

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора, член-корреспондента РААСН Кочева Алексея Геннадьевича на диссертацию «Методология создания систем обеспечения микроклимата в условиях фазовых превращений в помещении», представленную к защите Чуйкиным Сергеем Владимировичем на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.3-Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Актуальность темы исследования

Интенсивное испарение или парообразование в помещении, конденсация воды на строительных и ограждающих конструкциях, кристаллизация или сублимация воды на технологических поверхностях оборудования в значительной степени влияют на температурно-влажностный режим общественных и промышленных помещений, что необходимо учитывать при поддержании оптимальных или допустимых параметров микроклимата в обслуживаемых зонах. В настоящее время комплексный подход по решению данных задач не выработан, каждый из процессов рассматривается, как правило, в отдельности, без учёта сопутствующего выделения или поглощения энергии. Это приводит к ошибкам в расчетах, которые могут приводить к нарушению технологических циклов работы оборудования или перерасходу энергии. В этой связи, диссертационное исследование соискателя направлено на решение актуальной научно-технической проблемы развития методов расчёта и проектирования систем вентиляции, а выбранный тип помещений, на примере которого решаются поставленные задачи, в полной мере соответствует потребностям строительной отрасли в развитии новых информационных подходов к проектированию энергоэффективных инженерных систем.

Оценка содержания диссертации, степень её завершенности

Во введении изложены и обоснованы актуальность решаемой проблемы, определены цели, задачи, объект и предмет исследования, сформулированы научная гипотеза, методологическая база, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; положения, выносимые на защиту, степень достоверности и реализация.

В первой главе диссертации рассмотрены предпосылки исследования, существующие подходы к созданию систем обеспечения микроклимата в условиях фазовых превращений в помещении на примере крытых ледовых катков, а также выделены основные проблемы и возможные пути их решения.

Особый научный интерес вызывает представленный **во второй главе** диссертации раздел «Численное моделирование тепломассообменных процессов в помещениях в условиях фазовых превращений», в котором обосновывается выбор используемых методов моделирования полей скорости, температуры и влагосодержания воздуха при организованном и неорганизованном воздухообмене. Отмечается образование циркуляционных зон над поверхностью льда под действием течения Стефана. Разработанные компьютерные модели отличаются от существующих учётом возможных процессов испарения, конденсации, кристаллизации и плавления у поверхности льда. Исследуются гидро- и термодинамические процессы при выключенных системах вентиляции и кондиционирования воздуха в выходные и праздничные дни, а также в нерабочее время. Для примера было показано, что возникающий градиент Дарси приводит к формированию объемного воздушного потока, увлекающего влагу во всем объеме помещения при наличии пленки воды на поверхности тающего льда. Анализ величин изменения концентрации пара показал интенсивное растекание влаги вдоль поверхности ледового катка и формирование динамического равновесия с образованием изотермальных областей в слое воздуха над поверхностью льда. Разработанные модели верифицировались на базе результатов натурных обмеров температуры и относительной влажности воздуха в обслуживаемой зоне существующего крытого ледового катка, расположенного в г. Воронеж. Сравнение результатов показывает удовлетворительную сходимость, порядка 12...18%, что позволяет сделать вывод о применимости рассмотренного подхода и системы уравнений при моделировании тепломассообменных процессов систем обеспечения микроклимата в условиях фазовых превращений в помещении.

В третьей главе рассматриваются процессы теплообмена поверхности льда с воздухом обслуживаемой зоны. Выделяется три основных случая, которые могут наблюдаться при эксплуатации крытых ледовых катков. Первый случай характеризуется равенством подводимых и отведенных потоков явной теплоты ко льду. Во втором случае подводимый поток больше отводимого, наблюдается плавление льда, толщина пленки увеличивается, сухой теплый воздух охлаждается с одновременным увеличением влагосодержания. В третьем случае подводимый поток меньше отводимого, в результате, потоки теплоты и массы будут направлены от внутреннего воздуха, происходит нарастание массива льда, сопровождающееся одновременными процессами конденсации и кристаллизации с выделением скрытой теплоты. Формулируется гипотеза о нахождении на поверхности льда плёнки воды или квазижидкого слоя влияющего на теплообмен. Моделируется нестационарное течение тонкой неизотермической плёнки жидкости на горизонтальной поверхности под действием набегающего потока вен-

