной плотины мерзлого типа, возводимой на песчаном основании, перекрывающим коренные породы. Противофильтрационные диафрагмы из криогелевых грунтовых композитов располагают во фронтальной части мерзлотной завесы в непосредственной близости от замораживающих устройств (СОУ), тем самым объединяя их в единую конструкцию. Диафрагмы возводятся методами глубинного перемешивания, созданием стены в грунте или буронабивными сваями. В качестве вяжущего вещества во всех этих методах предлагается 10% раствор ПВС с добавкой борной кислоты и ПАВ. Общее количество вяжущего вещества должно составлять около 15 – 20% от массы перемешиваемого грунта. Диафрагма обладает низкой теплопроводностью, защищает мерзлотную завесу от отепляющего воздействия водохранилища, и остается практически водонепроницаемой при нарушении сплошности льдогрунтовой завесы из-за неисправности замораживающих колонок.

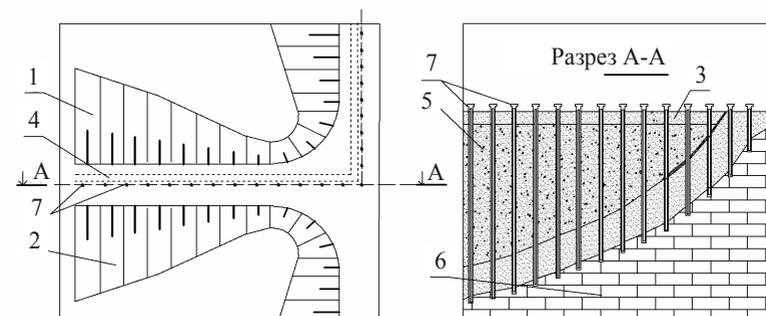


Рис. 5. Схема сопряжения плотины мерзлого типа с береговыми устоями:

1 – верховой откос; 2 – низовой откос; 3 – оголовок плотины выше уровня ФПУ, сооруженный из песчано-гравийных материалов; 4 – диафрагма из криогелевого композита; 5 – ядро; 6 – скальные породы; 7 – СОУ

Морозостойкость и возможность создания гидроизоляционных экранов непосредственно на объекте являются уникальным преимуществом криогелей по сравнению с традиционными цементными смесями. Одна из схем гидроизоляционного экрана на основе геосинтетических материалов с применением грунтово-криогелевого композита представлена на рис.7.

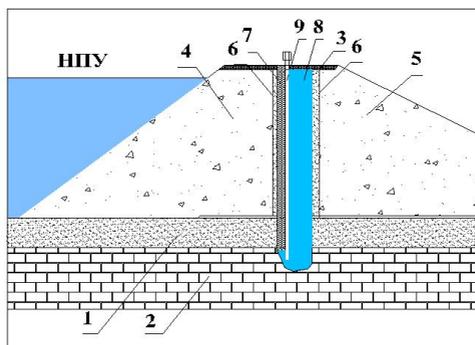


Рис.6. Устройство противодиффузионной и теплоизоляционной защиты в плотине мерзлого типа:

- 1 – оттаивающее основание из фильтрующего материала; 2 – вечномёрзлое основание; 3 – тепло-изоляционный слой; 4 – верховая призма; 5 – низовая призма; 6 – песчаный защитный слой; 7 – противодиффузионная и теплоизоляционная диафрагма из криогелевого грунтово-криогелевого композита; 8 – мерзлотная завеса; 9 – СОУ

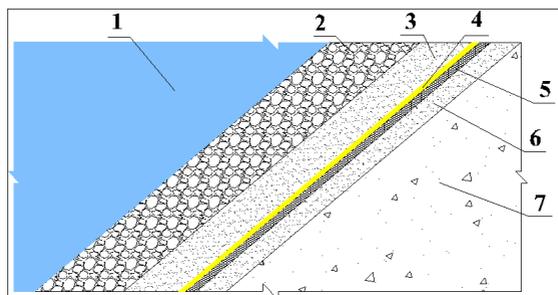


Рис.7. Устройство гидроизоляционного экрана с использованием криогелевого композита и геосинтетического материала (канвалан, дорнит):

