

**Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана**

**На правах рукописи  
УДК 621.581**

**Устюгова Татьяна Геннадьевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ  
ЛЕДОВОЕ ПОКРЫТИЕ – ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА  
ПУТЁМ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАНЫХ СВОЙСТВ  
МОДИФИЦИРОВАННОГО 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**

*Устюгова*

**Москва, 2017**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: доктор технических наук  
Гончарова Галина Юрьевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Цветков Олег Борисович, заведующий кафедрой  
«Теоретических основ тепло- и хладотехники»,  
Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
оптики (Университет ИТМО)

кандидат технических наук  
Товарас Николай Вячеславович, генеральный  
директор ООО «НПФ «Химхолодсервис»

Ведущая организация: ФГБНУ «Всероссийский научно-  
исследовательский институт холодильной  
промышленности» (ВНИХИ)

Защита состоится « 14 » июня 2017 года в 14 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, 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](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу: 107005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5. Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент



Колосов М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Россия традиционно занимала ведущие позиции в зимних видах спорта, и стратегией развития физической культуры и спорта РФ предусматривается активное внедрение инновационных технологий для усиления своих позиций в спорте высших достижений и популяризации спорта среди населения. Технологии подготовки и эксплуатации льда представляют собой конкурентную среду для ведущих мировых держав, и в этой области востребованы самые современные научно-технические достижения. К настоящему моменту уже многократно апробировано и доказано существенное улучшение прочностных и скользящих свойств льда в результате реализации технологий, основанных на внесении микродоз полимерных соединений (ледовых модификаторов). Однако задача сохранения полученных свойств модифицированного ледового массива за счёт поддержания его химического состава при эксплуатации до сих пор остается нерешенной.

Кроме того, технология модифицирования льда относится к перспективным наукоемким технологиям в области низкотемпературной техники, обеспечивающим энергоэффективность работы оборудования. Упрочнение верхнего слоя льда позволяет поддерживать рабочую толщину льда на 20 мм меньше и, за счёт снижения термического сопротивления теплопередаче, существенно снижать эксплуатационные расходы ледовых арен. Холодильная система по данным Международной федерации хоккея потребляет до 50 % электроэнергии всего катка, составляющей за сезон от 700 до 7000 МВт·ч в зависимости от типа объекта. Таким образом, поддержание свойств модифицированного льда в течение сезона позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы ледовых арен с искусственной системой хладоснабжения.

Периодическая подрезка отработанных слоёв льда и заливка чистой водой приводит к удалению с поверхности внесённых модификаторов и постепенной утрате прочностных и скоростных свойства льда. Поддержание свойств ледового покрытия может осуществляться за счёт двух процессов: диффузии полимерных соединений из глубинных слоёв ледового массива и дополнительного внесения новых доз модификаторов. Поэтому исследование процесса переноса внесённых соединений в модифицированных ледовых структурах является основой создания технологии поддержания их свойств и обеспечения работы холодильного оборудования в более экономичных режимах.

Изменение естественных свойств льда внесением различных групп модифицирующих соединений актуально не только в спортивной индустрии. Создание ледяной матрицы повышенной прочности и пластичности на основе разработки новых композиционных материалов является одним из важных направлений федеральной программы развития Арктики. Решение этих задач также невозможно без изучения процессов переноса искусственно вносимых соединений в массиве льда.

**Цель работы.** Повышение энергоэффективности системы ледовое покрытие – холодильная установка в результате поддержания заданных физико-механических свойств модифицированных ледовых массивов при их эксплуатации.

**Научная новизна.**

1. Экспериментально подтверждено, что во всём рабочем интервале температур ледового объекта все группы вводимых модификаторов не претерпевают фазовых превращений, что приводит к дополнительному снижению тепловой нагрузки на холодильные машины.

2. Впервые доказана возможность поддержания прочностных и скользящих свойств ледовых покрытий за счёт рационального выбора параметров работы холодильной установки и воздействия на интенсивность процессов переноса в ледовом массиве.

3. Впервые получены экспериментальные данные о процессе переноса модифицирующих соединений при эксплуатации ледовых массивов в зависимости от температуры заливаемой воды.

4. Впервые выявлено и экспериментально подтверждено определяющее влияние скорости кристаллизации на характер распределения модификаторов в послойно формируемых ледовых массивах.

5. Впервые разработан метод декорирования межкристаллического пространства органическими красителями. Сформулированы критерии, выбраны химические соединения и определена макроструктура модифицированного льда.

**Практическая значимость.** На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации по изменению температуры хладоносителя для намораживания и поддержания свойств модифицированных ледовых массивов в зависимости от вида спорта.

Предложена и апробирована методика увеличения до 1,5 раз продолжительности эксплуатации модифицированного ледового массива без дополнительного внесения модификаторов в результате изменения температуры заливаемой воды и температуры хладоносителя.

На ледовых объектах РФ внедрена методика поддержания свойств модифицированного ледового покрытия, позволяющая до 14 % сокращать энергопотребление холодильных машин ледовой арены. Получен акт внедрения от ледовой арены Новосибирского профессионального хоккейного клуба «Сибирь».

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением титрометрического, кондуктометрического и спектроскопического методов исследования распределения модификаторов по глубине ледового массива, использованием аттестованных измерительных средств, проведением химических анализов в аккредитованной испытательной лаборатории химико-аналитических исследований «ЭКОЗОНД» и в Главном контрольно-испытательном центре питьевой воды, согласованностью с результатами других исследований. Соподлежат между собой также результаты, полученные в лабораторных экспериментах и на реальных ледовых аренах.

### **На защиту выносятся.**

1. Результаты мониторинга работы холодильной машины на нерасчетных режимах при пиковых тепловых нагрузках при эксплуатации модифицированного льда.

2. Результаты экспериментального определения теплофизических свойств льда, модифицированного различными полимерными соединениями.

3. Экспериментальные данные по влиянию температуры хладоносителя и заливаемой воды на процесс переноса полимерных модификаторов в массиве льда при эксплуатации и зависимости для расчёта концентрации модифицирующих соединений как функции количества обновлений рабочей поверхности льда.

4. Технология поддержания свойств модифицированного ледового массива спортивных объектов при эксплуатации.

5. Количественная оценка повышения энергоэффективности работы холодильной машины при эксплуатации модифицированного ледового массива по сравнению с чистым льдом.

### **Апробация работы.**

Результаты данной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской студенческой конференции «Студенческая научная весна» в МГТУ им Баумана (Москва, 2015 г.); 24-м Конгрессе Международного института холода IIR (Йокогама, Япония, 2015 г.); Всероссийской научно-практической конференции в ВИАМа «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (Москва, 2015 г.). Результаты исследования частично получены и применялись в рамках выполнения научного проекта РФФИ, проект №13-08-01126 «а».

### **Личный вклад автора.**

Разработан метод декорирования межкристаллического пространства органическими красителями. Сформулированы критерии, выбраны химические соединения и определена макроструктура модифицированного льда. Изучено влияние температуры хладоносителя и температуры заливаемой воды на распределение модификаторов в массиве льда, концентрация которых определяет его скоростные и прочностные свойства. В результате обработки экспериментальных данных автором предложены расчётные зависимости, положенные в основу технологии поддержания скользящих и прочностных свойств ледовых массивов. Проведена оценка повышения энергоэффективности работы холодильной машины при эксплуатации модифицированного ледового покрытия.

### **Публикации.**

По результатам работы опубликованы 6 научных работ, в том числе 5 статей в реферируемых ВАК РФ журналах.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 161 странице текста, содержит 78 рисунков, 23 таблицы и список литературы из 79 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **главе 1** представлен обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса льдообразования и изменения его физико-механических свойств с течением времени.

В отечественных и зарубежных источниках опубликовано значительное число работ, устанавливающих связь физико-механических свойств льда с присутствием и концентрацией различных видов примесей. Высокие прочностные свойства и минимальный коэффициент трения конька по льду на спортивных объектах достигаются в результате внесения в воду при намораживании массива смеси высокомолекулярных модификаторов в оптимальных концентрации и составе. При периодических подрезках отработанных слоёв льда и заливках чистой водой происходит изменение химического состава поверхностного слоя льда и постепенная утрата его прочностных и скоростных свойств. Задача поддержания концентрации модификаторов в рекомендуемом диапазоне требует исследования процессов их перераспределения в массиве льда под действием термической и концентрационной составляющих диффузии. Работ по исследованию диффузии во льду смеси высокомолекулярных соединений, существенно различающихся по молекулярной массе, строению, пространственной конфигурации и поверхностной активности, в открытой печати не обнаружено. Большое число работ посвящено исследованию миграции рассола в ледниках, происходящей под воздействием градиента температуры и за счет гравитационного стока рассола в океан. Обзор показал, что первый шаг в прогнозировании направления и интенсивности диффузии – получение кривой первоначального распределения примесей в ледовом массиве или – концентрационного профиля. Большинство работ по исследованию первоначального распределения солей во льду и последующей миграции носит экспериментальный характер, и единого аналитического описания даже для солевого раствора не разработано. Предложенные в работах О.М. Андреева, Ю.Л. Назинцева, В.В. Панова эмпирические зависимости получены на основе статистической обработки и обобщения данных отдельных ледников и применимы исключительно для конкретных объектов. В работах Э. Паундера, Б.А. Савельева, Ю.П. Доронина и других было установлено, что интенсивность миграции солей во многом определяется формой их включения в структуру ледника. Они могут быть равномерно распределены по межкристаллическому пространству, располагаться в виде отдельных замкнутых ячеек, капилляров, пор. Таким образом, изучение миграции примесей требует изучения структуры образованного льда и их первоначальной локализации.

В отличие от природных ледников миграция модификаторов в спортивных ледовых массивах не развивается непрерывно во времени, а происходит в пульсационном режиме при импульсном термическом воздействии – заливках горячей водой, создающих кратковременное отепление верхних слоёв льда и

активизирующих диффузионные процессы. Поэтому распределение модификаторов по глубине массива (концентрационный профиль) в период эксплуатации является функцией не времени, а числа штатных обработок льда, разделённых различными по продолжительности отрезками времени, что делает неправомерным использование традиционных пространственно-временных математических моделей, в частности, законов Фика, описывающих диффузионные процессы в однородных телах при отсутствии внешних воздействий.

Анализ научно-технической литературы позволил сформулировать задачи исследования, обосновать в качестве единственного пути решения поставленных задач проведение оригинальных экспериментальных исследований и получение обобщённых эмпирических зависимостей.

#### **Задачи исследования:**

1. Рассмотреть работу холодильной машины ледового поля на нерасчетных режимах при эксплуатации модифицированного ледового массива.

2. Исследовать теплофизические свойства льда, модифицированного различными полимерными соединениями.

3. Определить влияние температуры хладоносителя и заливаемой воды на процесс переноса полимерных модификаторов в массиве льда при эксплуатации и предложить зависимости для расчёта концентрации модифицирующих соединений как функции количества обновлений рабочей поверхности льда.

4. Разработать технологию поддержания свойств модифицированных ледовых массивов на спортивных объектах при их эксплуатации.

5. Определить периодичность внесения полимерных модификаторов для поддержания скользящих и прочностных свойств льда.

6. Дать количественную оценку повышения энергоэффективности работы холодильной машины при эксплуатации модифицированного ледового массива по сравнению с чистым льдом.

В **главе 2** представлены данные по работе и энергопотреблению холодильной машины ледового поля при эксплуатации модифицированного льда.

В **2.1** представлены данные по работе холодильной машины на нерасчетных режимах при эксплуатации модифицированного массива.

Увеличение прочности льда при использовании модификаторов позволяет уменьшить рабочую толщину льда и поддерживать установленную регламентами температуру льда при высоких температурах окружающей среды, что особенно важно в летние месяцы функционирования ледовых комплексов. На Рисунке 1 представлено изменение температур подачи хладоносителя и льда на уровне бетонного основания при работе холодильных машин в наиболее напряжённые периоды времени при круглосуточной загрузке арены: утренние тренировки команд и вечерние матчи в присутствии 12 тысяч зрителей. Частые машинные заливки горячей водой, регламентированные правилами соревнований по хоккею, теплоприток от демонстрационного освещения и средств телевизионной трансляции приводят к существенному повышению

температуры льда. Каждый пик на графике – результат отепления льда при заливке. Снижение средней толщины ледового покрытия до 35 мм позволило в указанных экстремальных условиях поддерживать температуру льда на уровне бетонного основания от минус 9 до минус 7,0 °С, что соответствует температуре льда на поверхности от минус 5 до минус 6 °С.

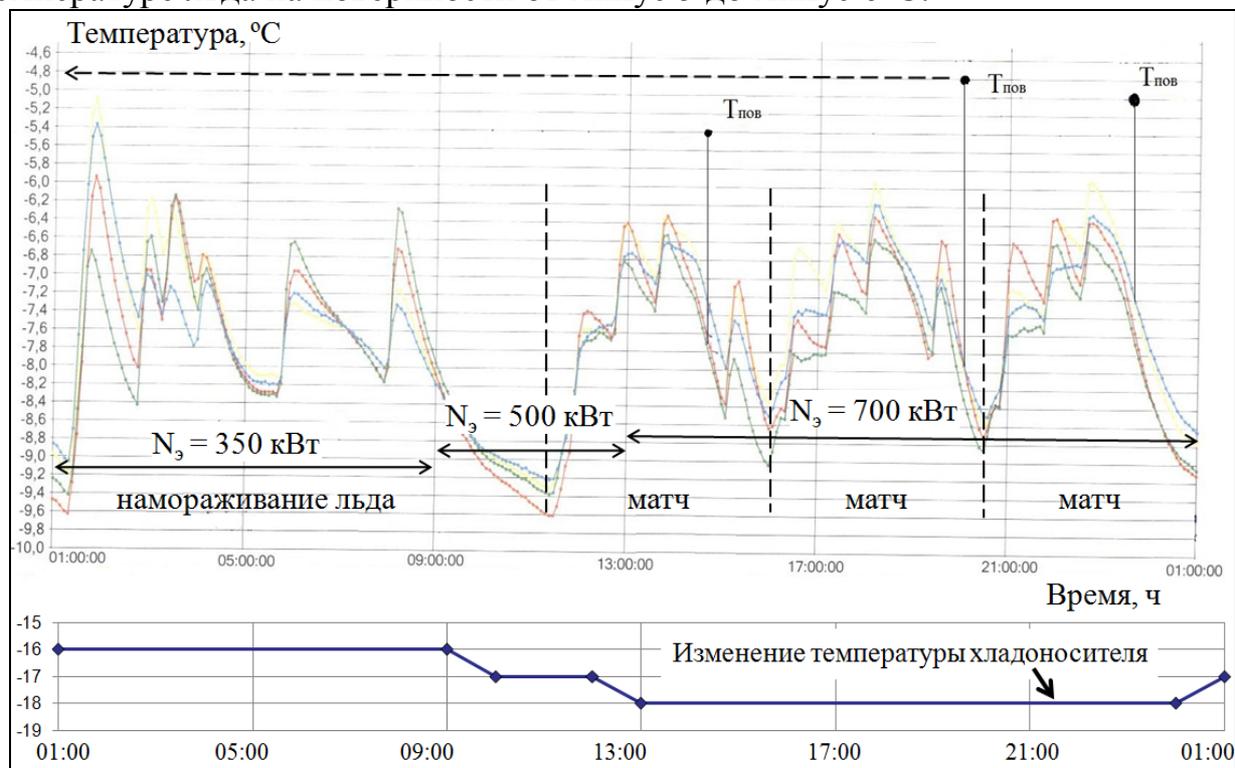


Рисунок 1. Изменение температуры льда на уровне бетонного основания

Модификация ледового массива – единственная возможность обеспечивать необходимые температурные режимы в условиях смены видов спорта в течение одного соревновательного дня. Например, при последовательном проведении соревнований по фигурному катанию и шорт-треку, необходимо изменять температуру поверхности льда от минус 2 до минус 7 °С в течение нескольких часов, и наоборот, что возможно только при малой толщине ледового покрытия, обладающего существенно меньшей инерционностью. На Рисунке 2 представлен график изменения температур хладоносителя  $t_{\text{хн}}$ , обеспечивающий максимальное приближение к требуемым параметрам льда на поверхности массива. Фиолетовыми линиями обозначены заливки горячей водой.

В 2.2 дана количественная оценка энергозатрат на работу холодильной машины при эксплуатации модифицированного массива. Энергетические затраты на поддержание ледового поля за год ( $E$ ) определяются режимами эксплуатации ледовой арены (видами соревнований, тренировок, их продолжительностью и количеством зрителей) и могут быть представлены в виде:

$$E = \left( \sum N_1 \cdot \tau_1 \right)_{\text{сор}} + \left( \sum N_2 \cdot \tau_2 \right)_{\text{тр}} + \left( \sum N_3 \cdot \tau_3 \right)_{\text{н}} \quad (1)$$

где  $N_1, N_2, N_3$  – мощность, потребляемая холодильными машинами в соревновательном, тренировочном и ночном режимах эксплуатации;  
 $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – продолжительность режимов.

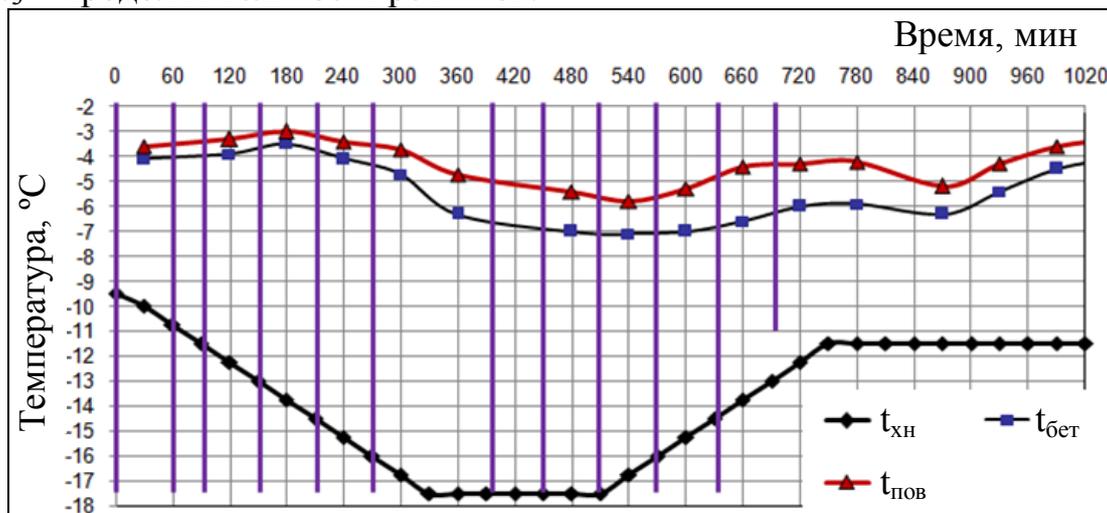


Рисунок 2. График изменения температуры хладоносителя при смене видов спорта

Представлены данные по среднему энергопотреблению ледовой арены при эксплуатации модифицированного ледового покрытия толщиной 35 мм для летнего и зимнего периодов, полученные из системы диспетчеризации холодильных машин (Таблица 1). Расчетное энергопотребление за год по соотношению (1) составляет около 1500 МВт·Ч.

Таблица 1.

Энергопотребление при эксплуатации модифицированного льда

Режим	Время, ч/год	Температура хладоносителя, °C	Энергопотребление, кВт	
			Август	Декабрь
Соревнования	1200	- 13	300	210
Тренировки	4000	- 11	270	160
Ночь	2500	- 9	140	110

В главе 3 представлены результаты определения теплофизических свойств льда, модифицированного смесью различных высокомолекулярных соединений. Исследования проводились с помощью криоскопа ОСКР-1 и дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) DSC 204 F1 Phoenix. Объектом исследования служили дистиллированная вода, смесь модифицирующих соединений в концентрации, рекомендуемой для хоккейных ледовых полей (7 ppm), а также растворы каждого из компонентов смеси в концентрациях, вносимых непосредственно в бак льдозаливочного комбайна. Анализ кривых изменения фазового состояния исследуемых образцов показал, что во всём рабочем интервале температур ледового поля все группы вводимых модификаторов не претерпевают фазовых превращений, что приводит к снижению тепловой нагрузки на холодильные машины.

Экспериментально доказано, что внесение модификаторов не влияет на температуру начала кристаллизации. Криоскопическая температура для чистой

воды и для раствора смеси модификаторов 7 ppm составляет  $0,003 \pm 0,002$  и  $0,014 \pm 0,002$  °С, соответственно. Экспериментально определено, что удельное количество теплоты, поглощаемое при 0 °С при плавлении для смеси модификаторов 7 ppm, меньше аналогичного параметра для чистой воды (334 кДж/кг) и составляет 280 кДж/кг. При внесении модификаторов часть свободной воды переходит в связанное состояние с молекулами модификаторов, и не образует твердую фазу. Экспериментально определены значения удельной теплоёмкости всех исследуемых образцов в диапазоне температур от минус 30 до плюс 20 °С, получены аппроксимирующие зависимости. Абсолютные значения удельной теплоёмкости для модифицированного льда в диапазоне рабочих температур от 0 до минус 10 °С отличается в меньшую сторону от чистого льда в пределах 4 %.

Сравнение теплопроводности чистого и модифицированного льда проводилось в идентичных условиях с помощью термометров сопротивления и тепловизионной съемки. Распределение температур на поверхности при охлаждении образцов демонстрирует идентичность значений теплопроводности чистого и модифицированного льда.

**Глава 4** посвящена исследованию макроструктуры формируемого льда и первоначального распределения в нём внесённых модифицирующих соединений.

В **4.1** приведено описание мобильной экспериментальной установки, созданной для воспроизведения условий одномерного отвода тепла и намораживания льда на реальном спортивном объекте. Установка включает стандартный компрессорно-конденсаторный агрегат и оригинальный испаритель, представляющий собой алюминиевую плиту, охлаждаемую припаянным снизу медным змеевиком (Рисунок 3). Свободный объем между поверхностью змеевика и плитой заполнен алюминиевыми прутками и теплопроводящей пастой. Температура кипения хладагента изменялась в диапазоне от минус 5 до минус 20 °С. Намораживание образцов производилось в формах с прозрачными стенками и металлическим основанием.

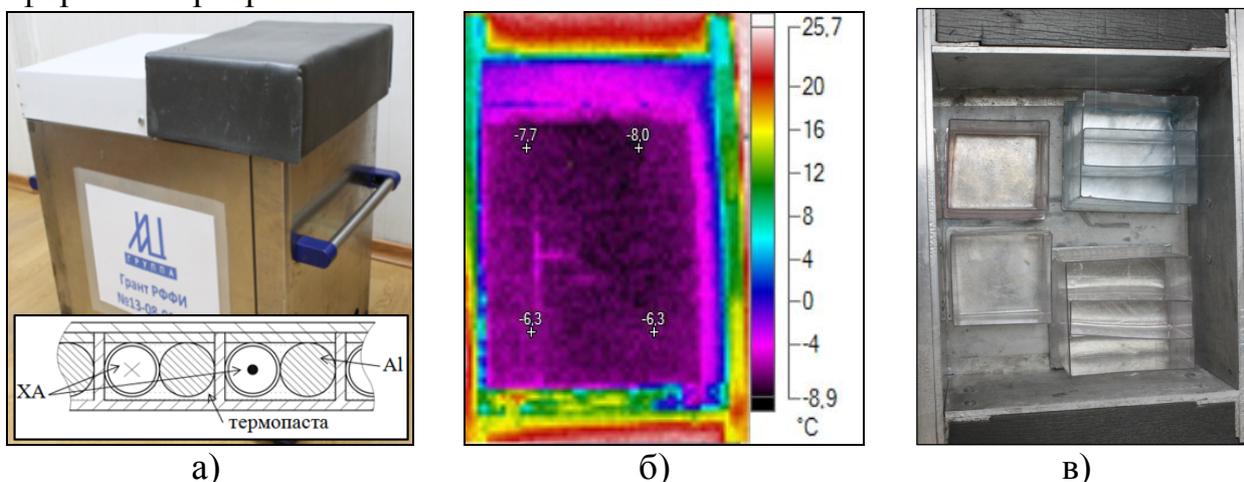


Рисунок 3. Экспериментальная установка: общий вид (а), распределение температуры по поверхности испарителя (б), формы для намораживания (в)

Проведённые на установке эксперименты показали, что при всех режимах работы холодильной машины ледовой арены кристаллизация жидкостной плёнки идёт с образованием плоского фронта. Получены изображения как горизонтального (Рисунок 4, а), так, впервые, и вертикального среза модифицированного льда (Рисунок 4, б). Развитие кристаллов преимущественно происходит по направлению главной оптической оси, направленной перпендикулярно плоскости замерзания с локальным проявлением эпитаксии, т.е. сохранением направления главной оптической оси кристаллов нижней зоны массива. При движении фронта кристаллизации сначала вымораживается вода, а внесённые модификаторы дислоцируются в межкристаллическом пространстве, которое впоследствии выполняет функцию транспортных путей в процессе их последующего перераспределения.

Предложен метод визуализации межкристаллического пространства с помощью декорирования красителями. Органический краситель разливается на поверхности исследуемого образца, при замерзании геометрия кристаллов сохраняется, а межкристаллическое пространство выделяется цветом (Рисунок 4, в). Это доступный и точный метод оценки характерного размера кристаллов с помощью любого графического редактора в образцах льда, взятых на реальных ледовых объектах. В работе сформулированы основные критерии отбора соединений для декорирования ледовых структур. Отобранные красители (Coomassie Brilliant Blue и Эритрозин) позволили визуализировать пространственную конфигурацию межкристаллического пространства намороженного с ними слоя льда за счёт распределения по всей его толщине.

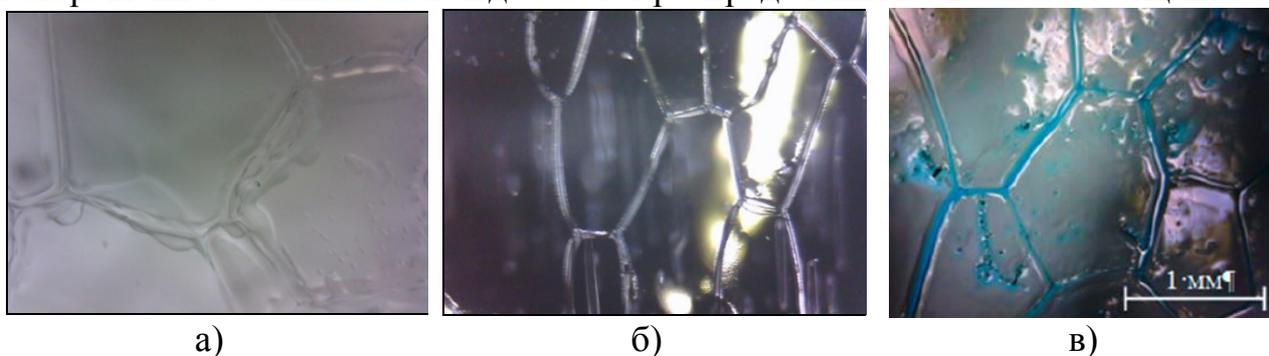


Рисунок 4. Макроструктура модифицированного льда: горизонтальный и вертикальный срезы (а, б); декорирование поверхности красителем (в)

В 4.2 описана оригинальная методика и представлены результаты исследования первоначального распределения органических модификаторов в сформированном массиве льда. Массив льда намораживался на лабораторном стенде с автономной системой хладоснабжения и бетонной технологической плитой, идентичной конструкции ледовых полей на спортивных аренах. После завершения намораживания полученный массив с помощью прецизионного режущего инструмента с горизонтальными направляющими механически разделялся на слои толщиной порядка 1 мм. Далее проводились комплексные химические анализы, и определялась концентрация модификаторов в расплавах льда по показателю перманганатной окисляемости, характеризующему общее

содержание органической фазы в расплаве. Для увеличения достоверности полученных данных дополнительно применялись кондуктометрический и спектроскопический методы элементного анализа расплавов льда. Это было необходимо, так как идентификация искоемых соединений в концентрациях от 1 до 100 мг/л представляет собой отдельную сложную задачу. Во всех экспериментах воспроизводилась реальная технология формирования модифицированного льда. Намораживался нижний слой льда без добавок, далее послойно формировалась верхняя зона по схеме чередующихся слоёв: «чистый слой» – «слой с модификаторами». Температура заливаемой воды составляла от плюс 55 до плюс 65 °С.

Экспериментально определено, что первоначальное распределение модификаторов по толщине массива зависит от следующих основных факторов: температуры подаваемого в ледовое поле хладоносителя  $t_{хн}$ , температуры разливаемой воды  $t_в$ , физической природы и свойств каждого из компонентов смеси (строения макромолекул, молекулярной массы, поверхностной активности), последовательности нанесения слоёв чистой воды и слоёв с полимерными добавками. На Рисунке 5, а приведены кривые первоначального распределения для массивов льда, намороженных при разных температурах хладоносителя и идентичной концентрации вносимых модификаторов 7 ppm. При схеме чередующихся слоёв в пересчёте на показатель перманганатной окисляемости это значение соответствует 0,8 мг/л.

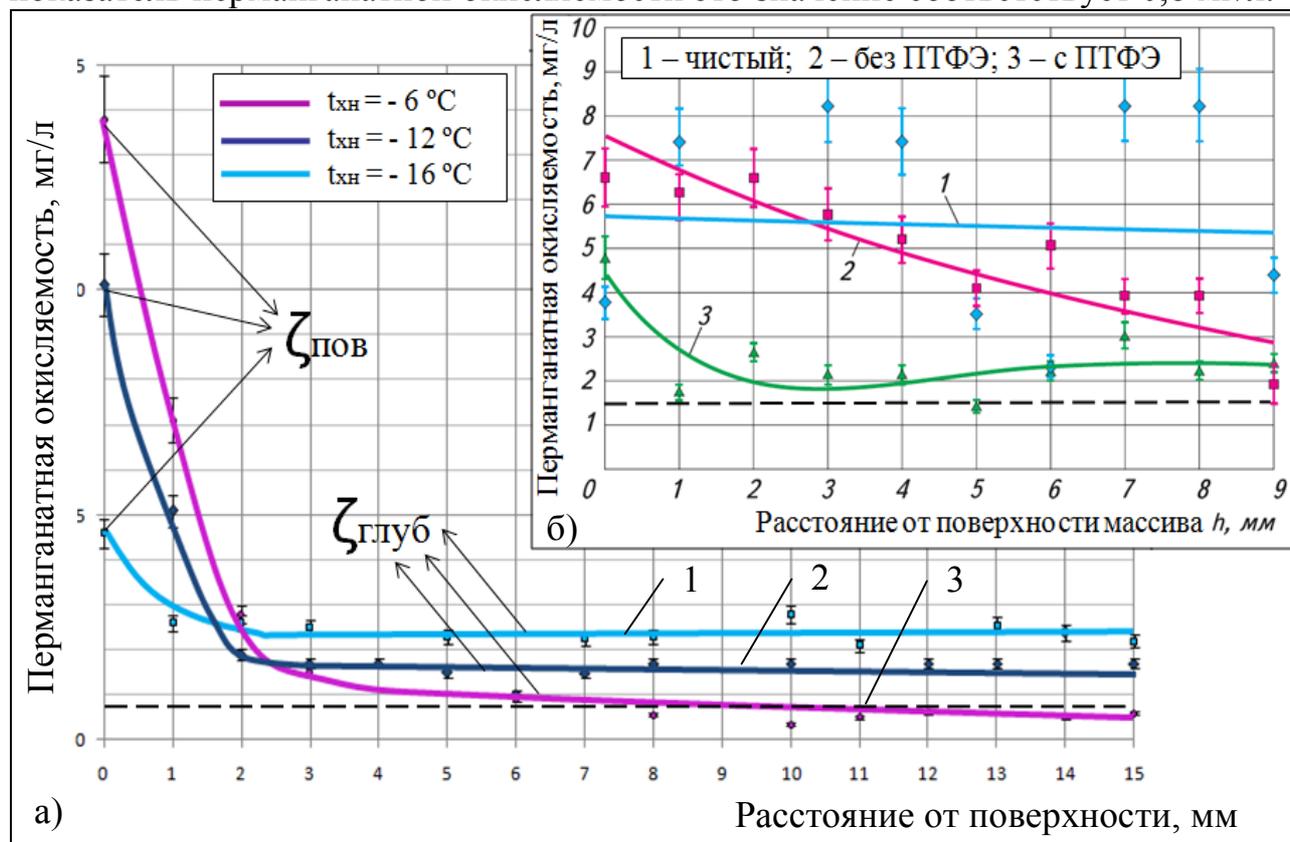


Рисунок 5. Первоначальное распределение модификаторов:  $\zeta = idem, t_{хн} = var$  (а),  $\zeta = var, t_{хн} = idem$  (б)

Как можно видеть из Рисунка 5, а концентрация модификаторов во внутренних слоях массива практически постоянна для всех кривых, а к поверхности льда наблюдается резкое увеличение, существенно превышающее уровень вносимых концентраций. При этом, с понижением температуры подаваемого хладоносителя (увеличением скорости кристаллизации каждого единичного слоя), большая часть внесённых соединений захватывается фронтом кристаллизации и не успевает подняться к поверхности, что приводит к более равномерному распределению их внутри создаваемого массива льда – кривая 1 (голубая линия). Такой характер распределения в наибольшей степени подходит для технических видов спорта (хоккей, фигурное катание). В скоростных видах спорта высокая концентрация модификаторов необходима только в поверхностном слое льда и более рациональна кривая 3 (красная линия), поэтому отношение концентраций внутри и на поверхности массива ( $\zeta_{нов}/\zeta_{глуб}$ ) является важной характеристикой модифицированного массива льда. Обработка экспериментальных данных позволила предложить расчётную зависимость отношения ( $\zeta_{нов}/\zeta_{глуб}$ ) от средней скорости кристаллизации ( $v$ , мм/ч):

$$\zeta_{нов}/\zeta_{глуб} = 16,8 \cdot e^{-1,3v} \quad (2)$$

Максимальная прочность модифицированного льда для технических видов спорта обеспечивается при наиболее равномерном распределении введённых модификаторов по глубине порядка 20 мм, что соответствует значению  $\zeta_{нов}/\zeta_{глуб}$  в диапазоне от 3 до 5, поэтому необходимо было установить интервал скоростей кристаллизации, при которых достигаются требуемые соотношения концентраций. В результате проведённых исследований установлено, что требуемое соотношение достигается при средних скоростях намораживания в интервале от 0,7 до 1,0 мм/ч. Экспериментально также установлено, что более равномерному распределению по глубине массива способствует внесение мелкодисперсных фторсодержащих суспензий фторопласта (ПТФЭ): в составе вносимых смесей они являются наиболее крупными структурными соединениями, с молекулярной массой до  $10^7$  а.е.м. и наиболее прочно захватываются фронтом кристаллизации при его движении (Рисунок 5, б).

В главе 5 на основе исследований процесса переноса модификаторов при эксплуатации ледового массива разработана технологии поддержания его скоростных и прочностных свойств.

В 5.1 описаны эксперименты по визуализации переноса модификаторов на примере миграции красителя Coomassie Brilliant Blue в образце модифицированного льда. Рассматриваемое и натурное явление одной физической природы, а краситель и один из компонентов модифицирующей смеси близки по структуре и молекулярной массе (порядка 1000 а.е.м). Замороженная капля красителя вносилась между двумя образцами модифицированного льда, а затем имитировались заливки горячей водой с механической подрезкой. Постепенно происходило размывание капли. Краситель мигрировал по сети межкристаллического пространства по

нескольким взаимосвязанным путям, преимущественно в направлении действия градиента температуры (Рисунок 6).

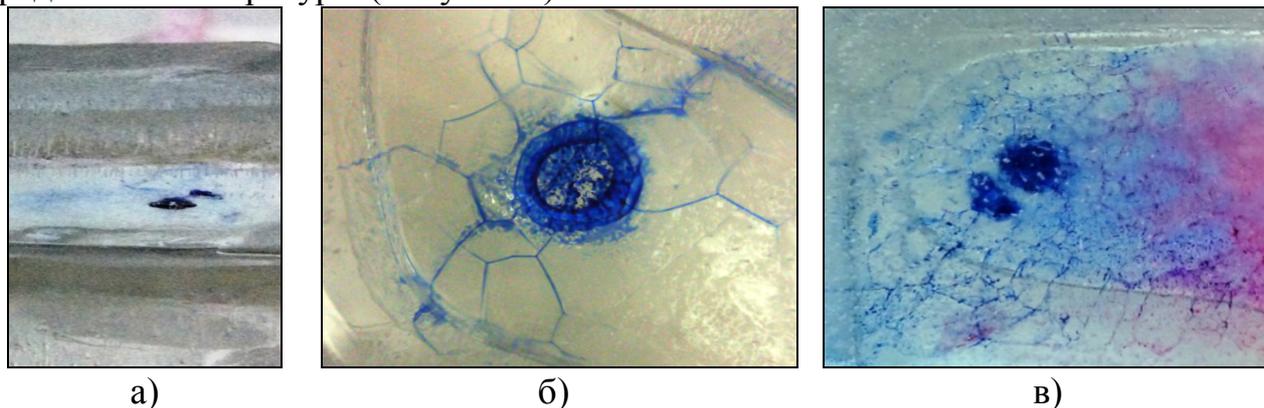


Рисунок 6. Распределение красителя в модифицированном льду: после вмораживания (а), после периодических заливок горячей водой (б, в)

Вторым инструментом воздействия на интенсивность миграции модификаторов является температура воды  $t_g$  при обновлении поверхности льда. Эксперименты показали, что при увеличении температуры воды краситель с определенной глубины до поверхности (расстояние  $\delta$ ) поднимается за меньшее количество обновлений  $N$  вследствие увеличения градиента температуры и глубины подплаваемого слоя (Рисунок 7).

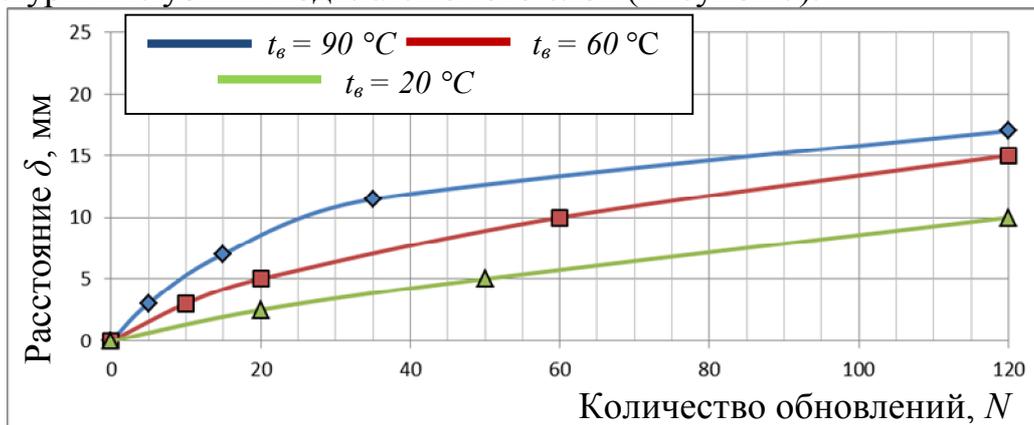


Рисунок 7. Подъём красителя при обновлении поверхности:  $t_g = var$ ,  $t_{хн} = idem$

Заливки проводились при постоянной температуре хладоносителя и с частотой 1 раз/час. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность воздействия на интенсивность подъема модификаторов к поверхности, что имеет большое практическое значение для определения времени сохранения ледовым покрытием своих свойств без дополнительно внесения модификаторов. Термическая составляющая всегда направлена в сторону поверхности льда, заливаемого горячей водой, а концентрационная может иметь и обратное направление – к глубинным слоям (например, при дополнительном внесении модификаторов при заливке льда). Представленные эксперименты подтвердили предложенную физическую модель, согласно которой межкристаллическое пространство выполняет функцию «транспортных путей» при перераспределении внесённых модификаторов.

В работе также экспериментально подтверждена возможность проникновения модификаторов с поверхности льда вглубь массива. Методом декорирования установлено, что глубина проникновения модификаторов, в первую очередь, определяется распределением температуры в приповерхностных слоях льда. Таким образом, для обогащения модификаторами истощенного верхнего слоя массива со стороны поверхности необходимо предварительно отеплить верхний слой льда несколькими горячими заливками, увеличивающими объём межкристаллического пространства.

В 5.2 представлены результаты исследования перераспределения модификаторов в поверхностном слое при моделировании процесса эксплуатации. На экспериментальном стенде сначала намораживался модифицированный ледовый массив, а затем проводились подрезки верхнего слоя с заливками чистой горячей водой (имитация процесса эксплуатации). На Рисунке 9, а представлены результаты исследования динамики изменения состава поверхностного слоя льда. По оси абсцисс отложено время проведения заливок. Каждая экспериментальная точка – результат химического анализа соскоба льда после очередной заливки с подрезкой, а красная линия – искомое изменение концентрации модификаторов на поверхности массива. Тренд всех экспериментальных кривых практически идентичен.

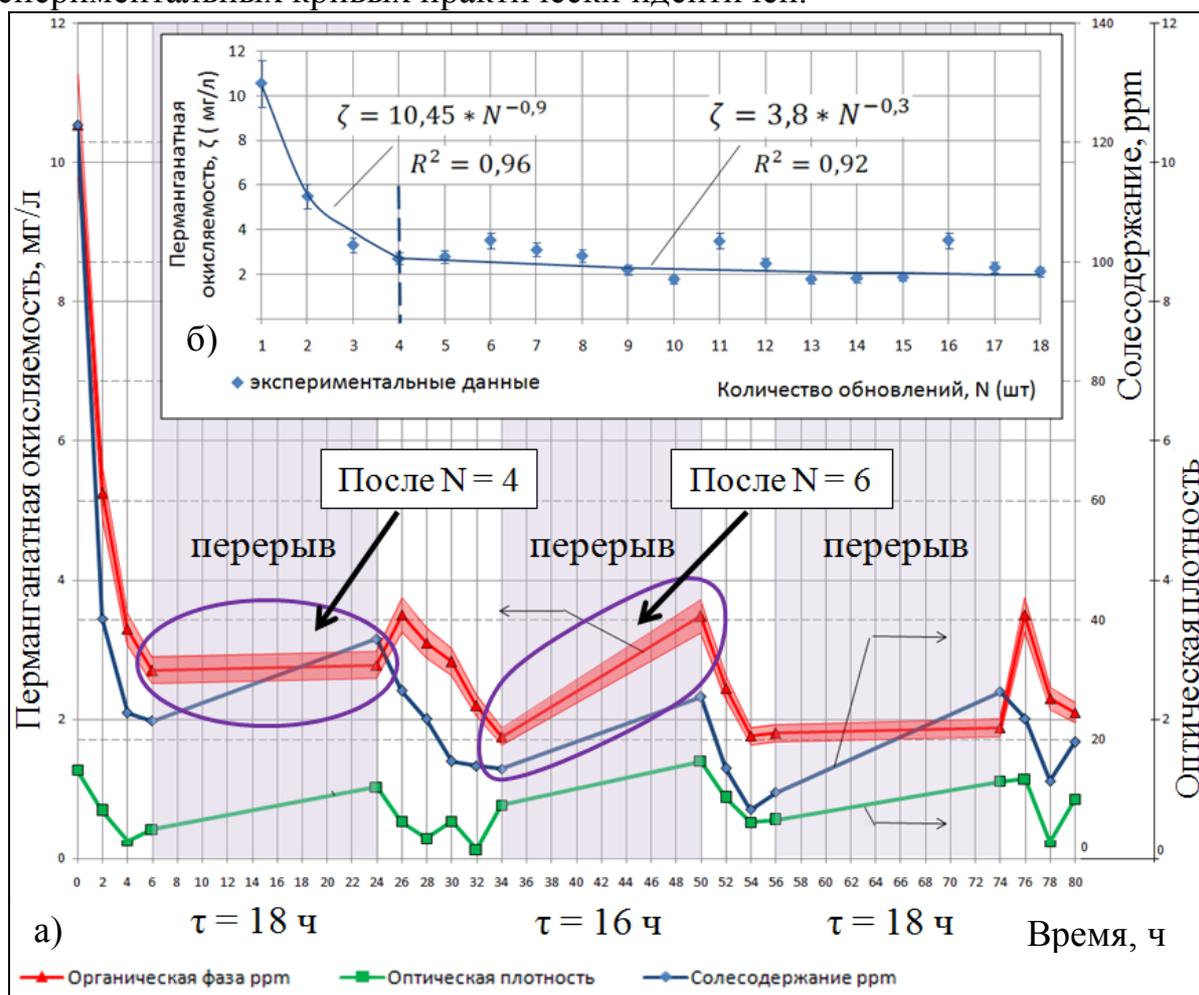


Рисунок 9. Изменение концентрации модификаторов в поверхностном слое (а), эмпирические зависимости (б)

Обнаружено, что при частых подрезках верхнего слоя и заливках без модификаторов происходит монотонное снижение их концентрации в поверхностном слое льда (красная линия). При длительном ночном перерыве в результате действия концентрационной и термической составляющих диффузии органические соединения в отепленном за день массиве постепенно поднимаются к поверхности. Причём, чем больше заливок произведено в течение дня (более отепленный массив), тем с большей интенсивностью происходит их миграция к поверхности в ночной период. Очевидно, что перераспределение модификаторов действительно определяется количеством заливок горячей водой  $N$ , а не временем  $\tau$ . В результате обработки экспериментальных данных предложена эмпирическая зависимость для расчёта изменения концентрации модификаторов в поверхностном слое от количества проведённых заливок с механическим удалением верхнего обновляемого слоя льда (Рисунок 9, б). Она аппроксимирована двумя степенными функциями:

$$\begin{aligned} \zeta &= 10,45 \cdot N^{-0,9} \text{ при } N \leq 4 \\ \zeta &= 3,80 \cdot N^{-0,3} \text{ при } N > 4 \end{aligned} \quad (3)$$

В 5.3 приведены результаты мониторинга физико-механических свойств и химического состава ледового массива на действующих ледовых объектах 2-х типов: для скоростных видов спорта (без включения ПТФЭ в состав модифицирующей смеси) и массивов повышенной прочности для технических видов (с внесением ПТФЭ). Расчетные зависимости для оценки концентрации модификаторов в поверхностном слое после проведения определённого числа заливок, полученные на действующих объектах, идентичны полученным в лабораторных экспериментах.

Исследования изменений скоростных свойств льда в процессе эксплуатации проводились с использованием комплекса специализированного оборудования, включающего одноопорный скользиметр, приводимый в действие стартовым импульсом идентичной силы, и системы хронометража. Изменение прочностных характеристик льда оценивалось по сопротивлению льда ударной нагрузке с помощью установки, имитирующей приземление фигуриста после прыжков и выбросов. По данным мониторинга изменения физико-механических свойств ледового массива в процессе эксплуатации (Рисунок 10) экспериментально определено количество обновлений  $N_{max}$ , после которого практически происходит утрата эффекта упрочнения льда, достигаемого за счёт демпфирующего действия присутствующих в межкристаллическом пространстве модификаторов. На основе этих данных определена периодичность внесения модификаторов для поддержания свойств льда. Для скоростного массива  $N_{max}$  составляет 20, при снижении концентрации модификаторов в приповерхностных слоях льда до уровня 0,5 мг/л. Аналогичные величины для массива повышенной прочности с ПТФЭ составляют 80 обновлений и 1,0 мг/л. Экспериментально установлено, что без дополнительного внесения модификаторов для обеспечения необходимой прочности необходимо увеличить толщину льда до 50 мм после 150 заливок и до 65 мм после 300 обновлений.

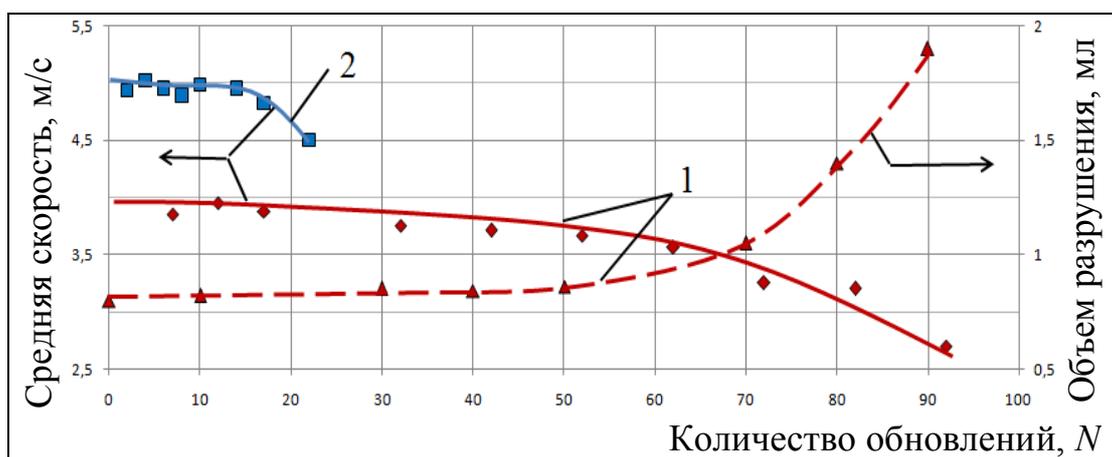


Рисунок 10. Изменение физико-механических свойств льда при эксплуатации: технические виды спорта (1), скоростной массив для шорт-трека (2)

В 5.4 представлена технология поддержания свойств модифицированного ледового массива для различных видов спорта и дана количественная оценка повышения энергоэффективности работы системы хладоснабжения при эксплуатации модифицированного ледового массива по сравнению с чистым льдом.

Обоснована периодичность внесения модификаторов для ледовых массивов с агрессивными по отношению ко льду видами спорта (хоккей, фигурное катание): от 2 до 4 раз в месяц. Для конькобежных овалов, предназначенных для скоростных видов спорта, внесение модификаторов должно производиться в соответствии с графиком проведения соревнований и исключительно в поверхностный слой.

Снижение общей толщины модифицированного ледового массива позволяет подавать в ледовое поле хладоноситель с температурой на несколько градусов выше, чем при эксплуатации чистого льда, что является основным фактором экономии электроэнергии. Мониторинг на реальной ледовой арене позволил определить среднюю величину требуемой холодопроизводительности для компенсации теплопритоков к полю для каждого из режимов. Данные для расчета представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Режимы эксплуатации ледовой арены

Режим	Время, ч/год	Холодопроизводительность, кВт		Температура хладоносителя, °С	
		Чистый	Модифицированный	Чистый	Модифицированный
Соревнования	1200	540	520	- 16	- 13
Тренировки	4000	320	300	- 15	- 12
Ночь	2500	180	160	- 11	- 9

Энергопотребление по соотношению (1) за сезон при эксплуатации чистого льда составляет 1420 МВт·Ч, для модифицированного льда 1230 МВт·Ч. Энергетические затраты снижаются от 12 до 16 % в зависимости от режима эксплуатации.

### **Основные выводы и результаты**

1. Эксплуатация модифицированного ледового покрытия меньшей толщины в течение сезона позволяет снизить нагрузку на холодильные машины от 12 до 16 % в зависимости от режима эксплуатации.

2. Экспериментально подтверждена возможность поддержания требуемой температуры поверхности льда при работе холодильной машины в нерасчетных режимах за счет снижения термического сопротивления модифицированного ледового массива.

3. Определены теплофизические свойства водного льда, модифицированного различными компонентами. Доказано, что во всём рабочем интервале температур ледового объекта все группы вводимых модификаторов не претерпевают фазовых превращений, что приводит к дополнительному снижению тепловой нагрузки на холодильные машины.

4. Установлены основные закономерности переноса модификаторов в ледовом покрытии при эксплуатации и выявлены основные факторы, определяющие характер распределения модифицирующих соединений по глубине массива: температуры хладоносителя и заливаемой воды при штатных обработках льда.

5. Предложены эмпирические зависимости, описывающие влияние скорости кристаллизации на распределение модификаторов по глубине массива и интенсивность их последующего переноса в период эксплуатации.

6. Предложена и апробирована технология поддержания свойств модифицированного ледового массива. Экспериментально определена периодичность внесения модификаторов для скоростных и технических видов спорта, равная соответственно 20 и 80 обновлениям, для поддержания физико-механических свойств массива.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Особенности распределения высокомолекулярных соединений в ледовых структурах спортивных объектов как одна из задач прикладной физики кристаллизации / Т.Г. Устюгова [и др.]. // Холодильная техника. 2015. № 6. С. 26-34. (0,5 п.л. / 0,17 п.л.).

2. Декорирование как метод изучения структуры и тепломассопереноса в модифицированных ледовых массивах / Т.Г. Устюгова [и др.]. // Холодильная техника. 2016. № 9. С. 49-55. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

3. Исследование возможностей снижения фрикционного взаимодействия в паре «конек-лед» путем модификации структуры обеих контактирующих поверхностей / Т.Г. Устюгова [и др.]. // Вестник РФФИ. 2015. № 3 (87). С. 45-53. (0,5 п.л. / 0,125 п.л.).

4. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе ледяной матрицы / Т.Г. Устюгова [и др.]. // Материаловедение. 2017. № 2. С. 33-40. (0,45 п.л. / 0,05 п.л.).

5. Новые аспекты развития ледовых и лазерных технологий для спорта высших достижений / Т.Г. Устюгова [и др.]. // Холодильная техника. 2016. № 12. С. 36-42. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).