тиляционного воздуха. Для изучения характеристик потока жидкости и её теплопередачи разработана модель, включающая систему уравнений для численного моделирования развития волн на поверхности мелкой воды. Делается предположение, что природа данного явления схожа с природой течения слоя жидкости на горизонтальной пластине, размеры которой во много раз превышают толщину слоя. Моделирование показало наличие двух течений: ламинарного пристеночного и переноса волной. Для проверки адекватности результатов численного моделирования проведены экспериментальные исследования на разработанной установке. В ходе эксперимента проводились измерения температуры и относительной влажности датчиками термогигрометров. Так же велась видеосъёмка подсвеченной линейным источником света поверхности льда для регистрации его состояния. Анализ данных приведенных показывает, что при переходном режиме течения наблюдается интенсификация теплообмена, которая на 15-20% выше, по сравнению с ламинарным. Это объясняется образованием волнового течения на поверхности льда, которое так же было зарегистрировано при видеосъёмке с помощью теневого метода исследования. Анализ изменения формы волны показывает сдвиг фронта её гребня, делается акцент на появлении гармонических составляющих течения. Генерация второй гармоники и последующее увеличение амплитуды свидетельствует о градиенте скорости вдоль траектории волнообразования. Приводится скорректированная зависимость для расчёта коэффициента теплоотдачи поверхности искусственного льда при различных значениях подвижности воздуха, его температуры и относительной влажности.

В четвертой главе приводятся данные термографического обследования строительных и технологических поверхностей существующего крытого ледового катка для выявления характерных тепловых зон с температурами ниже температуры насыщения. Рассматривается температурный режим конструкций при стационарном и нестационарном радиационно-конвективном теплообмене, учитывающем радиационное охлаждение от поверхности льда. Для исследования нестационарного радиационно-конвективного охлаждения несущей конструкции, как наиболее вероятного места образования конденсата, выявленного при термографическом обследовании, была построена численная модель теплообмена, реализованная в пакете COMSOL Multyphysics и основанная на совместном решении системы уравнений теплопроводности, Фурье, Стефана-Больцмана и Бугера-Бэра. Разработана методика и программа расчёта нестационарного радиационно-конвективного теплообмена конструкций перекрытия ледового катка. Автором разработана итерационная модель расчёта температуры внутренней поверхности строительных и ограждающих конструкций крытых катков,

позволяющая осуществить поверочный расчёт минимально допустимой температуры поверхности, исходя из условий недопущения выпадения конденсата при установившемся режиме теплообмена.

В пятой главе уделяется внимание практическому приложению полученных результатов, предложены конструктивные решения, позволяющие добиться снижения энергетических затрат на осушение наружного воздуха при эксплуатации системы кондиционирования в холодный период года и включающие запатентованные схему воздухораспределения и конструкцию приточно-вытяжной установки системы кондиционирования зоны ледового поля. Разработаны аналитическая методика и программный комплекс расчёта параметров состояния влажного воздуха, позволяющий повысить точность расчёта микроклиматических параметров при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Отличительной особенностью предложенной методики является применение итерационного метода расчёта при выборе оптимального соотношения расходов воздуха на первой и второй ступенях рециркуляции. Используется тройная аналогия при рассмотрении конвективного теплообмена внутреннего воздуха с поверхностью льда, что позволило повысить точность расчёта влагопоступлений к удаляемому воздуху за счёт введения поправки к влагосодержанию.

Шестая глава диссертации посвящается разработке подхода к выбору наиболее целесообразного варианта проектного решения систем обеспечения микроклимата помещений с фазовыми превращениями воды, который включает математическую модель и алгоритм расчёта обобщенного векторного критерия оптимальности. Обосновывается выбор частных критериев, в качестве которых выбраны укрупненные параметры, описывающие изменение расходов теплоты, холода, электроэнергии, степени осушения воздуха и коэффициента эффективности воздухообмена. Верификация модели и определение области её применимости базируются на методе суммарных дисконтированных затрат за период жизненного цикла системы обеспечения микроклимата.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы, определены перспективы дальнейших исследований в данной области. В приложении приведены акты внедрения результатов научных исследований, примеры работы построенных компьютерных моделей, охранные документы на объекты интеллектуальной собственности, результаты расчётов энергопотребления на обработку воздуха в центральном кондиционере для рассмотренных вариантов систем.

Содержание автореферата отражает основные положения, идеи и выводы диссертации. В автореферате достаточно подробно излагается содержание диссертации.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендация, выносимых на защиту

В соответствии с актуальностью решаемых задач автор обоснованно выделяет разработку методологии создания систем обеспечения микроклимата в условиях фазовых превращений в помещении в самостоятельную научную проблему, имеющую существенное значение для снижения энергозатрат системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и увеличения срока эксплуатации рассматриваемых объектов. Теоретические исследования базируются на основных положениях тепломассообмена и системного анализа. Математические модели верифицировались путём анализа согласованности с результатами экспериментальных и натурных исследований. Принятые допущения также приводятся в работах других авторов. Полученные научные знания обладают воспроизводимостью и непротиворечивостью, что позволяет считать их достоверными и обоснованными.