- 1 – водохранилище; 2 – крепление верхового откоса; 3 – верхний защитный песчаный слой; 4 – геосинтетический материал, пропитанный раствором ПВС; 5 – зона проникновения раствора ПВС в подстилающий грунт; 6 – защитный песчаный слой; 7 – призма верхового откоса из каменно-набросного материала

Для проведения ремонтных работ по предотвращению высоких фильтративных расходов грунтовых плотин предложен способ, защи-

щенный патентом РФ №2342484. Способ основан на применении пористых криогелевых грунтово-криогелевых композитов путем инъектирования водного раствора ПВС в тело плотины через пробуренные скважины. Способ включает кольматацию грунтового материала гидроизоляционным полимерным составом, состоящим из водного раствора ПВС и борной кислоты, путем поинтервального нагнетания под давлением с одновременной подачей воздуха.

Для предотвращения «трещинной» суффозии в верхней части водопорного элемента грунтовой плотины предложено устройство диафрагмы в виде траншеи, заполненной криогелевым льдогрунтово-криогелевым композитом.

Данные эксперимента по устройству пенного теплогидроизолирующего экрана из золошлаковых материалов Магаданской ТЭЦ с добавками ПВС в составе проекта ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева «Разработать технологию круглогодичного строительства земляных сооружений для низконапорных гидроузлов в северных условиях» показали успешность использования криогелевых композитов для создания водопорных элементов плотин в ССКЗ.

Пятая глава посвящена разработке технических решений по усовершенствованию конструкций временных гидротехнических сооружений на основе ледяных композитов.

В связи с тем, что при температурах близких к 0°С эффективность армирования короткими волокнами резко падает, а применение длинных волокон с длиной превышающей критическую, исключает применение механизированного метода намораживания (дождеванием), для конструкций временных гидротехнических сооружений, использующих несущую способность ледяного покрова, предложено использовать слоистые композиты, полученные путем армирования стеклосетками. При создании ледяных конструкций, армированных стеклосетками, возможно не только многократное их использование, но и применение механизированного метода намораживания льда, что позволяет сочетать преимущества методов ускоренного намораживания и армирования.

Для повышения несущей способности ледяного покрова (покрытия) и увеличения сроков эксплуатации при проведении с него строительных работ разработаны следующие конструктивно-технологические решения с применением льдокомпозиатов:

1. Формирование упрочненного льда осуществляется созданием конструкции ледяного массива с обеспечением упорядоченного расположения волокон в плоскости действия растягивающих напряжений, что приводит к более полному использованию высокой прочности армирующих волокон. Упорядоченное расположение волокон достигается в установившемся ламинарном потоке пульпы при послойной подаче ее на поверхность ледяного покрытия с последующим послойным замораживанием (АС №1249277).

2. Для формирования ледяного покрытия естественного водоема с увеличенными сроками эксплуатации несущей способности предлагается конструкция, состоящая из послойно намороженных слоев армированного льда, причем средний слой намораживается с добавлением в воду ПВС и ПАВ. В этом случае ПВС используется как стабилизатор пены, ПАВ обеспечивают формирование пористого льда, теплостойкость которого выше, чем у естественного льда, тем самым расширяются сроки эксплуатации ледяного покрытия (АС №1388674).

3. Применение конструкций временных ГТС из льдокомпозиатов, армированных по гибридной (многокомпонентной) схеме: из армирующих лед слоев стеклосетки с выкладкой между ними древесных опилок с последующим их увлажнением, уплотнением и замораживанием слоев, позволяет повысить несущую способность, коэффициент сцепления и теплоизоляционные свойства снего-ледяного покрытия с возможностью повторного использования армирующих материалов (АС №1715920).

4. Повышение несущей способности зимней дороги основано на применении армированных волокнами льдокомпозиатов и предназначено для прокладки дорог по заболоченным участкам. В качестве волокон используют стебли растений, обработанные водным раствором метилцеллюлозы для повышения адгезии льда к волокнам (АС №1548307).

5. Для повышения несущей способности морской ледяной платформы разработана трехслойная конструкция из пресного и морского льда. Нижний слой платформы образуют из льдокомпозиата с плотностью меньше плотности воды, подавая под слой льда смесь пресной воды с коротковолокнистым армирующим материалом, например с древесными опилками, верхний слой образуют намораживанием пресного льда (АС №1476062).

Применение армированных льдокомпозиатов в конструкциях временных ГТС повышает их безопасность при эксплуатации и практически исключает несчастные случаи, связанные с хрупким разрушением льда под транспортными средствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обоснованы возможности создания надежных водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа и конструкций временных ГТС с расширенными сроками безопасной эксплуатации конструктивно-технологическими методами, основанными на применении ледяных и криогелевых льдогрунтовых композиатов. Разработан и исследован экологически безопасный новый криогелевый льдогрунтовый композиционный материал на основе ПВС. Доказано, что этот материал наиболее перспективен для устройства, ремонта и реконструкции водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа.

2. Показано, что физико-механические характеристики криогелевых льдогрунтовых композиатов на основе ПВС обусловлены образованием в них при замораживании полимерной сетки, которая обеспечивает необходимые для применения в качестве материала ПФЭ грунтовых плотин свойства, в частности водонепроницаемость, устойчивость к образованию трещин при значительных деформациях и гибкость.

3. Установлено, что разработанные криогелевые льдогрунтовые композиаты обладают высокими прочностными и противодиффузионными свойствами как в мерзлом состоянии, так и при оттаивании и при воздействии знакопеременных температур, при этом с ростом количества циклов «замораживания-оттаивания» свойства несколько улучшаются.

4. Разработаны конструкционные и технологические схемы создания надежных водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа и конструкций ГТС, в которых наиболее полно используются положительные свойства криогелевых льдогрунтовых композиатов. Разработанные новые надежные конструкции ПФЭ грунтовых плотин и береговых сопряжений обладают рядом преимуществ по сравнению с другими аналогичными решениями.

5. Для разных типов конструкций водоупорных элементов рекомендованы различные по составу криогелевые грунтовые композиаты. Для устройства эффективной противодиффузионной и теплоизоляционной защиты в плотине мерзлого типа предлагается применять пористые криогелевые льдогрунтовые композиаты. Установлено, что концентрация содержания ПВС должна находиться в диапазоне от 1,5% до 2,0%, это соответствует концентрации ПВС в водном растворе от 7 до 10%. Для противодиффузионных экранов рекомендовано устройство из криогелей ПВС в комбинации с геосинтетическим материалом.

6. Показано, что криогелевые конструкции водоупорных элементов грунтовых плотин мерзлого типа являются современными и прогрессивными типами защиты сооружений от фильтрации. Главными отличительными признаками криогелевых противодиффузионных конструкций (диафрагм и экранов) являются: четкая функциональность элементов, малые объемы (толщина и масса) собственно водонепроницаемого элемента, теплостойкость с низкими значениями теплопроводности, сохранение водонепроницаемости при оттаивании (K_{ϕ} менее 10^{-8} см/с), химическая стойкость, стойкость к воздействию микроорганизмов, морозостойкость, возможность укладки при отрицательных температурах, экономичность, самозалечиваемость в случае появления трещин, высокая пластичность (деформативная способность без образования трещин), экологическая безопасность.

7. Для различных зон риска возникновения нештатных ситуаций, связанных с нарушениями фильтрационной прочности водоупорных элементов, предлагаются эффективные конструктивно-технологические ре-

шения, основанные на применении конструкций из криогелевых грунто-вых композитов, в которых максимально учтены природные условия и использованы местные материалы. Два технических решения защищены патентами РФ: №1796650, №2342484.

8. Разработаны новые надежные конструкции временных ГТС из ледяных композитов. Исследованы ледяные композиты, созданные посредством упрочнения дисперсными частицами и армирования волокнами, определены зависимости прочности ледяных композитов от температуры, содержания и ориентации армирующих волокон, длины и типа. Разработки и результаты исследований реализованы при проектировании ледовых аэродромных покрытий в Арктике.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Васильев Н.К. Методы упрочнения и армирования льда для конструкций гидротехнических сооружений из ледяных и льдогрунтовых композитов / Н.К. Васильев, А.А. Иванов, И.Н. Шаталина // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13/ Вып. 3. С. 31–37.

2. Водоупорные элементы грунтовых плотин в северной строитель-но-климатической зоне с использованием грунтово-криогелевых композитов / Н.К. Васильев, В.Б. Глаговский, А.А. Иванов, И.Н. Шаталина // Гидротехническое строительство. 2013. №11. С.19-23.

