

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 725.86:697.1:536.1

**ЛИВАНСКИЙ**  
Дмитрий Геннадьевич

**ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ЛЕДОВЫХ  
ПЛОЩАДОК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.03 –Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Минск 2020

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

**Научный руководитель**

**Дячек Петр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Теплогазоснабже-  
ние и вентиляция» Белорусского нацио-  
нального технического университета

**Официальные оппоненты:**

**Бровка Геннадий Петрович,**  
доктор технических наук, доцент, заве-  
дующий лабораторией физико-  
химической механики природных дис-  
персных сред Института природопользо-  
вания НАН Беларуси;

**Новосельцев Владимир Геннадьевич,**  
кандидат технических наук, доцент, за-  
ведующий кафедрой Теплогазоснабже-  
ния и вентиляции УО «Брестский госу-  
дарственный технический университет»

**Оппонирующая  
организация**

Учреждение образования «Полоцкий  
государственный университет»

Защита состоится «20» марта 2020 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техни-  
ческом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,  
корп. 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (017) 265-64-21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
национального технического университета.

Автореферат разослан «17» февраля 2020 г.

Исполняющий обязанности ученого  
секретаря совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

В.Н. Романюк

© Ливанский Д.Г., 2020  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Высокие спортивные достижения отражают общий уровень развития страны и, в частности, материально-технической базы для подготовки спортсменов и проведения соревнований. Диссертация посвящена исследованию путей совершенствования материально-технической базы ледовых видов спорта, что в случае проведения спортивно массовых мероприятий способствует и повышению уровня здоровья населения страны в целом.

Наличие технически совершенного инженерного оборудования ледовой арены, способной поддерживать высокое качество ледового поля – одно из условий принятия решения о проведении международных соревнований на данной ледовой площадке. Спортивные соревнования международного ранга способствуют экономическому развитию региона и повышают престиж страны на международной арене.

На начало 90-х годов на территории Республики Беларусь функционировало всего три крытых катка. На сегодняшний день в Республике Беларусь насчитывается более 30 ледовых арен. В 2010 году был построен и введен в эксплуатацию один из крупнейших в Европе ледовый дворец «Минск-Арена», рассчитанный на 15000 зрителей.

Возведение новых ледовых арен - дорогостоящее мероприятие, которое обычно идет путем повторения опыта строительства и эксплуатации уже действующих сооружений. В связи с этим возникает необходимость в совершенствовании инженерных систем и технологий, повышении эффективности принимаемых проектных решений и снижении значимых энергетических затрат на эксплуатацию ледовых арен.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа выполнялась с учетом положений следующих государственных научно-технических программ: Указа Президента Республики Беларусь от 26 декабря 2005 г. № 622 «О строительстве в Минске многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-арена»; постановления Совета Министров Республики Беларусь от 24.03.2011 № 372 «Об утверждении Государственной программы развития физической культуры и спорта в Республике Беларусь на 2011–2015 гг.»; постановления Совета Министров Республики Беларусь от 09.06.2010 № 886 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2011–2015 гг.» и др.; ГБ16-302 БНТУ раздел 3 «Математическое моделирование процессов климатизации».

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы – разработка технологических и конструктивных решений инженерных систем, обеспечивающих требуемый температурный режим ледовой пластины, а также минимизация энергетических и экономических затрат при эксплуатации и строительстве ледовых полей искусственных катков.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработать физико-математическую модель исследуемого объекта и алгоритм численного расчета процессов тепло- и массообмена.
2. Проверить адекватность результатов расчета реальным физическим процессам и фактическим условиям эксплуатации ледовых катков.
3. Исследовать и установить влияние конструктивных, теплофизических и режимных факторов на процессы формирования температурного режима ледового поля.
4. Разработать рекомендации по определению конструктивных и технологических параметров инженерных систем основания ледовых площадок, обеспечивающих в процессе эксплуатации требуемый температурный режим поверхности ледовой пластины, минимизацию энергетических и экономических затрат.

**Объектом исследования** являются многофункциональные сооружения для проведения спортивных состязаний по зимним видам спорта.

**Предмет исследования** – процессы формирования температурно-влажностного режима ледовых площадок.

Решение поставленных задач выполнено с применением системного учета факторов, влияющих на процессы переноса теплоты и массы при формировании и эксплуатации ледовой пластины.

**Научная новизна:**

1. Показано, что формирование и эксплуатация ледового поля осуществляются в условиях системного влияния теплофизических и конструктивных параметров ледовой пластины, плиты охлаждения, слоя теплоизоляции; конструктивных и технологических параметров систем холодоснабжения и системы защиты грунта от промерзания, режимов намораживания и восстановления льда, конфигурации системы климатизации и ограждающих конструкций. Это позволило установить сочетание конструктивных характеристик и режимных параметров системы холодоснабжения ледового поля, обеспечивающее требуемую неравномерность ( $\Delta t_{\text{л}}$ , °C) и среднюю температуру поверхности ледовой пластины ( $t_{\text{л}}$ , °C). Результаты системного исследования и анализа температурного режима ледовой пластины и основания ледового поля автором в зарубежной и отечественной литературе не обнаружены.

2. Указано на значимость прямого перетока теплоты от обратного трубопровода к подающему через массив плиты охлаждения, а также определена величина этого теплового потока, который может оказывать существенное влияние на конструктивные и технологические параметры системы холодоснабжения, что позволило для системы холодоснабжения установить допустимые пределы изменения разности температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводах.

3. Выделены характерные периоды изменения температурного поля в процессах первичного формирования ледовой пластины и восстановления льда в перерыве между спортивными соревнованиями; в зависимости от определяющих факторов установлена продолжительность и скорость намораживания и восстановления льда, определены величины теплового потока на поверхности ледовой пластины и бетонной плиты охлаждения, а также параметры распространения нулевой изотермы вглубь грунта при длительной эксплуатации катка, что позволило определить тепловые нагрузки на систему холодоснабжения в процессах намораживания и восстановления льда.

4. Установлена величина капитальных и эксплуатационных затрат на прокачку холодоносителя в зависимости от конфигурации системы холодоснабжения, что позволило осуществить технико-экономическое сравнение вариантов устройства системы холодоснабжения ледовых полей, а также показать пути снижения стоимости  $1\text{м}^2$  конструкции плиты охлаждения и энергетических затрат на циркуляцию холодоносителя в трубопроводах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Физико-математическая модель тепло- и массообмена в объекте исследований, отличающаяся системным учетом широкого спектра кон-

структивных, технологических и физических факторов, а именно: локальных теплофизических и конструктивных параметров ледовой пластины, плиты охлаждения, слоя теплоизоляции, конфигурации и технологических параметров систем холодоснабжения и защиты грунта от промерзания, режимов намораживания и восстановления льда, конфигурации системы климатизации и ограждающих конструкций, позволяющая провести исследование процессов формирования температурно-влажностного режима основания ледовых площадок.

2. Результаты теоретических исследований и анализа процессов формирования температурного режима ледовой пластины и основания ледовой площадки, отличающиеся учетом каждого в отдельности и совместно влияния различных факторов, заключающиеся в определении влияния на исследуемые процессы конструктивных особенностей и физических параметров материалов основания ледовых площадок и ледовой пластины, систем тепло- и холодоснабжения и климатизации, их функциональных особенностей, позволившие выделить значимые факторы и определить закономерности формирования температурного режима в процессе формирования ледовой пластины и эксплуатации льда, а также усовершенствовать конфигурацию инженерных систем и технологий.

3. Результаты технико-экономической оценки вариантов устройства основания ледовых площадок, обеспечивающих требуемый температурный режим поверхности льда по величине средней температуры и температурной неоднородности, отличающиеся тем, что на стадии проектирования позволяют принимать решения, позволяющие минимизировать капитальные и энергетические затрат при строительстве и эксплуатации ледовых арен.