Научная новизна диссертации

Говоря о научной новизне, нельзя не отметить оригинальность взгляда автора на проблему моделирования тепломассообменных процессов в помещении крытого катка, который отличается учётом влияния термодинамического фазового перехода воды за счёт уравнения сохранения массы через энтропию и возникающего течения Стефана над поверхностью льда. Так же следует отметить, что разработанная модель верифицирована на базе данных натурного обследования существующего крытого катка. В работе присутствуют все признаки научной новизны, характерные для докторской диссертации, и включающие новые распределения скорости, температуры и влагосодержания воздуха в помещении крытого ледового катка, необходимые для корректировки расчётных зависимостей при проектировании систем обеспечения микроклимата. Впервые рассмотрен случай неорганизованного воздухообмена в помещении крытого катка под действием течения Стефана, в результате получены зависимости, описывающие изменение площади конденсации водяного пара на внутренней поверхности перекрытия ледового катка и времени её охлаждения под действием радиационного отбора теплоты к ледовому полю. Так же следует отметить, что с помощью разработанной экспериментальной установки было доказано образование волнового течения пленки воды на поверхности тающего льда, а также построена модель развития течения в данной пленке под действием сдвиговых усилий потока воздуха. Предложенная модель теплообмена на поверхности льда учитывает переменную толщину слоя жидкости при волновом течении, что позволяет рас-

смотреть динамическое изменение продольного профиля волны с течением времени. Разработана методика расчёта нестационарного радиационно-конвективного теплообмена конструкций перекрытия ледового катка с воздухом верхней зоны, необходимая для определения времени охлаждения внутренней поверхности до температуры точки росы. В отличие от известных методик она учитывает: смещение теплового центра при несимметричном охлаждении в случае разнонаправленности тепловых потоков на противоположных сторонах конструкций перекрытия, и пространственные и конструктивные характеристики элементов перекрытия при их радиационном выхолаживании путём введения среднего коэффициента облучения и суммарного коэффициента теплоотдачи поверхностей тел конечных размеров. Предложена и верифицирована математическая модель, предназначенная для поиска рационального проектного решения системы обеспечения микроклимата крытого ледового катка по обобщённому векторному критерию минимума аддитивной функции. В целом, все полученные в рамках данной работы результаты автора являются оригинальными и новыми.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационного исследования основывается на предложенных, верифицированных и апробированных результатах численного моделирования развития течения тонкой пленки конденсата на поверхности искусственного льда, интенсивности конвективного теплообмена ледового поля с воздухом обслуживаемой зоны, воздухораспределения в зоне ледового поля. Теоретически значимым является так же полученное математическое описание процесса изменения параметров влажного воздуха при кондиционировании воздуха в зоне ледового поля. Разработанные схема воздухораспределения и конструкция приточно-вытяжной установки, алгоритмы и комплекс программ расчёта температуры, относительной влажности, подвижности воздуха зоны ледового поля, аналитические зависимости расчёта тепломассообменных процессов влажного воздуха с внутренними поверхностями помещения, а также полученные теоретические зависимости нарастания скорости и площади конденсации водяного пара от вертикальной координаты под действием радиационного охлаждения поверхностью льда могут использоваться при внедрении технологий информационного моделирования в комплексные системы вариантного проектирования вентиляции, кондиционирования воздуха, холодоснабжения крытых катков и арен с искусственным льдом.

Публикация и апробация основных результатов диссертации

По теме научных исследований опубликовано 34 работы, из них в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ по специальности защищаемой диссертации, опубликовано 13 работ квартилей K1 и

K2., 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 2 патента на полезную модель, 1 патент на изобретение, в том числе 3 работы опубликовано в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Основные результаты исследований и научных разработок докладывались и обсуждались на: научно-образовательном форуме «Инновации в сфере науки, образования и высоких технологий. Малое инвестиционное предпринимательство» (Воронеж, 2013); конференции «Инновационные технологии в системах теплогазоснабжения» (Воронеж, 2012); международной научной конференции «Градостроительство, инфраструктура и коммуникации» (Воронеж, 2014); XXI International Scientific Conference «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019» (Voronezh, 2019); XVI международной межвузовской научно-практической конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2013); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов» (Биробиджан, 2022); международной научно-технической конференции, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 2023); LXXVIII международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (Санкт-Петербург, 2024); II международная научная конференция «Civil, Industrial and Urban Construction» (Санкт-Петербург, 2025).