3. Васильев Н.К. Методы армирования льда для создания ледяных и льдогрунтовых композитов/Н.К. Васильев, И.Н. Шаталина // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т.264. С. 119-130.

4. Укрепление мерзлых грунтов методом криотропного гелеобразо-вания/ Н.К. Васильев, М.Г. Давыдов, В.В. Сокуров, И.Н. Шаталина // Из-вестия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т.253. С. 49-53.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Васильев Н.К. Грунтово-криогелевые композиты для противо-фильтрационных элементов плотин в северной строитель-но-климати-ческой зоне / Н.К. Васильев, А.А. Иванов // На стыке наук. Физико-хими-ческая серия. 1-ая Международная интернет-конференция. Казань. 2013. С.40-41.

2. Ice-and Cryogel-Soil Composites in Water-Retaining Elements in Em-bankment Dams Constructed in Cold Regions/N.K. Vasiliev, A.A. Ivanov, V.V. Sokurov, I.N. Shatalina // Sciences in Cold and Arid Regions. 2013, 5 (4). P.444-450.

3. Strength Properties of Ice-Soil Composites Created by Method of Cryotropic Gel Formation / N.K. Vasiliev, A.A. Ivanov, V.V. Sokurov, I.N.

Shatalina, K.N. Vasilyev // Cold Regions Science and Technology. 2012. v. 70. P.94-97.

4. Vasiliev N.K. Ice Composites: Mechanical Properties and Methods of Creation / N.K. Vasiliev, M.G. Gladkov // Proc. of the 17th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 03. 2003. Vol.1. P.119-127.

5. Vasiliev N.K. On Development of Fibre-Ice-Composites/ N.K. Vasi-liev // Cold Regions Science and Technology. 1993.Vol. 21. P.195-199.

6. Васильев Н.К. Упрочнение льда для ледяных переправ/Н.К. Ва-сильев // Автомобильные дороги. 1988. № 11. С.20-21.

Патенты и изобретения:

1. Пат. 2342484 РФ МПК E02B3/16. Способ изготовления водоне-проницаемого экрана в грунтовых материалах элементов гидротехниче-ского сооружения / Васильев Н.К., Сокуров В.В., Иванов А.А., Шаталина И.Н., Разговорова Е.Л., опубли. 27.12.2008. Бюл.№ 36.

2. Пат. 1796650 РФ МПК C09K3/24. Состав для искусственного льда/Васильев Н.К. Разговорова Е.Л., Шаталина И.Н., Иванов Ю. А., Ха-ритонов В.Н., опубли.23.02.93. Бюл.№7.

3. АС № 1715920 СССР МКИ E01C11/24. Способ создания снего-ледяного покрытия / Васильев Н.К., Моисеев В.И., Марьяхин С.А., Касья-нов В.А., опубли. 29.02.92. № 8.

4. АС № 1600406 СССР МКИ E02B7/06. Способ возведения грунто-вой плотины мерзлого типа / Васильев Н.К., Разговорова Е.Л., Шаталина И.Н., Портнягин Л.Г., Сидоров М.П., опубли.05.12.88.

5. АС №1548307 СССР МКИ E01C9/00. Способ создания зимней дороги/Моисеев В.И., Васильев Н.К., Ляпин В.Е., Касьянов В.А.,опубл. 07.03.90. Бюл. № 9.

6. АС № 1476062 СССР МКИ E02B17/00. Способ возведения мор-ской ледяной платформы / Васильев Н.К., Моносов Л.М., Трегуб Г.А., Белло Т.В., опубли. 30.04.89.Бюл.16.

7. АС №1388674 СССР МКИ F25C1/12.Способ формирования ледя-ного покрытия естественного водоема / Васильев Н.К., Белло Т.В., Моисе-ев В.И., опубли.15.04.88. Бюл.№ 14.

8. АС № 1346921 СССР МКИ F25C3/04.Способ создания ледяного по-крытия на поверхности водоема / Васильев Н.К., опубли.23.10.87. Бюл.№ 39.

9. АС № 1249277 СССР МКИ F25C1/12. Способ формирования уп-рочненного льда / Моисеев В.И., Панюшкин А.В., Васильев Н.К., опубли. 07.08.86. Бюл. № 29.

Типография ООО «Наша Марка»
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.
Объем 1,0 п. л. Тираж 100. Заказ 18.