4. Рекомендации по проектированию основания ледовых площадок, отличающиеся системным учетом результатов проведенных исследований и технико-экономической оценки конструктивных параметров плиты охлаждения, конструктивных и технологических параметров системы холодоснабжения, позволяющие рекомендовать варианты конструкций, обеспечивающие требуемую температуру и равномерность температурного поля поверхности льда в процессе эксплуатации.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Автор лично разработал алгоритм расчета исследуемых процессов, совместно с руководителем физико-математическую модель, описывающую процессы тепло- и массообмена ледовой пластины с окружающим ее пространством; лично получил, обобщил и обработал все экспериментальные и расчетные результаты, представленные в диссертации, выполненной под общим научным руководством доктора технических наук, профессора Дячека П.И.

### **Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях, форумах и симпозиумах:

- VII Международной конференции «Heat pipes, heat pumps, refrigerators and energy sources» (Минск, ГНУ ИТМО им А. В. Лыкова НАН Беларуси, 8-11 сентября 2008);

- 6-ой, 7-ой, 8-ой, 13-ой, 14-ой, 15-ой, 16-ой, международных научно-технических конференций «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, БНТУ, 2008г., 2009г., 2010г., 2015г., 2016г., 2017г., 2018г.);

- VII Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» (Волгоград, ВолгГАСУ, 13-17 мая 2009г.);

- Научно-технической конференции с международным участием «Холод и климат Земли. Стратегия победы или выживания» (Санкт-Петербург, ГОУ ВПО СПбГУНИИТ, 3 февраля 2009г.);

- VIII Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» (Самарканд, ВолгГАСУ, 17-21 мая 2010г.);

- VII Международной Научно – технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, Институт холода и биотехнологий, 17-20 ноября 2015 г.);

- Шестой международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции» (Москва, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 25-27 ноября 2015 г.).

Результаты, полученные в процессе диссертационной работы использованы в следующих проектах и работах:

- Исследование влияния системы микроклимата на параметры льда по объекту МКСК «Минск-Арена» (Ливанский, Д. Г. Отчет по научно-исследовательской работе (НИР) по теме: «Температурное поле искусственного льда и микроклимат крытого катка по объекту «Многопрофильный культурно-спортивный комплекс «Минск-Арена» в г. Минске». Минск, 2016. – 77 с.);

- «Культурно-развлекательный спортивный комплекс в жилом районе Чижовка в г. Минске. Малая арена» (Ливанский, Д. Г. Захаревич А. Э. Отчет по научно-исследовательской работе (НИР) по теме: «Температурное поле искусственного льда и микроклимат крытого катка». Минск, 2015. – 120 с.)

- Проект строительства объектов «Многофункциональный комплекс в границах пр. Победителей – ул. Ратомской – Тимирязева в г. Минске» (2015 г.), «Реконструкция универсального спортивного зала (катка) РУП «Республиканский горнолыжный центр «Силичи» (2015 г.), «Устройство

новой технологической плиты с системой холодоснабжения для Ледового дворца в г.Лиде, Гродненской области» (2015 г.);

– Х/д № 2231/17с от 31 мая 2017 г. «Расчет распределения параметров воздуха (температуры, относительной влажности, подвижности), а также температурного поля массива льда и в конструкции основания ледового поля для двух ледовых арен объекта «Многофункциональный комплекс в границах пр. Победителей – ул. Ратомской (Браславской) – Тимирязева в г. Минске, 6–ая очередь строительства»;

– В учебном процессе филиала БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала».

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты работы опубликованы (представлены) в 15 научных работах: 3-х в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Беларуси (1.25 авторского листа), 6-и – в научных изданиях и сборниках материалов конференций, 5-и – в сборниках тезисов доклада, а также Рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений (Р 3.02.178-2019), утвержденные Министерством строительства и архитектуры Республики Беларусь и Министерством спорта и туризма Республики Беларусь, внесены РУП «Стройтехнорм» в реестр учетной регистрации под №178 от 21.10.2019 г.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации – 170 страниц, в том числе иллюстраций – 111, таблиц – 36, приложений – 5. Список использованных источников состоит из 156 наименований. Список публикаций автора – 15 наименований.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе приводится литературный обзор научных и нормативных литературных источников по исследуемой тематике и критический анализ представленной в них информации [5, 13]. Анализ показал, что в доступных литературных источниках приведены преимущественно общие рекомендации по различным системам инженерного обеспечения функционирования катков без учета их взаимосвязи и взаимного влияния.

В результате литературного обзора сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты обзора и обобщения сведений о параметрах и конфигурации инженерных систем ледовых арен, оказывающих влияние на формирование температурного режима ледовой площадки, а также о физических свойствах материалов конструктивных элементов основания ледового поля, льда, воды и воздуха [1-4, 6-9, 13, 14].

Любая физико-математическая модель представляет физические процессы изучаемого объекта с определенными допущениями. Важным является системный учет определяющих исследуемые процессы факторов.

В нашем случае на ледовую пластину и основание ледовой площадки воздействуют внутренние источники теплоты и холода в виде трубопроводов системы охлаждения плиты и обогрева грунта для защиты от промерзания, на внешней границе ледовой пластины происходит конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой, конденсация водяных паров из воздуха. Важное и определяющее влияние на режим ледовой пластины оказывают: её толщина; материал и толщина рекламного баннера; шаг укладки, диаметр и материал труб холодоснабжения; материал и толщина плиты охлаждения; материал и толщина слоя теплоизоляции; шаг укладки, диаметр и материал труб системы защиты грунта от промерзания; влажность грунта; характеристики и параметры теплоносителя и холодоносителя; внутренние поверхности ограждающих конструкций; системы вентиляции и кондиционирования воздуха; тепловыделяющее оборудование; зрители и участники соревнований. При заливке льда поверхность формируемой ледовой пластины становится источником влагопоступлений в воздушное пространство арены.

Перенос теплоты в элементарном выделенном объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  в основании ледового поля и в воздушном пространстве ледовой арены описывается уравнением:

$$\rho_i c_i \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{w} \nabla T \right) = \lambda_i \nabla^2 T + q_v, \quad (1)$$

при  $\vec{w} = 0$ , выражение (1) является нелинейным уравнением теплопроводности с распределенными теплофизическими коэффициентами и источником теплоты.

Перенос водяных паров воздушного пространства ледовой арены описывается уравнением

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \vec{w} \nabla \omega = D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega + j_v. \quad (2)$$

Диффузия водяных паров и фильтрация капельной влаги в основании ледового поля, ввиду незначительного их влияния на температурный режим, не учитываются.

Установлено, что  $\vec{w} \nabla \omega \gg D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega$ . Поэтому при решении уравнения (2) для условий искусственной конвекции допускается принимать  $D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega = 0$ .

Уравнение движения

$$\rho_{\text{в}} \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \overline{\rho_{\text{в}} g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{w}. \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы (неразрывности) в элементарном объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  воздушного пространства при  $j_v = 0$

$$\frac{\partial \rho_{\text{в}}}{\partial \tau} + \nabla (\rho_{\text{в}} \vec{w}) = 0. \quad (4)$$

Уравнение энергии для несжимаемого потока жидкости в трубопроводе

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho A C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot A \lambda \nabla T + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{\text{стен}}. \quad (5)$$

При решении нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности граничные условия задаются исходя из конкретных условий переноса теплоты на границах расчетной области. Краевые условия для системы кондиционирования воздуха определяются её конфигурацией, а также температурой, скоростью и влажностью (или массовой концентрацией) водяного пара на выходе из воздухораспределителей. Система освещения арены

как источник теплоты учитывается на основании данных о структуре светового потока, температуре, форме, расположении и площади поверхности приборов освещения. Тепло- и влагопоступления от зрителей и участников соревнований учитываются как источники, равномерно распределенные по поверхности мест их нахождения:  $q_{\text{л}}$ ,  $m_{\text{л}}$ . Сток теплоты и водяных паров на поверхности льда учитываются как распределенные отрицательные источники. Учтены и особенности формирования ледовой пластины при подготовке арены к спортивным мероприятиям [4, 8, 9, 14].

Следует отметить, что исследуемые процессы происходят в турбулентных воздушных потоках. Наличие турбулентности приводит к интенсификации процессов переноса и увеличению коэффициентов теплопроводности и диффузии, изменению параметров газодинамического трения. Влияние этих факторов учтено с помощью  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности.

