

На правах рукописи

УДК 621.59

Шакуров Алексей Валерьевич

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО КРИОВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

Специальность 2.4.8 Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет ИТМО»
Баранов Александр Юрьевич

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО Дагестанский государственный
технический университет
Евдулов Олег Викторович

доктор медицинских наук, профессор
ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова
Минздрава России
Буторина Антонина Валентиновна

Ведущая организация: АО «Криогенмаш»

Защита состоится «11» сентября 2024 года в 14:30 на заседании Диссертационного совета 24.2.331.22 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

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

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5. к. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан «25» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22
кандидат физико-математических наук

А.А. Протопопов

Актуальность работы:

Общее газовое криотерапевтическое воздействие (ОГКВ, далее также криовоздействие) – это интенсивное охлаждение большей части поверхности тела человека длительностью от 3 до 6 минут с целью достижения ответной реакции (усовершенствованное «закаливание организма»). Положительный эффект применения криовоздействия доказан более чем 40 годами использования в Японии, Германии, Польше, Франции, США и России, которая традиционно является одним из лидеров в данной области. Подробная характеристика метода дана в обзоре литературных источников.

Имеются социально-экономические предпосылки для развития в РФ оборудования для выполнения криовоздействия в ответ на демографические вызовы XXI века. А именно, это потребность во внедрении средств здоровьесбережения с учетом индивидуальных особенностей человека в условиях старения, снижения численности населения, потребности в длительном образовании кадров высшей квалификации и урбанизации. Высокий риск эмбарго импорта медицинских изделий актуализировал борьбу за технологический суверенитет системы здравоохранения РФ. Возможны как варианты догоняющего развития, так и поиск альтернатив, основанных на опыте научных школ и внедрении инноваций. Одной из них является развитие техники и методов применения криовоздействия. При этом рациональным является постепенное расширение целевой аудитории метода. Приоритет сегодня – закаливание наиболее ценных специалистов, в том числе работающих в экстремальных условиях, например, военнослужащих. По 426-ФЗ такие условия классифицируются как опасные, имеющие угрозу жизни и высокий риск развития острого профессионального заболевания.

Имеется положительный опыт применения криовоздействия. Ранее, в XX веке, практика массового применения аналогичных методов водного закаливания показала их пользу и перспективность, но нерешенной осталась проблема индивидуализации выполнения криовоздействия.

Проблема индивидуализации не решена и для ОГКВ. Это достижение заданных значений температур вне зависимости от индивидуальных особенностей, а, следовательно, и последующие оптимизация, повышение эффективности метода, скорости адаптации, снижение неопределенности результата. Согласно 39-му информационному письму Международного института холода (г. Париж, 2020 г.), отмечены рост числа исследований криовоздействия: «Найдено 700 публикаций, треть из них за последние 5 лет» и актуальные задачи развития метода: «Оптимальные протоколы должны быть определены в зависимости от целей выполнения криовоздействия и характеристик целевой аудитории. Вопросы развития метода не решены и являются неотложными, над ними необходимо работать быстро». Однако, еще не создано подходящей для индивидуализации криовоздействия техники.

Недостаточная точность выполнения процесса охлаждения биообъекта (по отношению к температурным полям) существенно влияет на потребительские характеристики оборудования: на итоговое среднее снижение температуры поверхности и на однородность её охлаждения.

При охлаждении различных биообъектов применяется один и тот же режим подачи газа. Это приводит к тому, что при одинаковой длительности криовоздействия у них достигается различная средняя температура поверхности и наблюдается значительная неоднородность в охлаждении областей различной формы и размеров (до 10 К, что является до 40% от общего изменения температуры поверхности). Изменение длительности при этом не снимает проблемы неоднородности охлаждения. При этом установка для оператора как «черный ящик», в котором отсутствует возможность изменять режимы. В итоге на практике – «слепая эмпирика», недостаточные длительность и точность криовоздействия. Следовательно, необходимы регулируемый диапазон режимов подачи газа и техническая возможность для медико-биологических исследований по учету различий телосложения и других особенностей человека.

Кроме того, низкая энергетическая эффективность выполнения ОГКВ существенно влияет на основной технико-экономический показатель – себестоимость. Анализ источников подводимой к азоту теплоты показал, что около 70% её затрачивается на потери. Это связано с тем, что используются эмпирические условия подачи газа к человеку (скорость, направление потока, форма и расположение каналов), имеются высокие теплопритоки из-за недостатков конструкции. Следовательно, необходимо также провести теплофизические исследования границы человек-окружающая среда, совершенствовать процессы и аппараты, снижать теплопритоки.