Замечания по диссертации

1. Из работы не ясно на скольких ледовых аренах проводились исследования?
2. Не может быть решением степенного уравнения (1.27) на стр.47 дробь в 1-ой степени (зависимость (1.28)), хотя результат подстановки в формулы (1.29) и (1.30) записан верно.
3. При построении процессов обработки воздуха на I-d-диаграмме используется полная теплота, поэтому следовало бы подробнее объяснить, почему в формулах (1.32)÷(1.34) на стр.51 и 52 написаны не энтальпии, а температуры?
4. При анализе численного моделирования выпадения конденсата на поверхности перекрытия на рис.2.16 и 2.17 необходимо указать период года, характеристики наружного климата и сопротивление теплопередачи конструкций здания ледовой арены.
5. Число Прандтля $Pr_b=0,71$ при температуре воздуха $t_b=20^{\circ}\text{C}$, поэтому следовало бы оценить погрешность результатов при использовании этого значения в формуле (3.10).

6. При исследованиях температуры внутренних элементов и ограждающих конструкций ледовой арены тепловизором NEC TH 7700 (Япония) рис. 4.1, паспортный диапазон измерений которого от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+250^{\circ}\text{C}$, автор не указал точность измерения температуры поверхностей ниже $+20^{\circ}\text{C}$ в табл. 4.1.

7. Автор не привёл оценку точности зависимости (5.24) на стр. 201, так как число Льюиса выполняется при молярном тепломассообмене.

8. В работе нет объяснений, почему при определении соотношений рециркуляционных расходов воздуха в зависимостях (5.27) ÷ (5.30) используются объёмные часовые расходы приточного воздуха на 1-ой и 2-ой ступенях рециркуляции, а не массовые часовые расходы, хотя выше утверждалось, что они имеют разные температуры?

9. В табл. 5.2 на стр. 204 ключевые точки C_1 и C_2 для определения энергосбережения на рис. 5.3 имеют значения $C_1 = +0,7^{\circ}\text{C}$, $C_2 = +3,5^{\circ}\text{C}$ при нормативной температуре наружного воздуха $t_n = -26^{\circ}\text{C}$, какова будет эффективность на рис. 5.3 при других параметрах наружного воздуха?

10. В работе имеются досадные орфографические ошибки и опечатки:

- Список литературы оформлен некорректно: см. п. 28 и п. 59;
- на рис. 2.10 в показано распределение влагосодержания по высоте, а подписано влажности;
- в разных главах одни и те же характеристики обозначаются разными символами: в главе 2 символом t в зависимостях обозначается время, символом τ – тензор напряжений; в главе 3 символ t – это температура, τ – время и т.д.;
- в формулах (3.3) и (3.8) размерность в ккал, а в формулах (3.2), (3.4), (3.5) в Вт;
- в первое уравнение системы (5.1) на стр. 185 должна входить полная теплота, а не явная, как написано в расшифровке символов;
- второе слагаемое в формуле (5.8) на стр. 192 не имеет заявленной размерности;
- в формуле (5.56) на стр. 206 размерность теплоёмкости теплоносителя в $\text{кДж}/(\text{с} \cdot \text{кг})$;
- на рис. 5.13 и 5.14 на стр. 215 и 216 направление стрелки вентилятора приточной установки должно быть в другую сторону.

Заключение

Диссертация выполнена на достаточно высоком теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты обладают необходимыми признаками научной новизны и практической значимости. В ней изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отраслей строительства и энергетики в части снижения энергозатрат на обеспечение заданных параметров микроклимата и

поддержания требуемых условий эксплуатации помещений. Большинство разработок диссертации представляют очевидную ценность для развития учебных дисциплин по направлению «Строительство». Обозначенные цели и задачи исследования достигнуты, положения, выносимые на защиту, доказаны.

Диссертационная работа Чуйкина Сергея Владимировича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно. Диссертация «Методология создания систем обеспечения микроклимата в условиях фазовых превращений в помещении» отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям доктора наук, соответствует паспорту научной специальности 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, а её автор Чуйкин Сергей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Кочев Алексей Геннадьевич

Подпись профессора Кочева Алексея Геннадьевича заверяю.

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный

архитектурно-строительный университет»,

доктор технических наук

Монич Дмитрий Викторович

« 27 » июня 2025г.

603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ильинская, д.65,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ).

Тел./факс: 8 (831) 434-02-91/ 430-53-48, e-mail: srec@nngasu.ru

Кочев Алексей Геннадьевич – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д.65, II корпус, ауд. 217; тел. (831) 433-45-35; e-mail: tgs@nngasu.ru. Научная специальность, по которой защищалась диссертация: 05.23.03. «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение».