

На правах рукописи
УДК 621.581

Разомасов Николай Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХОЛОДИЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ НАМОРАЖИВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВОДНОГО ЛЬДА**

05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: доктор технических наук, Гончарова Галина Юрьевна, профессор кафедры Холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: Цветков Олег Борисович, доктор технических наук, Профессор кафедры Теоретические основы тепло и хладотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Мухин Константин Александрович, кандидат технических наук, заместитель главного инженера Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Защита состоится « ___ » _____ 2022 года в ___ ч. ___ мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус факультета «Энергомашиностроение», ауд. 314-Э (конференц зал).

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр. 1. Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

Белова О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Среди всех стран мира Россия занимает первое место по площади северных и арктических территорий, поэтому развитие Арктической зоне (АЗ) Российской Федерации является одной из приоритетных задач, поставленных руководством страны (Государственная программа «Социально-экономическое развитие АЗ Российской Федерации», Утверждена постановлением Правительства от 21 апреля 2014 года №366). Наибольшую актуальность имеют задачи по созданию объектов военно-промышленного и хозяйственного назначения, в том числе ледовых переправ, автозимников, припаев и взлётно-посадочных полос быстровозводимых аэродромов. Доставка в Арктику традиционных строительных материалов, особенно в районы, удалённые от Северного морского пути, связана с большими затратами. В то же время АЗ РФ располагает неограниченными запасами снега и льда, а также естественного холода. Однако, создание полноценного конструкционного материала на основе водного льда всегда ограничивала высокая хрупкость и низкая прочность ледовой матрицы.

Еще одним перспективным направлением является упрочнение ледовых массивов для спорта высших достижений: хоккея, конькобежного спорта, шорт-трека, фигурного катания, в том числе неплоскостных – для санного спорта и бобслея. Современные методы, разработанные для плоскостных спортивных сооружений с искусственным льдом, основанные на внесении в воду для заливки микродоз полимеров (ледовых модификаторов), в большей степени направлены на улучшение скользящих свойств льда. Прочностные характеристики получаемого льда в значительной степени зависят от распределения модифицирующих соединений по толщине массива и холодильно-технологических параметров его намораживания. При этом для ледовых полей с искусственным хладоснабжением фронт кристаллизации движется снизу вверх, вытесняя вводимые соединения к поверхности. При замораживании слоя воды за счёт естественного холода фронт кристаллизации движется сверху вниз, «запирая» внутри формируемого массива внесённые модификаторы, что принципиально изменяет эпюру распределения вносимых модификаторов. Поэтому актуальны исследования, позволяющие определить влияние холодильно-технологических режимов (ХТР) на физико-механические свойства модифицированного льда. Они позволят получить необходимую базу данных и разработать алгоритмы формирования ледовых покрытий в Арктике во всём реальном диапазоне климатических условий. Не менее актуально и развитие существующих технологий упрочнения спортивных ледовых массивов для дальнейшего обновления мировых рекордов и улучшения их эксплуатационных характеристик.

Цель работы: Исследование влияния холодильно-технологических режимов намораживания на физико-механические свойства водного льда и разработка на его основе алгоритмов структурирования модифицированных ледовых покрытий с повышенными прочностными свойствами для Арктической зоны РФ.

Основные задачи работы:

1. Разработка методики лабораторного моделирования процессов льдообразования при встречном движении фронтов кристаллизации и проведение

экспериментов по структурированию ледовых образцов в климатических условиях, идентичных Арктической зоне (АЗ) РФ.

2. Исследование зависимости скорости движения фронтов кристаллизации от холодильно-технологических режимов намораживания ледовых образцов: температуры и скорости движения воздуха.

3. Исследование зависимости прочностных свойств ледовых образцов от скорости сближения фронтов кристаллизации при применении модифицирующих соединений. Решение оптимизационной задачи с позиции главной целевой функции - упрочнения льда.

4. Разработка математической модели льдообразования в условиях одномерного разнонаправленного отвода теплоты в процессе кристаллизации слоя жидкости.

5. Создание алгоритма для вычисления параметров кристаллизации в условиях одномерного разнонаправленного отвода теплоты. Проведение вычислительных экспериментов по определению параметров кристаллизации при различных холодильно-технологических режимах намораживания.

6. Исследование прочностных свойств ледовых образцов при использовании двух факторов упрочнения: добавления модифицирующих добавок и армирования.

7. Разработка алгоритмов структурирования упрочнённых ледовых покрытий в зависимости от параметров окружающей среды в АЗ РФ и от вида разрушающей нагрузки на спортивных ледовых объектах.

Научная новизна.

1. Впервые в результате решения оптимизационной задачи для диапазона температур и скоростей движения воздуха, характерных для Арктической зоны (АЗ) РФ, определён интервал скоростей кристаллизации в условиях естественного льдообразования, обеспечивающий наибольшее увеличение прочностных свойств.

2. Получены критерии отбора модифицирующих соединений и армирующих материалов для условий естественного льдообразования при отводе теплоты к окружающему воздуху.

3. Получены новые экспериментальные данные, подтверждающие упрочнение льда до 2-2,5 раз при внесении модифицирующих соединений и определён диапазон их концентраций во вносимой смеси, соответствующий максимальному упрочнению ледовой структуры.

4. Разработана математическая модель, позволяющая, исходя из реальных климатических условий, определять режимные параметры структурирования льда, обеспечивающие его максимальное упрочнение.

5. Впервые разработаны алгоритмы структурирования ледовых покрытий с повышенными прочностными свойствами в зависимости от параметров окружающей среды для применения в АЗ РФ.

Практическая значимость.

1. Разработана и апробирована методика управления холодильно-технологическими режимами для увеличения **на порядок** прочности материалов на

основе водного льда при использовании модифицирующих соединений и армирующих волокон.

2. Разработаны и проверены в лабораторных условиях алгоритмы формирования ледовых массивов с повышенными эксплуатационными характеристиками, в том числе взлётно-посадочных полос и посадочных площадок в целях создания и поддержания развитой авиационной инфраструктуры в Арктической зоне РФ.

3. Разработаны и апробированы технологии формирования ледовых массивов с повышенными прочностными свойствами для спортивных объектов с наибольшими разрушающими воздействиями на лёд при отводе теплоты к окружающему воздуху: санно-бобслейных трассах и хоккейных полях.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения и высокой воспроизводимостью полученных результатов. При выполнении исследования использовались расчётно-аналитические методы, применялись методы математического моделирования, статистической обработки экспериментальных данных с применением специализированных компьютерных программ.

На защиту выносятся.

1. Методика проведения экспериментальных исследований процессов льдообразования при встречном движении фронтов кристаллизации с использованием климатической камеры, обеспечивающей параметры, близкие к реальным для Арктической зоны (АЗ) РФ ($T = -50 \dots -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $V = 2 \dots 10 \text{ м/с}$).