Найти аналитическое решение описанной системы уравнений при крайних условиях, соответствующих реальному строительному объекту не предоставляется возможным. Современный уровень развития математики и вычислительной техники позволяет решить эту систему численными методами – в нашем случае методом конечных элементов [4, 8, 9].

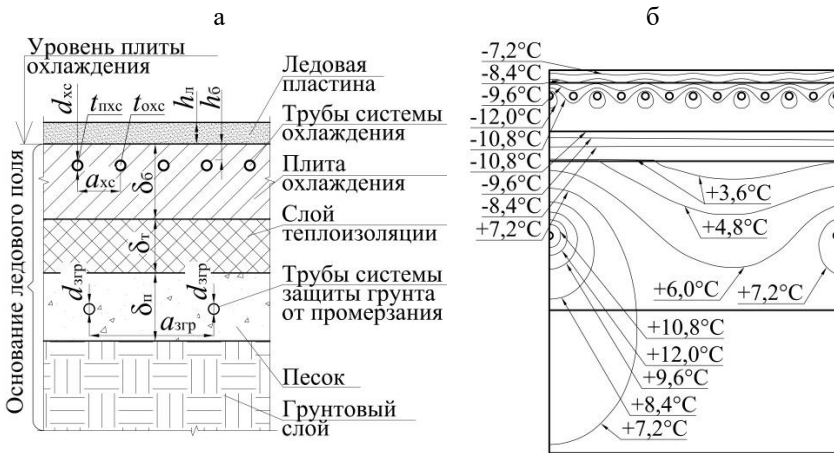
В настоящее время при изучении процессов тепло- и массообмена, гидро- и газодинамики в различных областях науки и техники, а также при решении различных инженерных задач используется численный эксперимент с использованием специализированных программных продуктов. Результат численного решения дифференциальных уравнений – числовой ряд или матрица. На основании обработки полученных данных строятся графические зависимости или формируются таблицы.

На рисунке 1 приведен один из результатов расчета температурного поля основания ледового поля при наличии тепловой защиты грунта, установившегося после формирования ледовой пластины [3].

**В третьей главе** представлены результаты проверки адекватности разработанной физико-математической модели реальным физическим процессам [2, 9, 11, 12]. Проверка достоверности результатов численного моделирования проводилась путем сравнения данных натурных измерений, полученных с помощью поверенных приборов, и данных численного решения уравнений переноса в подобной по технологическим и конструктивным параметрам модели.

В качестве натурального объекта исследования было принято ледовое поле ГУ «Ледовый дворец спорта Минской области» по ул. Притыцкого в г. Минске [2]. На ледовом поле была выбрана область, расположенная вблизи от распределительных коллекторов системы охлаждения и вне зоны влияния бортов на особенности теплообмена. Это позволяло с высокой степенью точности установить параметры холодоносителя в плите охла-

ждения, расположенной под экспериментальной площадкой. Размеры области равны 1\*1м. С помощью портативного тепловизора ИРТИС получали термограммы данной области, в контрольных точках области измерялась температура с помощью поверхностного датчика. На основании сравнения измеренной температуры и показаний тепловизора с целью настройки его параметров устанавливалась степень черноты поверхности льда. Данные были систематизированы и обработаны.



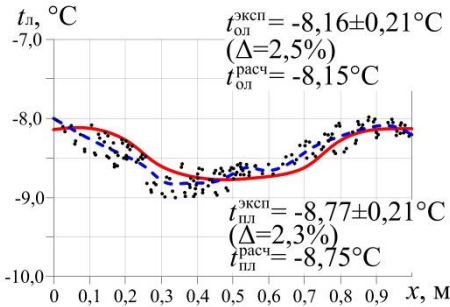
**Рисунок 1. – Разрез расчетной области основания (а) и распределение температуры (б) в конструкции основания ледового поля**

Полученные экспериментальным и расчетным путем распределения температур на поверхности льда подобны (рисунок 2) по характеру изменения и по величине. Отклонение расчетных от измеренных значений температуры поверхности льда над блоками 5-ти смежных подающих и 5-ти обратных трубопроводов различаются в среднем соответственно на  $0,21^{\circ}\text{C}$ .

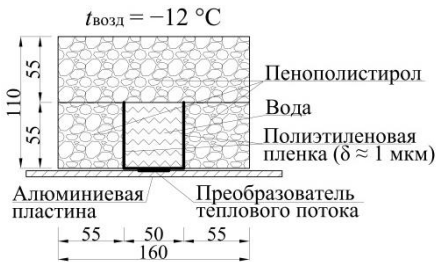
Аналогичное экспериментальное исследование распределения температуры на поверхности льда проводилось также и на МКСК «Минск-Арена» [9, 14]. Для исследования была выбрана область на краю ледового поля у распределительных коллекторов в месте установки защитного борта. Данная область характеризуется неравномерностью поля температур на поверхности льда за счет особенностей теплообмена у защитных бортов. Распределение температур на поверхности льда было получено с помощью портативного тепловизора IR Analyser.

Установлено, что в области защитного борта в зоне менее  $0,2$  м температура поверхности льда выше, чем в удаленной части ледового поля. От-

личие измеренных и расчетных локальных средних значений температуры поверхности льда у бортов составляет не более  $+0,8$  °С, а на удалении более  $0,2$  м менее  $\pm 0,2$  °С. Относительное отклонение расчетных от измеренных средних значений температуры поверхности льда составляет не более  $2,3$  %.



**Рисунок 2.** – Расчетное распределение температур (сплошная линия) и измеренные значения температуры (точки, пунктирная линия – осредненные значения) над подающим и обратным трубопроводами в пределах обследуемого участка



**Рисунок 3.** – Экспериментальная установка для определения скорости намерзания льда

результатов реальным физическим процессам показана во многих литературных источниках.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследования и анализа влияния каждого по отдельности и совокупного влияния на формирование температурного режима ледовой пластины и её основания основных определяющих факторов. Достаточное внимание уделено исследованию нор-

Скорость намерзания ледовой пластины является одним из ключевых параметров, оказывающих влияние на её технологические свойства. Автором экспериментальным путем она определялась при заливке ледового поля на МКСК «Минск-Арена» [12], а также в лаборатории кафедры ТГВ БНТУ на специально разработанной экспериментальной установке (рисунок 3). Результаты приведены в таблице 1.

Полученные в натурных и лабораторных исследованиях экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются между собой и подтверждают адекватность разработанной физико-математической модели реальным процессам переноса теплоты в основании ледового поля и при намерзании льда.

Возможность применения методов численного решения систем дифференциальных уравнений при исследовании сложных трехмерных полей и адекватность получаемых ре-

мирования средней температуры и температурной неравномерности поверхности ледового поля ( $t_{л}$ ,  $\Delta t_{л}$ , °C), а также уровню и составу теплопотоков к поверхности ледовой пластины и к системе холодоснабжения при различных условиях эксплуатации [1-3, 6, 7].

Таблица 1. – Сводная таблица результатов расчетов и измерений скорости намораживания льда

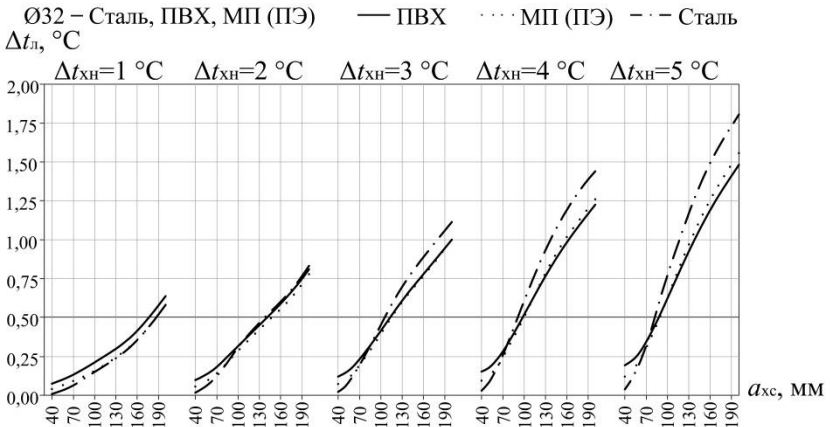
	Скорость намораживания льда, мм/ч	
	МКСК «Минск-Арена»	Лаборатория БНТУ
При экспериментальном исследовании	3,04 ± 0,14	3,25 ± 0,16
В результате численного решения дифуравнений	2,9	3,19
Относительное отклонение	4,6 %	1,8 %

Для определения влияния основных определяющих факторов на исследуемые параметры выполнены расчеты для некоторых конструкций основания ледового поля.

Расчетная область (рисунок 1а) представляет собой вертикальный разрез шириной  $\approx 1$  м и глубиной до 50 м (в зависимости от исследуемого параметра), расположенный перпендикулярно оси трубопроводов и вблизи места подключения трубопроводов системы холодоснабжения к распределительным коллекторам. Расчеты проводились для различных геометрических, теплофизических и конструктивных характеристик при одинаковых начальных и соответствующих граничных условиях с помощью специализированного программного продукта.

Автором проведен анализ влияния конструктивных характеристик труб системы холодоснабжения ( $a_{xc}$ ,  $d_{xc}$ ,  $\lambda_{xc}$ ), а также её технологических параметров ( $t_{пхс}$ ,  $t_{охс}$  и  $\Delta t_{хн}$ ) на температурное поле поверхности льда. Установлено, что сочетание характеристик  $a_{xc}$ ,  $d_{xc}$ ,  $\lambda_{xc}$ , а также  $\Delta t_{хн}$  (рисунок 4) определяют допустимые варианты конструкции плиты охлаждения, которые обеспечивают температурную неравномерность на поверхности льда менее 0,5 °C. Выявлено, что к повышению средней температуры поверхности льда ( $t_{ср}$ ) приводит применение труб для системы холодоснабжения из материалов с низким коэффициентом теплопроводности (ПВХ, EVA, EPDM, ПЭ, МП). К снижению  $t_{ср}$  приводит применение труб с высоким коэффициентом теплопроводности (сплавы стали и меди).

Определено максимальное значение шага укладки труб  $a_{xc}$ , обеспечивающее  $\Delta t_{л} \leq 0,5$  °C с учетом совокупного влияния  $\lambda_{xc}$  и  $d_{xc}$ , а также  $\Delta t_{хн}$ . Некоторые результаты исследований приведены в таблице 2.



**Рисунок 4. – Температурная неоднородность поверхности льда ( $\Delta t_{\text{л}}$ ) для труб с  $d_{\text{хс}}=32 \text{ мм}$  в зависимости материала (ПВХ, МП, сталь) и шага укладки труб ( $a_{\text{хс}}$ ), а также разности температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы охлаждения ( $\Delta t_{\text{хн}}$ )**

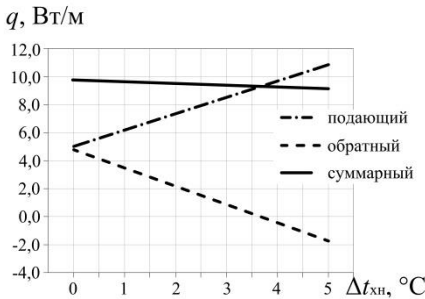
Таблица 2. – Максимально допустимый шаг укладки труб системы охлаждения, обеспечивающий требуемую температурную неоднородность поверхности льда (приводится только для  $d_{\text{хс}} = 10$  и  $32 \text{ мм}$ )

$d_{\text{хс}}, \text{ мм}$	Материал труб	Максимально возможный шаг укладки труб системы охлаждения, ( $a_{\text{хс}}, \text{ мм}$ ), при которой $\Delta t_{\text{л}} \leq 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$				
		$\Delta t_{\text{хн}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$				
		1	2	3	4	5
10	ПВХ	113	98	85	77	70
	МП	153	132	109	96	86
	Сталь	184	156	120	101	91
32	ПВХ	176	142	113	98	89
	МП	187	149	115	99	90
	Сталь	186	138	106	92	83

Выполнен анализ тепловых потоков к подающему и обратному трубопроводу системы холодоснабжения. На основе полученных данных показана зависимость «замкнутой» мощности охлаждения (переток теплоты от обратного трубопровода к подающему) от разности температур в подающем и обратном трубопроводе системы охлаждения (рисунок 5).

Снижение суммарного теплового потока к системе холодоснабжения ледового поля при увеличении  $\Delta t_{\text{хн}}$  обуславливается возрастающей тепло-

передачей от обратного трубопровода к подающему через массив плиты охлаждения ( $\lambda_6$ ).



**Рисунок 5.** – Зависимость теплового потока, поступающего к подающему и обратному трубопроводам длиной 1 м, от разности температур  $\Delta t_{\text{хн}}$

температуры холодоносителя и увеличения мощности холодильной машины.

Проведено исследование влияния конструктивной и прижимной арматуры в бетонной плите охлаждения на температурные параметры поверхности льда. Выявлено, что в случае наличия прижимной арматуры над трубопроводами системы холодоснабжения средняя температура поверхности льда становится ниже на  $\approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  по сравнению с вариантом отсутствия арматуры.

Выполнен анализ влияния наличия слоя теплоизоляции различной толщины под плитой охлаждения на глубину промерзания основания и величину тепlopоступлений к плите охлаждения со стороны грунта. Установлено, что слой теплоизоляции позволяет снизить тепlopоступления к системе холодоснабжения в среднем в 2,75 раза в течение первого года эксплуатации арены, предотвращает промерзание и пучение грунта. На основе анализа результатов расчета была установлена зависимость глубины промерзания грунта от его влажности, конструктивных особенностей основания и толщины слоя теплоизоляции в течение первых 10 лет эксплуатации ледового катка.

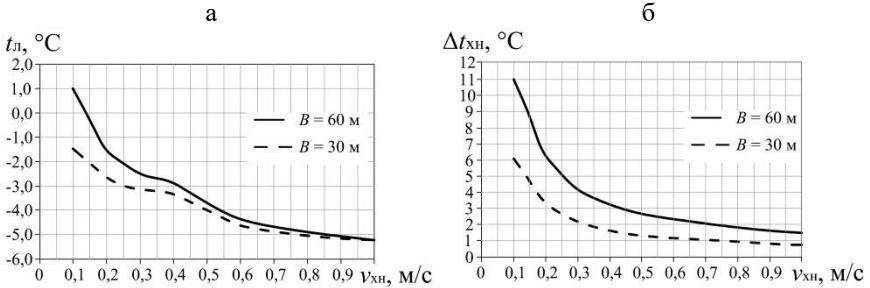
Проведен анализ влияния конструктивных характеристик трубопроводов ( $a_{\text{згр}}$ ) и технологических параметров системы защиты грунта от промерзания ( $t_{\text{пзгр}}, t_{\text{озгр}}$ ) на температурные параметры поверхности льда, а также на среднюю температуру грунта на этом уровне и тепловой поток к системе холодоснабжения.

Выполнено исследование влияния  $v_{\text{хн}}$  и  $t_{\text{пкс}}$  на температурный режим ледовой пластины. Установлена зависимость средней температуры поверхности льда и величины нагрева холодоносителя от его скорости в трубопроводах системы охлаждения и длины стороны ледового поля, вдоль

Выполнена оценка влияния параметров материала плиты охлаждения, а также устройства ледового поля на грунте, на температурные параметры поверхности льда. Установлено, что применение материалов с меньшим коэффициентом теплопроводности приводит к повышению температуры поверхности льда и к снижению эффективности системы холодоснабжения, обуславливаемую необходимостью понижения средней темпера-



которой проложены трубопроводы (рисунок 6). При  $v_{\text{хн}} > 0,25 \text{ м/с}$  не наблюдается существенного влияния её на  $\Delta t_{\text{л}}$ , а максимальная  $v_{\text{хн}}$  ограничивается потерями давления в трубопроводах  $\Delta H_{\text{хн}}$ . Оценено влияние на исследуемые процессы  $d_{\text{хс}}$ , длины петли трубопровода,  $\Delta t_{\text{хн}}$ ,  $v_{\text{хн}}$  и  $\Delta H_{\text{хн}}$  [7].



**Рисунок 6. – Зависимость средней температуры поверхности льда (а,  $t_{\text{срл}}$ ) и величины нагрева холодоносителя (б,  $\Delta t_{\text{хн}}$ ) от его скорости в трубопроводах системы охлаждения ледового поля ( $v_{\text{хн}}$ ) и длины стороны ледового поля, вдоль которой проложены трубопроводы системы охлаждения ( $B$ )**

Проведено исследование влияния  $t_{\text{пкс}}$  и  $t_{\text{охс}}$  на процесс намораживания льда и адаптацию температурного режима ледовой пластины к видам спортивных состязаний. Определен температурный режим и величина теплового потока при намораживании ледового поля. Также оценены  $v_{\text{нл}}$ ,  $\tau_{\text{н}}$  и  $\Delta \tau_{\text{н}}$  при различных значениях температуры холодоносителя (таблице 3).

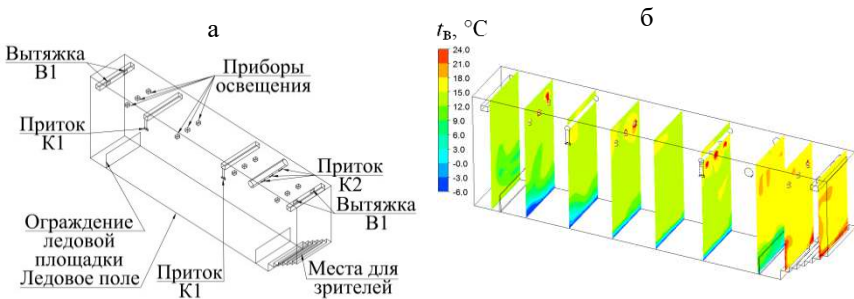
**Таблица 3. – Скорость, продолжительность и неравномерность намораживания льда толщиной 40 мм для некоторых значений температур холодоносителя**

$t_{\text{пкс}}/t_{\text{охс}}$ , °C	$\Delta t_{\text{хн}}$ , °C	$t_{\text{срхн}}$ , °C	$t_{\text{срл}}$ , °C	$\tau_{\text{н}}$ , ч:мин.	$\Delta \tau_{\text{н}}$ , ч:мин	$v_{\text{нл}}$ , мм/ч
-5 / -2	3	-3,5	-1,6	48:50	15:50	0,82...1,21*
-7 / -4	3	-5,5	-3,26	25:50	5:30	1,55...1,97
-8 / -4	4	-6	-3,68	24:20	6:00	1,64...2,18
-8 / -3	5	-5,5	-3,26	27:00	7:30	1,48...2,05
-13 / -8	5	-10,5	-7,49	12:30	2:30	3,2...4

\*- диапазон значений скорости намораживания ( $v_{\text{нл}}$ ), меньшее значение над обратным, большее - над подающим трубопроводом.

Проведено исследование влияния встраиваемых в ледовую пластину рекламных баннеров на процесс намораживания и эксплуатации льда. Установлено, что наличие их в теле ледовой пластины создает условия для снижения скорости намораживания ледового поля в зоне их расположения.

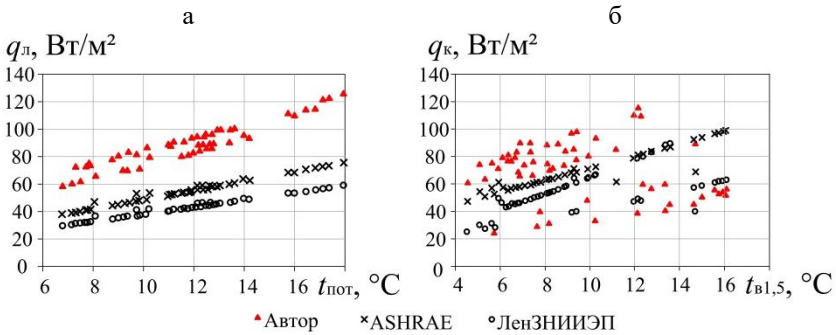
В рамках анализа температурных параметров поверхности льда проведено исследование влияния на эти параметры системы климатизации ледовой арены. Установлено, что воздушное пространство над ледовым полем можно условно разделить на три области (рисунок 7): **нижняя** холодная область сформирована за счет охлаждения воздуха льдом, она ограничивается бортами хоккейного поля; **средняя** формируется за счет воздействия приточных струй, а **верхняя** область образована воздействием теплых восходящих конвективных потоков от приборов освещения и нисходящими конвективными потоками от потолка, который имеет пониженную температуру за счет радиационного охлаждения поверхностью льда. Параметры приточного воздуха (температура, влагосодержание, расход) и конфигурация системы воздухораспределения оказывают значительное влияние на температуру поверхности льда и величину теплопритоков к системе холодоснабжения. Установлено, что с увеличением температуры приточного воздуха на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влагосодержания на  $1\text{ г/кг.с.в.}$  наблюдается повышение температуры льда в среднем соответственно на  $0,25\dots0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , средний тепловой поток к поверхности увеличивается соответственно на  $5\dots6\text{ Вт/м}^2$  и на  $10\dots12\text{ Вт/м}^2$  [15].



**Рисунок 7. – Расчетная область фрагмента внутреннего пространства катка (а) и распределение температуры воздуха по сечениям (б), перпендикулярным оси X**

Выполнен анализ теплопоступлений к поверхности льда. Уточнены величины теплопоступлений за счет радиационного и конвективного теплообмена, а также за счет конденсации и кристаллизации водяных паров из воздушного пространства (рисунок 8). Установлено, что величина конвективного теплового потока имеет сложную зависимость от многих факторов, поэтому в ответственных случаях для определения значения  $q_k$  для конкретного проектируемого объекта искомую величину необходимо определять на основании результатов математического моделирования. Определены теп-

лопоступления в процессе намораживания ледового поля и восстановления льда при проведении соревнований. Так, дополнительная величина теплового потока к поверхности льда при намораживании ледового поля составляет  $46,5 \dots 12,6 \text{ Вт/м}^2$  в зависимости от толщины уже намороженного слоя. С увеличением толщины льда дополнительный тепловой поток уменьшается. При восстановлении льда с увеличением температуры и толщины слоя заливаемой воды также увеличивается величина дополнительных теплопритоков ко льду и составляет  $1,7 \dots 57,8 \text{ Вт/м}^2$  [3, 15].



**Рисунок 8. – Лучистый тепловой поток (а), поступающий на поверхность льда, в зависимости от средней температуры потолка; Конвективный тепловой поток (б), поступающий на поверхность льда в зависимости от температуры на отметке +1,5 м**

Выполнен сравнительный анализ величины теплопритоков по результатам данного исследования с теплопритоками, определенными по методикам ЛенЗНИИЭП и ASHRAE (таблица 4). Установлено, что по величине теплопритоков, полученным по результатам математического моделирования, хорошо согласуется с современной практикой строительства крытых ледовых катков и требуемой мощностью холодильных машин по сравнению с результатами расчета по традиционным методикам.

Проведена технико-экономическая оценка конструктивных вариантов устройства основания ледового поля, при которых температурная неоднородность на поверхности льда составляет  $\Delta t_{\text{л}} \leq 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , и выполнено сравнение капитальных затрат на строительство плиты охлаждения, а также годовых эксплуатационных затрат для различных трубных конструкций бетонной плиты охлаждения ледовых катков и параметров холодоносителя при условии обеспечения температуры льда  $t_{\text{л}} = -6 \text{ } ^\circ\text{C}$  (рисунок 9). Установлены рекомендуемые параметры плиты охлаждения ( $\lambda_{\text{хс}}$ ,  $d_{\text{хс}}$  и  $\Delta t_{\text{хн}}$ ), которые соответствуют минимальным капитальным и эксплуатационным затратам.

Таблица 4. – Расчетная величина теплопритоков к системе холодоснабжения ледовой площадки ( $t_{л} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Расчетный режим	Расчетная величина теплопритоков, Вт/м <sup>2</sup>		
	По результатам диссертационного исследования	По методике, разработанной ЛенЗНИИЭП	По методике, предложенной ASHRAE 2006
Намораживание льда	236...333	–	332
В режиме эксплуатации льда (тренировка)	186...283	118...206	291...408
То же, игра	245...342	124...212	

Примечания: Диапазон значений теплового потока приведен для расчетной температуры воздуха на отметке +1,5 м надо льдом  $t_{в} = +6...+14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

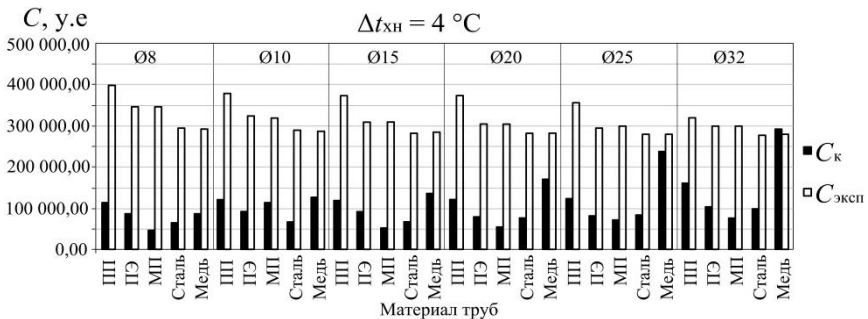


Рисунок 9. – Инвестиции на строительство плиты охлаждения (черный столбец) и годовые эксплуатационные затраты (белый столбец) для различных трубных конструкций бетонной плиты охлаждения ледовых катков и параметров холодоносителя при условии обеспечения температуры льда  $t_{л} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температурной неоднородности на поверхности льда  $\Delta t_{л} \leq 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

В пятой главе приводятся разработанные автором рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок [15].

Исходные данные к проектированию: назначение ледового катка (тренировочный, демонстрационный, многофункциональный или другое), его конструктивные, функциональные и технологические характеристики; требования нормативных документов к системам климатизации и к параметрам ледовой пластины; расчетные параметры внутренней воздушной среды, климатологические характеристики места строительства катка.

При проектировании конфигурации оборудования катка следует принимать во внимание виды деятельности и интересы разных групп пользователей.

Алгоритм проектирования конструкций основания ледовой площадки с учетом полученных результатов исследований (полная информация приведена в рукописи диссертации и в рекомендациях по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений [15]:

1. В зависимости от назначения катка принимается расчетная температура поверхности льда  $t_{л}$  и требуемая температурная неравномерность его поверхности  $\Delta t_{л} \leq 0,5$  °С.

2. Определяются удельные теплопритоки к системе холодоснабжения ледового поля для разных режимов эксплуатации (тренировка, игра, намораживание льда). В качестве расчетной выбирается максимальная величина  $\Sigma q = \max(\Sigma q_{\text{намор}}, \Sigma q_{\text{трени}}, \Sigma q_{\text{игра}})$ .

3. Определяются общие теплопоступления к ледовому полю по выражению:  $Q = \Sigma q F$ , Вт. Здесь:  $\Sigma q$  – удельный тепловой поток, приходящий на  $1 \text{ м}^2$  ледового поля (см. п. 2), Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь ледового поля, м<sup>2</sup>.

4. Назначается материал (рекомендуемые ПЭ, МП, сталь) и диаметр труб системы охлаждения. В зависимости от результатов выбора назначается расчетная разность температур холодоносителя,  $\Delta t_{\text{хн}}$ , °С.

5. Для обеспечения требуемой температуры льда ( $t_{л}$ , °С) в зависимости от толщины ледовой пластины ( $h_{л}$ , м) и требуемой температуры воздуха на отметке +1,5 м над ледовым полем определяется требуемая средняя температура холодоносителя ( $t_{\text{срхн}}$ , °С) и температура холодоносителя в подающем трубопроводе ( $t_{\text{пкс}}$ , °С).

6. На основании заданной температурной неоднородности поверхности льда ( $\Delta t_{л}$ , °С), принятого диаметра и материала труб (ПВХ, МП, сталь) и разности температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы охлаждения ( $\Delta t_{\text{хн}}$ , °С) назначается шаг укладки труб ( $a_{\text{хс}}$ , мм). Принятое значение шага укладки труб сравнивается с максимально допустимым.

7. Рекомендуется раскладка труб вдоль короткой стороны ледового катка. При такой схеме раскладки труб снижаются затраты на прокачку холодоносителя по трубопроводам по сравнению с раскладкой вдоль длинной стороны приблизительно в 4 раза.

8. В соответствии с назначением, конструктивными, функциональными и технологическими характеристиками катка определяются параметры конструктивных элементов основания ледового поля.

9. Экспертно оценивается проникновение нулевой изотермы в глубь грунтового массива и при необходимости изменяется толщина слоя теплоизоляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана физико-математическая модель тепло- и массообмена в ледовой пластине и основании ледового поля, включающая систему дифференциальных уравнений переноса и соответствующие краевые условия, отличающиеся системным учетом конструктивных, технологических и физических факторов; на основании существующих программных комплексов составлен алгоритм ее численного решения [1, 3, 4-9].

Адекватность положений разработанной модели реальным физическим процессам подтверждена хорошим совпадением результатов натуральных измерений и расчетных данных.

2. Результаты анализа проведенных исследований процессов формирования температурного режима основания ледовой площадки позволили:

- установить сочетания характеристик материала, диаметра и шага укладки труб, скорости движения (не менее 0,25 м/с) и разности температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы холодоснабжения, которые обеспечивают требуемую среднюю температуру и температурную неравномерность поверхности льда [1, 2, 6, 7, 15];

- рекомендовать для снижения расхода холодоносителя увеличить разность температур между подающим и обратным трубопроводами системы холодоснабжения до значения 3–4 °С [15].

- определить величину дополнительного расчетного удельного теплового потока к системе холодоснабжения в процессе намораживания ледового поля, которая составляет  $q_{\text{намор}} = 50\text{--}13 \text{ Вт/м}^2$ , в зависимости от толщины слоя уже замороженного льда; в процессе восстановления  $q_{\text{восст}} = 2\text{--}58 \text{ Вт/м}^2$  – в зависимости от толщины слоя воды [15].

- установить рекомендуемый диапазон скорости намораживания в процессе восстановления льда для хоккея равный  $v_{\text{н}} = 6\text{--}10 \text{ мм/ч}$ , для фигурного катания и конькобежного спорта  $v_{\text{н}} = 3\text{--}4 \text{ мм/ч}$  [3].

- определить положение нулевой изотермы при наличии системы защиты грунта от промерзания. Она должна находиться в слое теплоизоляции или над трубопроводами защиты и не распространяется вглубь грунтового массива. В случае отсутствия системы защиты грунта от промерзания максимально допустимый срок непрерывной эксплуатации ледового поля должен быть не более 1 года [2, 15].

Рекомендуется расчетный удельный тепловой поток, отводимый системой холодоснабжения, принимать 186–342 Вт/м<sup>2</sup> [15]. Конкретное значение определяется на основании расчета по предложенным рекомендациям проектирования конструкций основания ледовых площадок.

3. В результате технико-экономического анализа установлено сочетание конструктивных характеристик и режимных параметров основания ледовой площадки, а именно: материала, диаметра и шага укладки труб, разности температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы холодоснабжения, обеспечивающие минимальную стоимость  $1 \text{ м}^2$  конструкции плиты охлаждения и минимальные энергетические затраты на циркуляцию холодоносителя в трубопроводах системы холодоснабжения [15].

Внедрение разработанных рекомендаций было проведено на МКСК «Минск-Арена» и при проектировании систем холодоснабжения следующих объектов: «Культурно-развлекательный спортивный комплекс в жилом районе Чижовка в г. Минске. Малая арена», «Реконструкция универсального спортивного зала (катка) РУП «Республиканский горнолыжный центр «Силичи», «Устройство новой технологической плиты с системой холодоснабжения для Ледового дворца в г. Лиде, Гродненской области». Экономический эффект от внедрения рекомендаций только на двух объектах (МКСК «Минск-Арена», «Культурно-развлекательный спортивный комплекс в жилом районе Чижовка в г. Минске. Малая арена») составил 18 100 и 48 600 USD соответственно (подтверждено актами внедрения).

4. Разработаны рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок [15], включающие:

- алгоритм по выбору вариантов конструкции основания и расчету тепловых нагрузок на систему холодоснабжения для различных режимов эксплуатации ледовой площадки;
- величину дополнительного расчетного удельного теплового потока в процессе намораживания и восстановления ледовой пластины;
- методику выбора сочетания материала, диаметра и шага укладки труб; материала плиты охлаждения; скорости, средней температуры и разности температур холодоносителя, обеспечивающие минимальные капитальные и эксплуатационные затраты и требуемую среднюю температуру, и температурную неравномерность поверхности льда  $\Delta t_{\text{л}} \leq 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- рекомендации по определению конструктивных и рабочих параметров системы защиты грунта от промерзания.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты исследования и разработанные автором рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок и систем холодоснабжения могут быть использованы при проектировании, строительстве и эксплуатации ледовых арен, для учебных целей, разработке нормативных документов и рекомендаций.

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\rho_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $\lambda_i$  – соответственно объемная масса ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), удельная изобарная теплоемкость ( $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ) и коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ )  $i$ -го слоя элементарного объема расчетного массива при температуре  $T$ , К;  $t$  – время, с;  $\vec{w}$  – вектор скорости прохода воздуха через элементарный объем (в воздушном пространстве арены),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $q_v$  – мощность объемного источника (стока) теплоты,  $\text{Вт}/(\text{м}^3)$ ;  $\omega$  – концентрация водяных паров в объеме  $dx\cdot dy\cdot dz$  воздушного пространства арены,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $D_{\text{вп}}$  – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $j_v$  – мощность источника (стока) водяных паров,  $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ ;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – гравитационное ускорение,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $A$  – площадь поперечного сечения трубопровода,  $\text{м}^2$ ;  $C_p$ ,  $\lambda$  – соответственно теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , и коэффициент теплопроводности материала трубы (в частном случае конструкция трубы может быть многослойной, т. е.  $\lambda = f(r)$ ),  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – температура холодоносителя (теплоносителя), К;  $u$  – функция, определяющая поле скоростей в поперечном сечении трубопровода;  $Q$  – функция внутреннего источника теплоты,  $\text{Вт}/\text{м}$ ;  $Q_{\text{стен}}$  – функция, определяющая теплообмен холодоносителя (теплоносителя) через стенку с окружающей средой,  $\text{Вт}/\text{м}$ ;  $q_{\text{л}}$ ,  $m_{\text{л}}$  – тепло- и влагопоступления от зрителей и участников соревнований,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  и  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $a_{\text{хс}}$  – шаг укладки труб системы холодоснабжения, м;  $\Delta t_{\text{хн}}$  – разность температур холодоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы холодоснабжения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $W_{\text{гр}}$  – массовая влажность грунта;  $h_0$  – глубина проникновения нулевой изотермы в массиве грунта, м;  $t_{\text{пт}}$  – температура внутренней поверхности потолка,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{в1,5}}$ ,  $\varphi_{\text{в1,5}}$ ,  $d_{\text{в1,5}}$  – соответственно температура, относительная влажность и влагосодержание воздуха на высоте 1,5 м над поверхностью льда;  $d_{\text{хс}}$  – диаметр трубопровода системы холодоснабжения, м;  $h_{\text{б}}$  – толщина слоя бетона над трубопроводами системы холодоснабжения, м;  $\lambda_{\text{б}}$  – коэффициент теплопроводности бетона,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $h_{\text{л}}$  – толщина слоя льда, м;  $\lambda_{\text{хс}}$  – коэффициент теплопроводности стенки труб системы холодоснабжения,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $t_{\text{пхс}}$ ,  $t_{\text{охс}}$  – соответственно температура холодоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы холодоснабжения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta_{\text{из}}$  – толщина слоя теплоизоляции, м;  $\delta_{\text{рек}}$  – толщина рекламного баннера в теле льда, м;  $\lambda_{\text{рек}}$  – коэффициент теплопроводности материала рекламного баннера в теле льда,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $a_{\text{згр}}$  – шаг укладки труб системы защиты грунта от замерзания, м;  $t_{\text{пзгр}}$ ,  $t_{\text{озгр}}$  – соответственно температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы защиты грунта от замерзания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{\text{згр}}$  – диаметр трубопровода системы защиты грунта от замерзания, м;  $\lambda_{\text{згр}}$  – коэффициент теплопроводности стенки труб системы защиты грунта от замерзания,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\tau_{\text{н}}$  – продолжитель-



ность намораживания ледового поля, ч;  $v_{\text{пл}}$  – скорость намораживания ледового поля, мм/ч;  $v_{\text{хн}}$  – скорость движения холодоносителя по трубопроводам, м/с;  $q_{\text{н}}$  – удельный тепловой поток к системе холодоснабжения в процессе намораживания ледового поля, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{восст}}$  – удельный тепловой поток к системе холодоснабжения в процессе восстановления ледового поля, Вт/м<sup>2</sup>.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

**Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований**

1. Дячек, П. И. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2010. – № 2. – С. 41–47.

2. Ливанский, Д. Г. Анализ методов расчета и процессов формирования температурного режима основания ледового поля / Д. Г. Ливанский // Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 74–80.

3. Ливанский, Д. Г. Физико-математическая модель процессов формирования ледового поля / Д. Г. Ливанский // Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 69–79.

### **Статьи в научно-технических журналах**

4. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха / П. И. Дячек, С. А. Макаревич, А. Э. Захаревич, Д. Г. Ливанский // Вестн. МГСУ. – 2011. – Вып. 7. – С. 143–147.

### **Материалы докладов на конференциях, семинарах**

5. Livanski, D. G. Temperature mode of an ice covering of sports construction / D. G. Livanski // Heat pipes, heat pumps, refrigerators, power sources : proc. of the VII Minsk intern. seminar, Minsk, 8–11 Sept. 2008 / NIS Sci. Assoc. «Heat Pipes» [et al.] ; редкол.: Л. Л. Васильев, А. С. Журавлев, Л. В. Драгун. – Minsk, 2008. – P. 412–418.

6. Ливанский, Д. Г. Температурный режим ледового поля искусственных катков / Д. Г. Ливанский // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы VII Междунар. науч. конф., Волгоград, 13–17 мая 2009 г. / Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-т [и др.] ; редкол.: С. Ю. Калашников, В. Г. Диденко, А. Н. Гвоздков. – Волгоград, 2009. – С. 358–364.

7. Ливанский, Д. Г. Конструирование основания ледового поля на основе математического моделирования / Д. Г. Ливанский // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы VIII Междунар. науч. конф., Самарканд, 17–21 мая 2010 г. / Волгогр. гос. архитектур.-строит.

ун-т ; редкол.: С. Ю. Калашников, В. Г. Диденко, А. Н. Гвоздков (сост.). – Волгоград, 2010. – С. 457–463.

8. Ливанский, Д. Г. Математическое моделирование температурного поля искусственных ледовых покрытий / Д. Г. Ливанский, А. Э. Захаревич // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г.) : материалы конф. : в 2 ч. / С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информ. технологий, механики и оптики, Междунар. акад. холода. – СПб., 2015. – Ч. 1. – С. 30–33.

9. Ливанский, Д. Г. Математическое моделирование температурного режима ледовых арен / Д. Г. Ливанский // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2018». [Текст] : [труды научного конгресса]. В 3 т. Т. 3 / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т; отв. ред. А. А. Лапшин. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – С. 420-423.

### **Тезисы докладов**

10. Дячек, П. И. Формирование температурного режима ледового поля спортивных сооружений / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2008. – Т. 2. – С. 29

11. Ливанский, Д. Г. Экспериментальное исследование температурного режима ледового поля / Д. Г. Ливанский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 42.

12. Дячек, П. И. Исследование скорости намораживания ледового массива / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 126.

13. Ливанский, Д. Г. Обзор методик теплового расчета конструкции ледового поля / Д. Г. Ливанский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (68-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2015. – Т. 1. – С. 182.

14. Ливанский, Д. Г. Влияние окружающей среды на параметры льда МСК «Минск-Арена» / Д. Г. Ливанский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. (69-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и ас-

пирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 193.

### **Рекомендации по проектированию**

15. Рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений / сост.: П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский. – Минск: БНТУ, 2019. – 81 с.

## РЭЗЮМЭ

### Ліванскі Дзмітрый Генадзьевіч Тэмпературна-влагнастны рэжым лядовых пляцовак шматфункцыянальных збудаванняў

**Ключавыя словы:** крыты лёдавы каток, канструкцыя асновы лядовага поля, цепла- і масаабмен у аснове і ў паветранай прасторы лядовых арэн.

**Мэта працы** – распрацоўка тэхналагічных і канструктыўных рашэнняў, якія забяспечваюць патрабаваны тэмпературны рэжым лядовай пласціны, а таксама мінімізацыю энергетычных і эканамічных выдаткаў пры эксплуатацыі і будаўніцтве лядовага поля штучных каткоў.

**Метады даследавання.** Рашэнне пастаўленай задачы выканана з выкарыстання сістэмнага ўліку значных фізічных з’яў. Па класічным плане праведзены аналіз асобнага і сукупнага ўплыву на даследуемыя працэсы асноўных вызначальных фактараў ( $a_{xc}$ ,  $d_{xc}$ ,  $h_6$ ,  $\lambda_{xc}$ ,  $t_{пкс}$ ,  $t_{охс}$ ,  $\Delta t_{xc}$ ,  $\delta_{из}$ ,  $W_{гр}$ ,  $h_0$ ,  $\delta_{рек}$ ,  $\lambda_{рек}$ ,  $t_{пт}$ ,  $t_{в1,5}$ ,  $\Phi_{в1,5}$ ,  $d_{в1,5}$ , параметраў сістэмы кліматызацыі і інш.) на тэмпературу паверхні лёду ( $t_{л}$ , °C) і тэмпературную нераўнамернасць паверхні лядовага поля ( $\Delta t_{л}$ , °C), а таксама на велічыню цеплапрытокаў да лядовай паверхні пласціны і да сістэмы холадазабеспячэння пры розных умовах эксплуатацыі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Упершыню колькасна ацэнены ператок цеплыні ад зваротнага трубаправода да падаючага; у сувязі з гэтым для магчымых канструктыўных рашэнняў сістэмы холадазабеспячэння ўстаноўлены дапушчальныя межы змены рознасці тэмператур паміж зваротным і падаючым трубаправодам.

Атрыманы новыя звесткі пра дынаміку першаснага фарміравання лядовай пласціны і аднаўлення лёду ў перапынку паміж спартыўнымі спаборніцтвамі, а таксама па параметрах распаўсюджвання нулявой ізатэрмы ўглыб грунту пры працяглай эксплуатацыі катка. Упершыню сістэмна ацэнены ўплыў сістэмы кліматызацыі на працэсы эксплуатацыі лядовага поля.

З атрыманнем новых вынікаў ажыццёўлена тэхніка-эканамічнае параўнанне розных варыянтаў сістэмы холадазабеспячэння каткоў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Атрыманыя вынікі даследавання і методыка праектавання канструкцый асновы лядовых палёў і сістэм холадазабеспячэння могуць быць выкарыстаны ў вучэбным працэсе, пры распрацоўцы нарматыўных дакументаў і рэкамендацый, а таксама пры праектаванні, будаўніцтве і эксплуатацыі лядовых арэн.

**Вобласць прымянення:** будаўніцтва.

## РЕЗЮМЕ

### Ливанский Дмитрий Геннадьевич Температурно-влажностный режим ледовых площадок многофункциональных сооружений

**Ключевые слова:** крытый ледовый каток, конструкция основания ледового поля, тепло- и массообмен в основании и в воздушном пространстве ледовых арен.

**Цель работы** – разработка технологических и конструктивных решений, обеспечивающих требуемый температурный режим ледовой пластины, а также минимизация энергетических и экономических затрат при эксплуатации и строительстве ледового поля искусственных катков.

**Методы исследования.** Решение поставленной задачи выполнено с применением системного учета значимых физических явлений. По классическому плану проведен анализ влияния каждого по отдельности и совокупного влияния на исследуемые процессы основных определяющих факторов ( $a_{xc}$ ,  $d_{xc}$ ,  $h_0$ ,  $\lambda_{xc}$ ,  $t_{ixc}$ ,  $t_{oxc}$ ,  $\Delta t_{xc}$ ,  $\delta_{из}$ ,  $W_{гр}$ ,  $h_0$ ,  $\delta_{рек}$ ,  $\lambda_{рек}$ ,  $t_{пт}$ ,  $t_{в1,5}$ ,  $\varphi_{в1,5}$ ,  $d_{в1,5}$ , параметров системы климатизации и др.) на температуру поверхности льда ( $t_{л}$ , °C) и температурную неравномерность поверхности ледового поля ( $\Delta t_{л}$ , °C), а также на величину теплопритоков к поверхности ледовой пластины и к системе холодоснабжения при различных условиях эксплуатации.

**Полученные результаты и их новизна.** Впервые количественно оценен переток теплоты от обратного трубопровода к подающему; в этой связи для возможных конструктивных решений системы холодоснабжения установлены допустимые пределы изменения разности температур между подающим и обратным трубопроводом.

Получены новые сведения о динамике первичного формирования ледовой пластины и восстановления льда в перерыве между спортивными соревнованиями, а также по параметрам распространения нулевой изотермы вглубь грунта при длительной эксплуатации катка. Впервые системно оценено влияние системы климатизации на процессы эксплуатации ледового поля.

С получением новых данных осуществлено технико-экономическое сравнение различных вариантов системы холодоснабжения катков.

**Рекомендации по использованию.** Полученные результаты исследования и методика проектирования конструкций основания ледовых полей и систем холодоснабжения могут быть использованы в учебном процессе, при разработке нормативных документов и рекомендаций, а также при проектировании, строительстве и эксплуатации ледовых арен.

**Область применения:** строительство.

## SUMMARY

### Dmitry G. Livanskiy Temperature and humidity mode of ice square of multifunctional structures

**Keywords:** indoor ice rink, the design of the base of the ice field, heat and mass transfer at the base and in the airspace of ice arenas.

**Objective:** The purpose of the work is to identify technological and design solutions that provide the required quality of ice, as well as energy and cost – effective design of the base of the ice field of sports facilities.

**Method of research.** The solution of the problem is performed with the use of system accounting of significant physical phenomena. According to the classical plan the analysis of the impact of each individually and the cumulative impact on the studied processes underlying determinants ( $a_{xc}$ ,  $d_{xc}$ ,  $h_0$ ,  $\lambda_{xc}$ ,  $t_{nxc}$ ,  $t_{oxc}$ ,  $\Delta t_{xc}$ ,  $\delta_{из}$ ,  $W_{гр}$ ,  $h_0$ ,  $\delta_{pek}$ ,  $\lambda_{pek}$ ,  $t_{пг}$ ,  $t_{B1,5}$ ,  $\varphi_{B1,5}$ ,  $d_{B1,5}$ , settings, air conditioning system, etc.) on the surface temperature of ice ( $t_{л}$ , °C) and temperature unevenness of the surface of the ice field ( $\Delta t_{л}$ , °C), as well as the amount of leakage to the surface of the ice plate and to the cooling system under different operating conditions.

**Obtained results and their novelty.** For the first time, the heat flow from the return pipeline to the supply pipeline is quantitatively estimated; in this regard, for possible design solutions of the cooling system, the permissible limits of the temperature difference between the supply and return pipeline are established.

New data on the dynamics of the primary formation of the ice plate and ice recovery in the interval between sports competitions, as well as on the parameters of the propagation of the zero isotherm deep into the ground during long-term operation of the rink. For the first time, the influence of the climate system on the processes of operation of the ice field is systematically evaluated.

With the receipt of new data, a technical and economic comparison of different variants of the cooling system of the ice rink was carried out.

**Recommendations for use.** The results of the study, the design method of ice base and cooling systems can be used in the educational process, in the development of regulations and recommendations, as well as in the design, construction and operation of ice arenas.

**Application field:** construction.