2. Экспериментальные данные прочностных характеристик модифицированных ледовых образцов в пределах $-50 \dots -10 \text{ }^\circ\text{C}$ и скоростях воздушной среды от 2 до 10 м/с.

3. Экспериментальные данные, подтверждающие увеличение прочностных свойств льда до 2-2,5 раз при внесении модифицирующих соединений в оптимальном диапазоне концентраций от 150 до 300 ppm, и увеличение прочностных свойств льда до 10 раз при совместном внесении модифицирующих соединений и применении армирования базальтовыми волокнами.

4. Критерии отбора модифицирующих соединений и армирующих материалов для условий льдообразования при отводе теплоты к окружающему воздуху.

5. Математическая модель расчёта режимных параметров наморозки и алгоритмы структурирования упрочнённых ледовых покрытий для использования в АЗ РФ.

Апробация работы. Результаты данной работы докладывались и обсуждались на 24-м Конгрессе международного института холода IIR (Йокогама, Япония, 2015 г.); Четвертой Всероссийской конференции с международным участием ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА-2017 (Санкт-Петербург, 2017 г.); Научно-технической конференции с международным участием "Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу: ретроспектива эволюции или будущего зов?" (Санкт-Петербург, 2019 г.); 25-м Конгрессе международного института холода IIR (Монреаль, Канада, 2019 г.), III Международной научно-технической конференции "Материалы, технологии и техника для освоения Арктики и Сибири"

(Томск, 2019 г.), XV Всероссийской научной конференции в Межведомственном центре аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук (МЦАИ РАН) «Технологии и материалы для экстремальных условий» (Москва, 2020 г.). Результаты исследования получены при поддержке проектов РНФ № 18-13-00392 и РФФИ № 20-08-00120.

Личный вклад автора. Автором сформулированы критерии отбора модифицирующих полимеров и армирующих элементов для увеличения прочности получаемых ледовых покрытий. Разработана методика моделирования процессов льдообразования в АЗ РФ с использованием климатических камер с искусственным хладоснабжением. Проведены серии экспериментов по структурированию ледовых образцов. Изучена зависимость прочностных свойств ледовых покрытий от ХТР их структурирования. Определены алгоритмы создания ледовых покрытий в условиях АЗ РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 16 в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и МБД.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 154 страницах текста, содержит 98 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 82 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость темы исследования. Сформулирована цель диссертационной работы.

В **главе 1** представлен обзор и анализ материалов, посвященных применению льда в различных областях, изучению его физико-механических свойств и влияния параметров кристаллизации на эти свойства.

Описано множество примеров использования льда для возведения различных сооружений: дорог, переправ и припаев, жилья, объектов хранения продуктов - ледников. Во времена Великой Отечественной войны лёд использовали для создания защитных валов, усиления танковой брони и транспортных путей по льду Ладожского озера и Финского залива - Большой и Малой дорог жизни. В большинстве приведенных примеров водный лед использовался совместно с различными наполнителями и армирующими элементами, увеличивающими конечную прочность композита за счёт собственной прочности. Обзор показал, что на данный момент отсутствуют научные исследования, посвященные всестороннему изучению взаимодействия армирующих элементов и ледовой матрицы под действием нагрузки и улучшению адгезии армирующих элементов с ледовой матрицей. При этом не обнаружено работ по исследованию совокупного влияния скорости, направления движения фронта (или фронтов) кристаллизации, а также химического состава используемой жидкости на механические свойства льда. Проведен анализ результатов современных исследований, показавший, что механические свойства льда естественных ледовых массивов в нескольких метрах друг от друга могут кратно отличаться, что частично объясняет отсутствие корреляции данных различных авторов. Поэтому аппроксимация и использование в

инженерных расчётах данных, полученных в различных экспериментах, некорректны, а приведённые данные валидны исключительно для условий конкретных опытов. Однако модифицированные спортивные ледовые массивы с искусственным хладоснабжением имеют более упорядоченную и однородную кристаллическую структуру. Таким образом необходима адаптация существующих технологий модифицирования льда к условиям Арктической зоны (АЗ) РФ при отводе теплоты к окружающему воздуху, а также корректировка состава и концентраций вводимых соединений. Решение этой задачи позволит создавать ледовые массивы с повышенными прочностными свойствами, высокой степенью однородности кристаллической структуры и откроет широкие перспективы для применения композиционных материалов на основе водного льда в северных районах РФ.

В главе 2 представлена методика проведения экспериментальных исследований и приведены полученные результаты. В 2.1 обоснован выбор режимов намораживания и приведена разработанная методика. В отличие от систем с искусственным хладоснабжением, в естественных условиях скорость движения воздуха и температура окружающей среды не могут задаваться и регулироваться, а управляемыми параметрами процесса намораживания остаются только температура и толщина разливаемого слоя жидкости, а также временной интервал между разливом слоёв жидкости. Отработка режимов намораживания упрочнённых ледовых покрытий в условиях естественного холода в работе проводилась в климатических камерах с искусственным хладоснабжением, обеспечивающих диапазон погодных условий АЗ РФ: скорость воздуха - 2...10 м/с; температура воздуха - 50...-10 °С. В климатических камерах реализовывался двойной механизм теплоотвода, характерный для Арктической зоны: к воздуху и к существующему ледовому основанию.

Параметры процесса кристаллизации фиксировались температурными датчиками, анемометрами и тепловизионной камерой. Были сконструированы и изготовлены два вида форм для проведения прочностных испытаний малых и масштабных ледовых образцов, замороженных при различных холодильно-технологических режимах (ХТР) (Рисунки 1, а и 1, б).

Образцы намораживались из дистиллята и растворов с модифицирующими соединениями, в различных сериях экспериментов жидкость наносилась слоями толщиной 2, 5 и 10 мм. По окончании процесса наморозки образцы испытывались на прочность по сертифицированной



а



б



в

Рисунок 1. Формы для наморозки образцов (а, б), сервогидравлическая испытательная машина Zwick/Roell Z100 (в)

методике на специализированной сервогидравлической испытательной машине Zwick/Roell Z100 (Рисунок 1, в.)

В 2.2 представлены результаты исследования влияния ХТР на скорость сближения фронтов кристаллизации в процессе структурирования ледовых образцов. Основной задачей этой части исследования являлось определение координаты встречи фронтов кристаллизации, так как внесённые модификаторы оттесняются внутрь образуемого слоя, и максимум их концентрации располагается в зоне встречи двух фронтов.

Экспериментально определенные зависимости скорости сближения фронтов кристаллизации от температуры и скорости движения воздуха в камере для различных толщин разливаемого слоя жидкости представлены на Рисунке 2. Для учёта степени охлаждения поверхности льда перед разливом последующего слоя была введена относительная температура Θ - отношение температуры поверхности льда перед заливкой следующего слоя к температуре окружающей среды, выраженных в $^{\circ}\text{C}$. Так, при идентичных параметрах воздуха и толщине заливаемого слоя при значении $\Theta=0,25$ скорость сближения фронтов кристаллизации составляет около 60 % от значений при заливке последующего слоя на ледовую поверхность, охлаждённую до температуры окружающего воздуха ($\Theta=1$). Полученные данные необходимы для определения в последующем влияния скорости замораживания на прочностные характеристики получаемого льда, а также для прогнозирования времени формирования модифицированного ледового покрытия требуемой толщины в реальных климатических условиях.

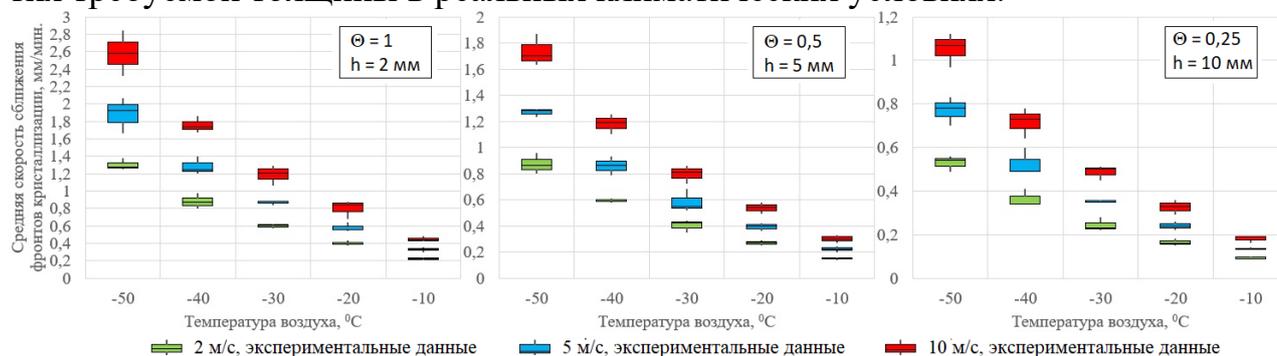


Рисунок 2. Влияние параметров ХТР на скорость сближения фронтов кристаллизации.

В разделе 2.3 проведён анализ критериев отбора модифицирующих соединений, применяемых на спортивных объектах, и предложены новые критерии с учётом особенностей формирования ледовых покрытий в арктических условиях.

В 2.4 представлены результаты исследования влияния скорости кристаллизации и суммарной концентрации модификаторов на прочностные свойства ледовых образцов при испытаниях на изгиб. Погрешность измерений на испытательной машине Zwick/Roell Z100 не превышала 0,25% от величины нагрузки и 0,2 мкм при измерении деформации образца. Было установлено, что внесение смесей модификаторов в составе сверхмелкодисперсного политетрафторэтилена (ПТФЭ), кремнийорганических микроэмульсии, каучука и масла в различных долевых соотношениях позволяет увеличивать его прочностные характеристики по сравнению с дистиллятом в 1,8-2,2 раза, а значения деформации до разрушения образцов в 1,2-1,8 раз (Рисунок 3, а). Анализ показал, что зависимость

максимального напряжения при изгибе от концентрации модификаторов имеет экстремум, характерный для всех исследованных ХТР: максимальное увеличение предела

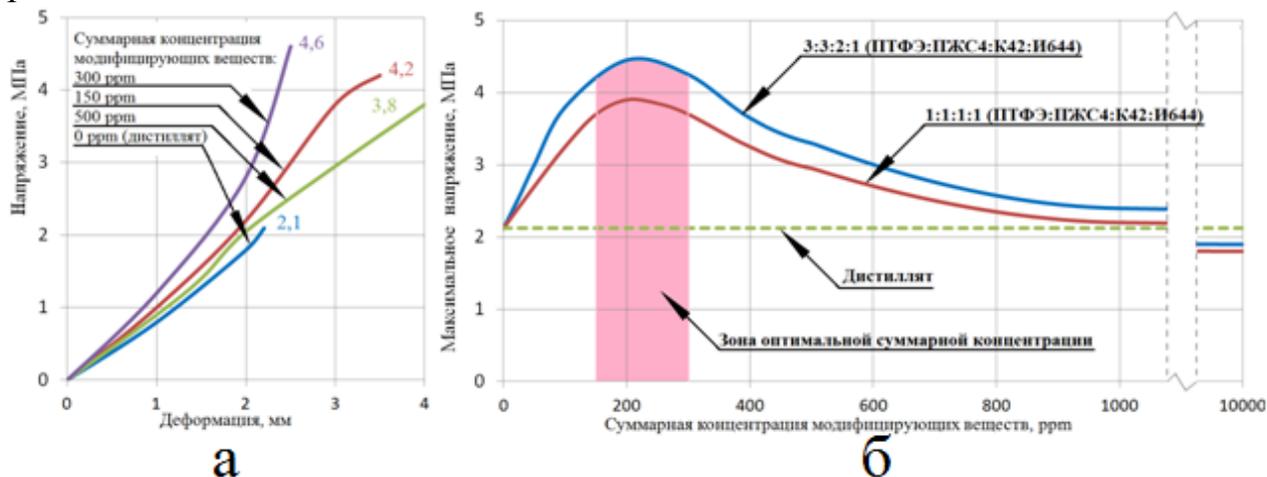


Рисунок 3. Кривые нагружения модифицированных образцов (а), зависимость максимального напряжения от концентрации модификаторов (б). прочности достигается в интервале 150-300 ppm (Рисунок 3, б). Следует отметить, что зона максимума прочностных свойств достаточно широкая, характер кривой $\sigma_{\max}=f(\Sigma_{\text{конц}})$ пологий, и незначительные отклонения от оптимального значения не приводят к существенному снижению максимального напряжения до разрушения создаваемого ледового покрытия.

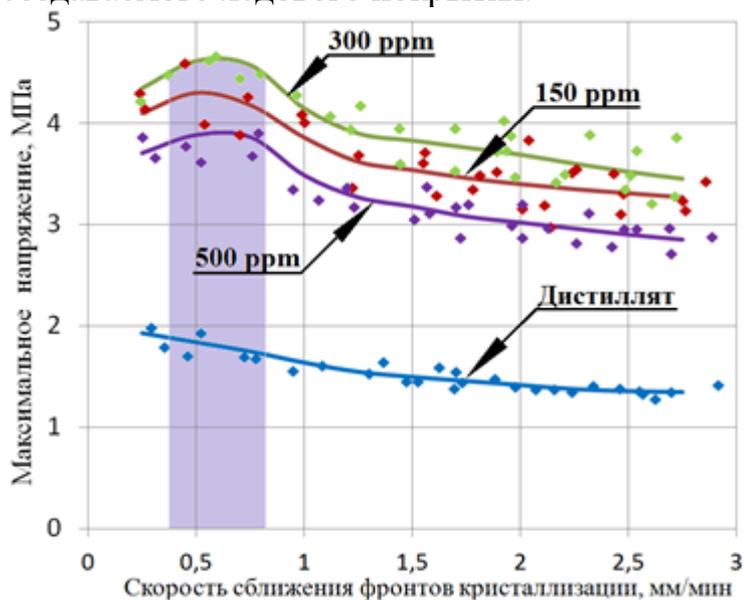


Рисунок 4. Зависимость максимального напряжения от скорости сближения фронтов кристаллизации для различных концентраций модификаторов.

мм/мин. сопровождалось снижением предела прочности на изгиб до 3-3,5 МПа (на 30-35 %). Наличие экстремума объясняется противоположным действием двух факторов. При высоких скоростях кристаллизации образуется большее число дефектов кристаллической решётки (дефектов Бьеррума), ослабляющих прочность ледовой матрицы. С другой стороны, при длительном застывании

Экспериментами подтверждено влияние ХТР намораживания на прочностные характеристики модифицированных ледовых образцов. Максимальное упрочнение в 2- 2,3 раза по сравнению с дистиллятом достигалось при скоростях движения фронта кристаллизации в диапазоне 0,4..0,8 мм/мин., предел прочности на изгиб составлял 3,9 МПа при концентрации смеси модификаторов $\Sigma_{\text{конц}}=500$ ppm, 4,4 МПа при $\Sigma_{\text{конц}}=150$ ppm и 4,6 МПа при $\Sigma_{\text{конц}}=300$ ppm (Рисунок 4). Увеличение скоростей движения фронта до ~ 2,5

1. Горизонтальные размеры слоя воды существенно превосходят толщину разливаемого слоя, поэтому пренебрегая краевыми эффектами, считаем задачу одномерной.

2. В начальный момент времени температурное распределение в существующем ледовом массиве представляет собой линейную зависимость от температуры поверхности льда $t_{п.л.}$ до температуры основания льда $t_{осн.л.}$.

3. Температура нижней границы моделируемого ледового массива постоянна и составляет $t_{осн.л.}$.

4. Теплообмен на границе раздела жидкость - воздух и лед - воздух происходит только с использованием механизма конвективного переноса.

5. Теплоперенос в ледовом массиве происходит только с использованием механизма теплопроводности.

6. Теплоперенос в слое жидкости происходит с использованием механизмов теплопроводности и конвекции.

7. Испарением с поверхности разлитой жидкости пренебрегаем в виду быстрого образования корки льда.

8. Фазовый переход происходит при постоянной температуре фазового перехода T^* .

Решаемая задача представляет собой частный случай задачи Стефана, описывающей изменение фазового состояния вещества, при котором положение границы раздела фаз изменяется во времени. Единое уравнение теплопроводности для двух фаз можно записать в виде:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} grad T \right) = div(\lambda grad T) + f \quad (1)$$

где c - теплоёмкость, ρ - плотность, \vec{v} - скорость движения среды, λ - коэффициент теплопроводности, T - температура, τ - время, f - источниковый член, выражающий наличие внутренних источников/стоков теплоты.

Система уравнений в задаче кристаллизации единичного слоя льда приобретает следующий вид, где T_{it} - постоянная температура нижней границы, T^* - температура фазового перехода, T_a - температура воздуха, x_i - координата границы раздела фаз, α - коэффициент теплоотдачи, L - теплота фазового перехода, индекс 1 соответствует льду, индекс 2 - жидкости:

Уравнения энергии:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3)$$

Краевые условия:

$$T(x) \Big|_{\tau=0} = kx + b \quad (4)$$

$$T \Big|_{x=0} = T_{it} < T^* \quad (5)$$

$$x = l \rightarrow$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_a - T(l)) \text{ при } T \geq T^* \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha(T_a - T(l)) \text{ при } T < T^* \\
 -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} + L \frac{dx_i}{dt} &= -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Уравнение теплопроводности (1) лежит в основе эффективных вычислительных процедур приближенного решения задачи Стефана. Скорость движения фронта в рассматриваемом процессе низкая, градиент решения вблизи фронта значителен, поэтому возникла необходимость в адаптивных сетках для корректного учёта таких особенностей. В качестве вычислительного инструмента был выбран метод Пракаша, используемый для расчета процесса фазового перехода с учетом количества теплоты, изменяющей соотношения между фазами. Фазовый переход рассматривался как процесс внутри контрольного объема, изменяющий долю жидкой фазы χ_f в нём (для жидкости $\chi_f = 1$). Поскольку движение фронта кристаллизации происходит в нестационарном процессе, то доля жидкой фазы при переходе к следующему моменту времени определяется как:

$$\chi_f^{j+1} = \chi_f^j - \frac{c(T^* - T_{cv}^{j+1})}{L},
 \tag{8}$$

где верхние индексы соответствуют моментам времени, T_{cv} - температура в центре контрольного объема.

Распределение температуры в численном решении находится, с учётом теплоты фазового перехода:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \frac{\rho L(\chi_f^j - \chi_f^{j+1})}{\Delta \tau},
 \tag{9}$$

где последнее слагаемое отражает количество выделившейся или поглощённой теплоты, пропорциональное изменению содержания жидкости в контрольном объёме. При этом разбиение расчётного пространства на ячейки задавалось в соответствии с фиксированным коэффициентом линейного расширения.

Минимальный размер ячеек по вертикали в разливаемой воде и верхнем слое льда обусловлен протеканием в этой области фазового перехода, при этом дальнейшее уменьшение размера ячеек не приводило к изменению результатов расчёта. Введение линейного расширения в нижней зоне позволило значительно (с десятков до единиц часов) снизить время проведения расчётов без существенного изменения результатов. Далее производилась отладка кода

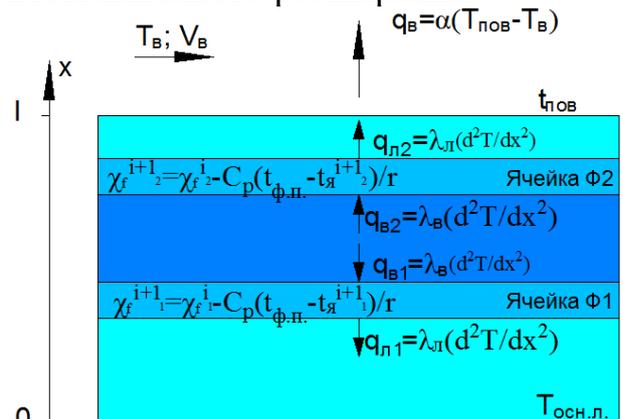


Рисунок 6. Схема тепловых потоков в расчётных ячейках.

программы с целью достижения сходимости на каждом шаге. Подбирались: параметр, определяющий максимальное относительное отклонение результата расчета от предыдущей итерации внутри одного шага; количество итераций расчета внутри одного шага и продолжительность шага расчета. Выбранные значения указанных параметров позволили рационально настроить вычисления.

В качестве начальных условий для решения задачи были использованы следующие данные:

- Температура ледового массива на верхней плоскости совпадает с температурой воздушной среды и составляет: -50, -30, -10 °С
- Температура ледового массива на нижней плоскости поддерживалась неизменной и составляла = -5°С
- Температура заливаемой воды = 50 °С
- Толщина заливки : 2, 5, 10 мм
- Скорость движения воздуха: 2, 5, 10 м/с

Были проведены расчёты единичных заливок для 27 комбинаций температуры окружающей среды, скорости движения воздуха и толщины разливаемого слоя воды. Также были проведены расчёты многослойных заливок для 27 комбинаций температуры окружающей среды, скорости движения воздуха и толщины разливаемого слоя воды. Для каждого из 27 вариантов расчёт проводился в несколько подходов:

- рассчитывался процесс кристаллизации единичного слоя. По результатам расчёта определялось время и координата схождения фронтов кристаллизации разлитого слоя;
- полученное в предыдущем расчёте время кристаллизации залитого слоя увеличивалось на 10 %, таким образом задавалось время начала заливки следующего слоя воды;
- рассчитывался последовательный процесс кристаллизации двух разлитых слоёв. По результатам расчёта определялось время и координата схождения фронтов кристаллизации второго разлитого слоя;
- по такому же алгоритму проводились расчёты пяти последовательно разливаемых слоёв.

В результате каждого расчётного цикла определялся массив данных, отображающих температурное распределение по высоте расчётной области. Полученные данные использовались при разработке алгоритма формирования ледовых массивов с повышенными эксплуатационными характеристиками в климатических условиях АЗ РФ.

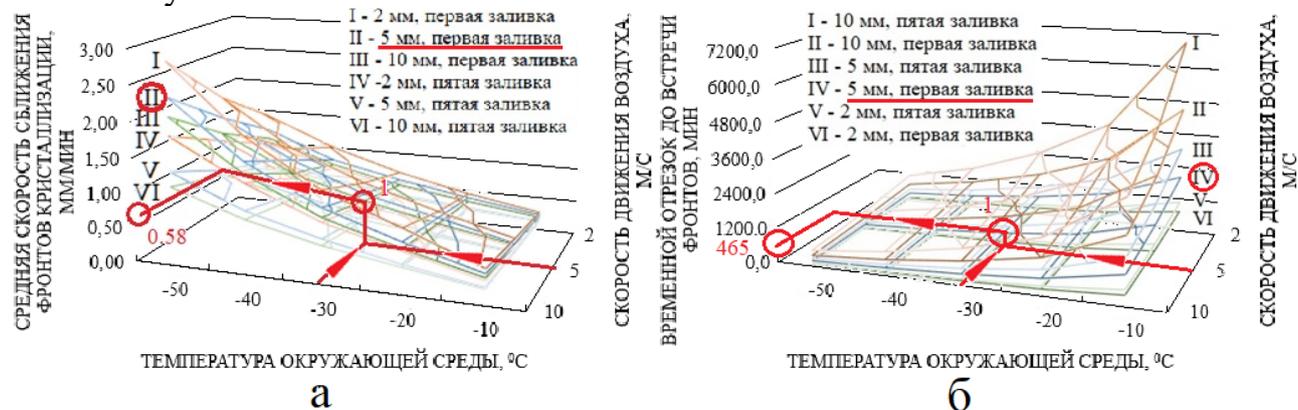


Рисунок 7. Средняя скорость сближения фронтов кристаллизации (а), временной отрезок до встречи фронтов (б).

На Рисунке 7 представлены результаты моделирования средней скорости сближения фронтов для с учётом подплавления льда. Зона оптимальных

скоростей сближения фронтов кристаллизации, определенная в главе 2, составляет 0,4..0,8 мм/мин. В качестве входных данных используются текущие и прогнозные значения температуры и скорости воздуха $T_a = f(t)$ и $V_a = f(t)$. Так, для $T_a = -20\text{ }^\circ\text{C}$ и $V_a = 5\text{ м/с}$ оптимальная скорость сближения фронтов ($\sim 0,6\text{ мм/с}$) достигается при толщине разливаемого слоя $h=5\text{ мм}$ (точка 1 на Рисунке 7, а). По этим данным определяем временной отрезок до встречи фронтов для этих же параметров, составляющий 465 с - точка 1 на Рисунке 7, б.

Используя данные, представленные на Рисунке 4, определяется максимальное напряжение в образце, замороженном при заданных ХТР. По этим значениям определяется несущая способность создаваемого ледового массива. В совокупности эти данные позволяют определить продолжительность намораживания льда требуемой толщины в реальных погодных условиях. Схематично алгоритм формирования ледовых массивов с повышенными эксплуатационными характеристиками в климатических условиях АЗ РФ представлен на Рисунке 8.

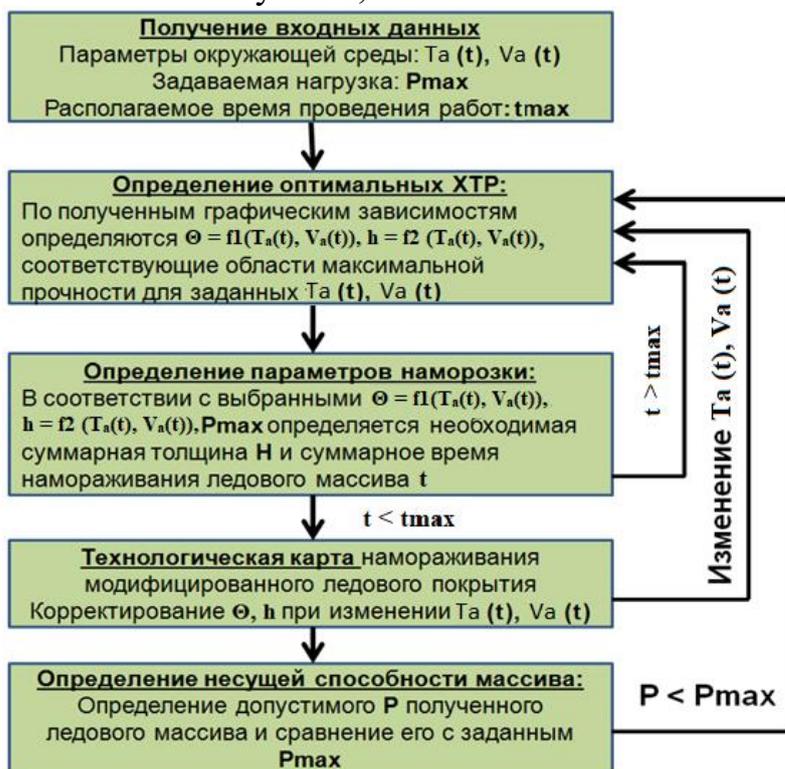


Рисунок 8. Алгоритм формирования ледовых массивов с повышенными прочностными свойствами в условиях АЗ РФ.

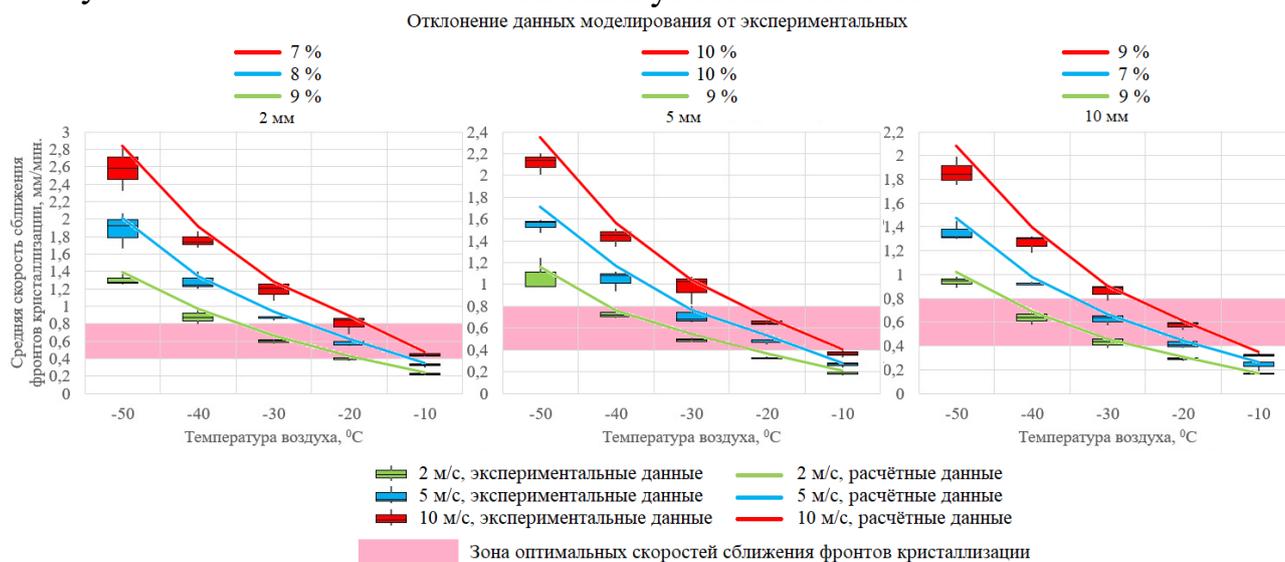


Рисунок 9. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования скорости сближения фронтов кристаллизации.

Адекватность разработанной расчётной модели подтверждается сопоставлением с результатами исследований, проведённых в климатической камере

(глава 2). Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало, что отклонение по времени встречи фронтов кристаллизации не превышало 7-10 % (Рисунок 9). Таким образом, представленная модель позволяет рассчитывать время кристаллизации и охлаждения единичного слоя льда и прогнозировать суммарное время формирования модифицированного ледового покрытия заданной толщины в зависимости от климатических условий.

В главе 4 представлены результаты исследования совместного воздействия на свойства ледового массива ХТР, химической модификации и механического армирования, а также апробации алгоритма формирования ледовых массивов с повышенными эксплуатационными свойствами на санно-бобслейных трассах (СБТ) и хоккейных полях.

В разделе 4.1 представлены анализ и систематизация современных методов армирования льда и предложены критерии выбора армирующих материалов с точки зрения достижения максимальных прочностных характеристик формируемых ледовых покрытий:

1. Высокая собственная прочность армирующего материала;
2. Жёсткость армирующего материала, не превышающая жёсткости ледовой матрицы;
3. Максимальное отношение смоченной площади армирующих элементов к их суммарной массе;
4. Существенно большая длина армирующих элементов по сравнению с шириной и высотой;
5. Максимальная адгезия армирующего материала к ледовой матрице.

В наибольшей степени удовлетворяют данным критериям различные волокнистые материалы: стекловолокно, углеволокно, арамидные и базальтовые волокна. По результатам проведённых экспериментов наибольшую прочность показали образцы, армированные базальтовыми и арамидными волокнами. Наибольший прирост прочности был достигнут при использовании базальтовых волокон за счёт их структуры и большого числа отдельных волокон в одном ровинге.

Влияние ХТР на адгезию волокон к ледовой матрице определялось в серии экспериментов, в которых волокна вмораживались при различной температуре воздушной среды с последующим определением силы адгезионного взаимодействия по динамическому усилию, необходимому для их извлечения из сформированного образца. Исследование влияния ХТР на прочность модифицированных и армированных ледовых композитов на изгиб проводилось на испытательной машине Zwick/Roell Z100. ХТР при заморозке сравниваемых образцов выдерживались идентичными. Для одной группы образцов армирующие элементы вмораживались непосредственно после кристаллизации разлитого слоя жидкости, для другой группы образцов после охлаждения ледовой поверхности до температуры воздуха в климатической камере. В результате было установлено, что средняя прочность образцов из первой группы более, чем на 12% превышает прочность на изгиб второй группы образцов, армируемых при более низкой температуре. Анализ экспериментальных результатов показал, что для всех волокнистых материалов

адгезия возрастает с повышением температуры вмораживания и снижением скорости движения фронтов кристаллизации.

В разделе 4.2 представлены результаты исследования совместного воздействия на свойства ледового массива ХТР, химической модификации и механического армирования. На Рисунке 10, а черной линией в качестве базы для сравнения показана кривая нагружения для неармированного образца из дистиллята. Красная линия - кривая нагружения армированного одним слоем базальтового ровинга образца из дистиллята. Фиолетовой линией обозначена кривая нагружения для образца, модифицированного смесью ПТФЭ, кремнийорганических микроэмульсии, каучука и масла в соотношении 3:3:2:1. Синей линией показана кривая нагружения образца, армированного одним слоем базальтового ровинга, размещённого в зоне растяжения, и модифицированного аналогичной смесью модификаторов. Зеленой линией обозначена кривая нагружения для образца, армированного тремя слоями базальтового ровинга, размещёнными в зоне растяжения, и модифицированного аналогичной смесью модифицирующих соединений. Площадь под кривыми нагружения характеризует величину работы разрушения каждого из ледовых образцов. Можно видеть, что внесение модифицирующих соединений приводит к увеличению максимальной прочности на изгиб более, чем в 2 раза, а работы разрушения – в 4 раза по сравнению с дистиллятом. Армирование одним слоем базальтового волокна приводит к увеличению максимальной прочности до 9 МПа и возрастанию работы разрушения в 30 раз.

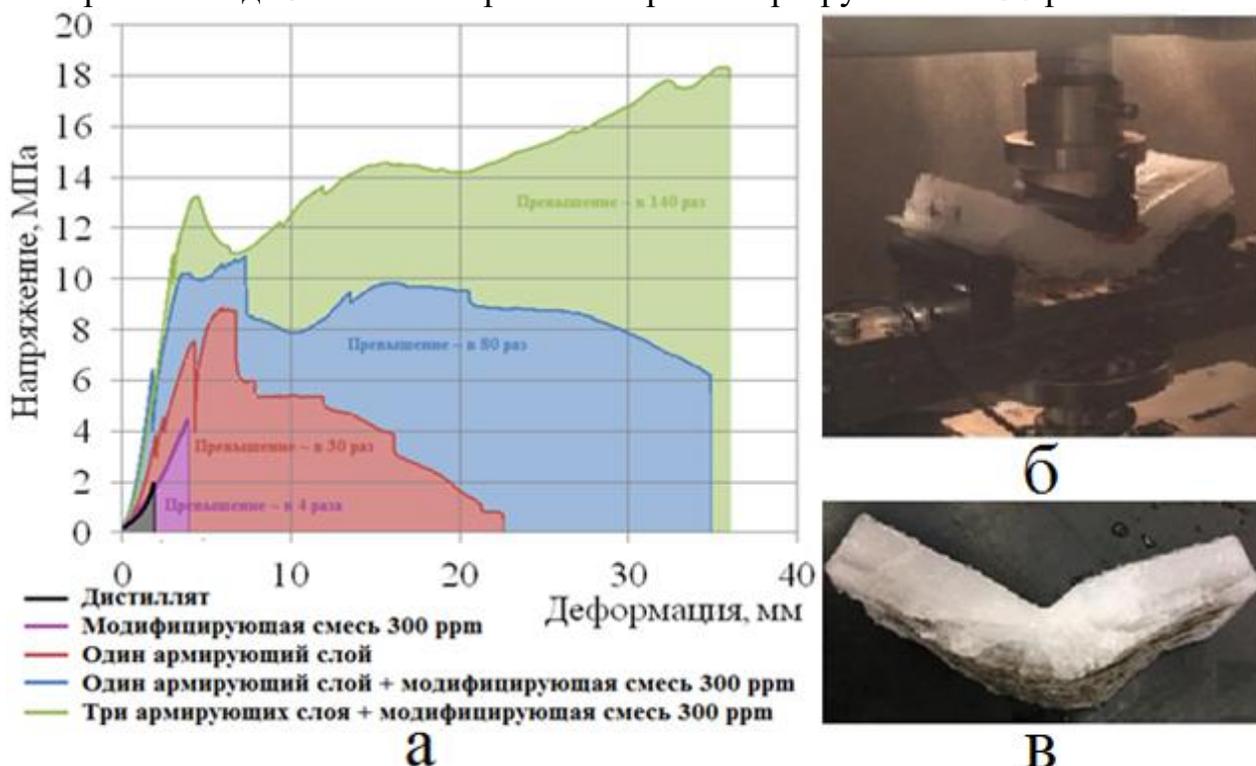


Рисунок 10. Испытания модифицированных образцов с армированием:

а - кривые нагружения, б - испытательная машина, в - сохранение целостности образца после разрушения ледовой матрицы.

При совместном использовании модификации и однослойного армирования максимальное напряжение в образце достигает уже ~ 11 МПа, а несущая способность образца сохраняется на уровне 8-9 МПа при деформациях, превышающих

значение 30 мм. При этом работа разрушения возрастает в 80 раз по сравнению с дистиллятом. Модификация и трехслойное армирование позволяют еще больше увеличить максимальное напряжение в образце в процессе проведения испытаний (до 18 МПа), причем достигается оно при максимально возможной в эксперименте деформации ~ 35 мм. Работа, затраченная к этому моменту, превышает работу разрушения образца из дистиллята в 140 раз.

На Рисунке 10 показан также внешний вид образца во время испытаний (б) и после снятия нагрузки (в).

В разделе 4.3 приведены алгоритмы формирования неплоскостного ледового массива, апробированного на санно-бобслейной трассе (СБТ) в п. Красная Поляна, и верхней зоны массива хоккейного поля. Полозья бобов-четверок оказывают наибольшее (более 2 МПа) силовое воздействие на ледовое покрытие бетонного жёлоба. Поэтому способ нанесения и суммарная концентрация вносимых модификаторов на СБТ принципиально отличаются от традиционных ледовых катков. Суммарная концентрация используемых веществ на различных участках СБТ от 5 до 8 раз превышает суммарную концентрацию на ледовых аренах.

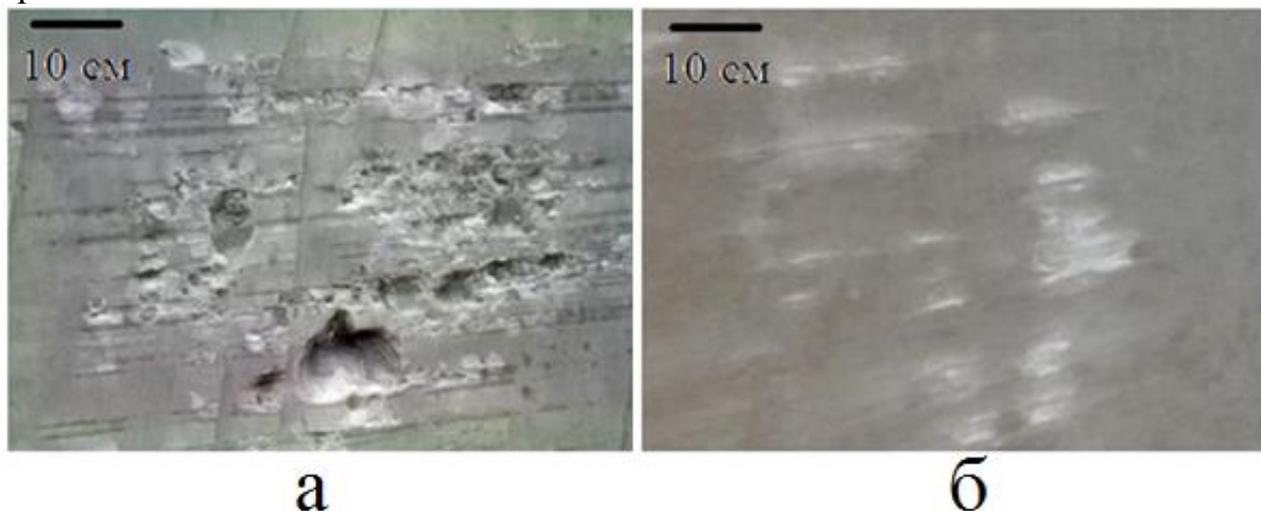


Рисунок 11. Разрушение поверхности СБТ при использовании чистой (а) и модифицированной полимерами (б) жидкости.

Применение разработанной технологии позволило снизить хрупкое разрушение ледового покрытия (Рисунок 11), существенно увеличить, как прочность, так и скользящие свойства ледового покрытия, и, как следствие, сократить время прохождения трассы практически всеми спортсменами в интервале от 1,5 до 4 %.

Для верхней зоны хоккейного ледового покрытия также необходимо увеличение в 1,5-2 раза суммарной концентрации вносимых ингредиентов по сравнению со льдом для фигурного катания и изменение долей в составе смеси ПТФЭ, микроэмульсий и масел до соотношения 4:4:1. В дальнейшем, при структурировании ледовых массивов на открытых аренах, эксплуатирующихся при отрицательных температурах, было установлено, что в условиях разнонаправленного отвода теплоты необходимо увеличить количество вносимых пластифицирующих соединений на 20-30% относительно крытых ледовых арен с аналогичными эксплуатационными нагрузками.

Основные выводы и результаты.

1. Разработана методика лабораторного моделирования процессов льдообразования при встречном движении фронтов кристаллизации, позволяющая адекватно воспроизводить арктические условия. Проведены эксперименты по структурированию ледовых образцов в идентичных условиях при воспроизведении требуемого диапазона климатических условий АЗ РФ.

2. Получены зависимости скорости движения фронтов кристаллизации от ХТР намораживания (температуры и скорости движения воздуха), толщины разливаемого слоя, времени между разлитием жидкости.

3. Определён диапазон скоростей сближения фронтов кристаллизации, соответствующий максимуму прочностных свойств формируемого ледового покрытия: 0,4..0,8 мм/мин. Установлено, что зависимость прочности от суммарной концентрации модифицирующих соединений имеет экстремум: максимальные значения достигаются при 200..300 ppm. Использование модифицирующих смесей в рекомендуемом диапазоне концентраций увеличивает предел прочности в 2-2.5 раз в сравнении со льдом из дистиллированной воды.

4. Разработана физическая модель процесса льдообразования в условиях одномерного разнонаправленного отвода теплоты в процессе кристаллизации слоя жидкости.

5. В программном пакете PHOENICS решена задача Стефана с неопределенной границей и разнонаправленным отводом теплоты. На основании результатов проведенных вычислительных экспериментов установлено, что отклонение по времени встречи фронтов кристаллизации не превышало 7-10 %. Предложенная модель адекватно описывает процесс льдообразования в условиях одномерного разнонаправленного отвода теплоты.

6. Применение модифицирующих соединений и армирующих волокон при структурировании ледовых образцов позволило увеличить до **10 раз** несущую способность льда, в 15-20 раз (до **2000%**) деформацию до разрушения образца, в **100-150 раз** работу разрушения образца.

7. Разработаны алгоритмы структурирования ледовых покрытий с высокими разрушающими нагрузками, позволяющие выбирать параметры заливки в зависимости от климатических условий.

Основные публикации автора:

1. Гончарова Г.Ю., Устюгова Т.Г., Разомасов Н.Д. Особенности распределения высокомолекулярных соединений в ледовых структурах спортивных объектов как одна из задач прикладной физики кристаллизации // Холодильная техника. 2015. № 6. С. 26-33. (1 п.л./0,35 п.л.).

2. Исследование возможностей снижения фрикционного взаимодействия в паре "конек-лед" путем модификации структуры обеих контактирующих поверхностей / Разомасов Н.Д. [и др.] // Вестник РФФИ. 2015. № 3(87). С.45-53. (1,125 п.л./0,3 п.л.).

3. Experimental study of heat and mass transfer in modified ice structures resulted from diffusion of polymeric compounds used for sports ice objects / Razomasov N.D. [et al.] // Refrigeration Science and Technology: 24th IIR International Congress of Refrigeration, ICR 2015. 2015. P. 1099-1106. (1 п.л./0,25 п.л.).

4. Новые аспекты развития ледовых и лазерных технологий для спорта высших достижений / Разомасов Н.Д. [и др.] // Холодильная техника. 2016. № 12. С. 36-43. (0,85 п.л./0,15 п.л.).
5. Physicomechanical Properties of Glacial Composite Materials Reinforced by Rusal-S Fibers / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic materials: Applied Research. 2018. Т. 9. №. 1. P. 114-120. (0,875 п.л./0,15 п.л.).
6. Influence of reinforcing plant fillers on the strength properties of composite materials with an ice matrix / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Т. 10. №. 4. P. 786-793. (1 п.л./0,2 п.л.).
7. Experimental study of the impact of crystallization parameters on properties of modified and reinforced ice structures intended for sports facilities and the Arctic // Razomasov N.D. [et al.] // 25th IIR International Congress of Refrigeration. 2019. P. 1110-1117. (1 п.л./0,25 п.л.).
8. Освоение труднодоступных районов Арктической зоны: новые технологии упрочнения ледовых покрытий для транспортных узлов и коммуникаций / Разомасов Н.Д. [и др.] // Холодильная техника. 2019. № 11. С. 40-45. (0,75 п.л./0,15 п.л.).
9. Application of integrated fiber Bragg lattices for evaluating ice deformation / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Т. 11. №. 1. P. 55-60. (0,75 п.л./0,15 п.л.).
10. Effect of position and content of a basalt filler on the mechanical characteristics of composite materials based on an ice matrix / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Т. 11. №. 4. P. (0,875 п.л./0,2 п.л.).
11. Destruction of Reinforced Ice Composition Materials upon Bending Mechanical Loading / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Т. 11. №. 4. P. 941-946. (0,75 п.л./0,15 п.л.).
12. Studying Deformation of Ice Composite Materials Using Integrated Fiber-Optic Sensors / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Т. 11. №. 4. P. 996-1001. (0,75 п.л./0,1 п.л.).
13. Новые методы направленного воздействия на трибологические свойства материалов в контакте со льдом и снегом / Разомасов Н.Д. [и др.] // Российский химический журнал. 2020. Т. 64. №. 4. С. 57-66. (1,15 п.л./0,3 п.л.).
14. Study of Distribution of Deformations in Ice Composite Materials Using Integrated Fiber-Optic Sensors / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Т. 12. №. 1. P. 65-70. (0,75 п.л./0,1 п.л.).
15. Physicomechanical Properties of Ice Composite Materials Reinforced with Carbon Fillers / Razomasov N.D. [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Т. 12. №. 1. P. 236-241. (0,625 п.л./0,15 п.л.).
16. Chemically Modifying Ice and Ice-Based Materials to Control Their Properties / Razomasov N.D. [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. Т. 55. №. 5. P. 1045-1055. (1,375 п.л./0,4 п.л.).
17. Strengthening of ice with basalt materials / Razomasov N.D. [et al.] // Cold Regions Science and Technology. 2022. 103490. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103490> (1,625 п.л./0,3 п.л.).