Готовых решений вышеперечисленных проблем не было выявлено. В данной работе предложено изменить принцип создания оборудования для ОГКВ от погружения биообъекта (человека) в газ-хладоноситель к регулируемой подаче газа к нему с обратной связью по температуре поверхности. Критерии точности регулирования – (1) отличие достигнутой конечной средней температуры от заданной (ошибка), (2) разница средних температур на участках поверхности объекта (однородность). Однако, научные основы такого преобразования техники для выполнения ОГКВ ранее не были сформированы. Неизвестны диапазоны регулирования подачи газа для учета особенностей различных объектов охлаждения. Отсутствуют методики расчета процесса криовоздействия с достаточной для индивидуализации детализацией. Отсутствуют методики контроля. Необходимо провести исследования тепломассообмена в процессе выполнения ОГКВ, разработать новые конструкции и алгоритмы управления.

На основании вышеперечисленного был сделан вывод о том, что исследования и разработки в области регулирования для индивидуализации процесса охлаждения при проведении ОГКВ актуальны. Они имеют важное социально-экономическое значение. Таким образом, тематика данной прикладной работы относится к области актуальных исследований и разработок мирового уровня по созданию передовых технологий, направленных на переход к высокотехнологичному здравоохранению и к персонифицированной медицине, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие здравоохранения страны.

Объект исследования: оборудование и технология выполнения ОГКВ.

Предмет исследования: процессы тепломассообмена, научно-методические, конструкторские, технологические вопросы разработки и оценки технических средств, используемых в холодильной и криогенной технике. Биологические процессы не исследовались.

Цель работы: разработка концепции и технических средств регулируемого общего газового криовоздействия для обеспечения индивидуализации охлаждения человека.

Основные задачи:

1) Исследовать процесс теплообмена в исполнительном устройстве установки ОГКВ типа «криобассейн» при нерегулируемом криовоздействии длительностью от 3 до 7 минут, для получения исходных данных, необходимых для обоснованного создания физико-математических моделей.

2) Разработать трехмерные физико-математические модели объекта и оборудования, учитывающие взаимное влияние элементов конструкции и выявленные в эксперименте особенности охлаждения объектов. Разработать компьютерную программу моделирования тепломассообмена, верифицированную на основе проведенного эксперимента.

3) В рамках численного исследования с использованием разработанной модели получить данные о распределении температур и скоростей газа, о динамике изменения теплового потока от объектов охлаждения, имеющих различные характеристики, в нерегулируемом режиме подачи газа при ОГКВ.

4) Разработать и провести исследования элементов оборудования, обеспечивающих возможность реализации процесса регулируемого криовоздействия. Разработать концепцию выполнения регулируемого ОГКВ.

5) Разработать компьютерную программу, обеспечивающую прогнозирование результата регулируемого ОГКВ, и определить диапазон рациональных режимов подачи газа в исполнительное устройство установки.

6) Разработать техническое средство, обеспечивающее выполнение регулируемого ОГКВ, включающее в себя установку и алгоритмы выполнения регулируемых режимов.

7) Выработать рекомендации к медико-биологическим исследованиям, выполнению ОГКВ на практике и проектированию оборудования.

Научная новизна:

1) Предложено, обосновано и экспериментально изучено ОГКВ с регулированием теплового потока от человека для индивидуализации криовоздействия, обеспечивающей его безопасное и эффективное использование. Разработаны научные основы совершенствования процессов и аппаратов данного типа криогенного оборудования: концепция регулируемого выполнения ОГКВ (содержит особенности биообъекта и задачи его охлаждения, способы регулирования степеней свободы режимов подачи газа, этапы обеспечения точности), методика прогнозирования результата криовоздействия, схемы конструкций и подачи струи к биообъекту, способ контроля охлаждения, диапазон регулирования и алгоритмы подачи газа.

2) Впервые получен и проанализирован массив экспериментальных

данных об охлаждении поверхности объектов ОГКВ с учетом неоднородностей динамики изменения и распределения температур газа и поверхности объектов охлаждения (25 волонтеров с индексом массы тела от 18,2 до 32,7 кг/м², 123 криовоздействия от 3 до 7 минут).

3) Разработаны и верифицированы трехмерные физико-математические модели теплообмена (человека, оборудования) при ОГКВ, позволяющие определять параметры подачи газа, требуемые для достижения заданных режимов охлаждения (прогнозирование результата криовоздействия на различные объекты охлаждения с учетом их форм, размеров, особенностей внутренней структуры, а также особенностей конструкции установок ОГКВ).

4) Используя разработанные физико-математические модели теплообмена получены распределения температур и скоростей газа во время криовоздействия, а также значения теплового потока, отводимого от объекта охлаждения (индекс массы тела от 19,1 до 26,3 кг/м², с учетом взаимного влияния объекта охлаждения и оборудования).

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1) Создано оборудование для исследования и выполнения ОГКВ, содержащее:

- средство прогнозирования результата криовоздействия (компьютерная программа моделирования), которое позволяет решать круг задач индивидуализированного предварительного расчета криовоздействия с точностью прогнозирования средней температуры поверхности $\pm 1,2$ К.

- средство выполнения криовоздействия (установка ОГКВ и алгоритмы выполнения регулируемых режимов), которое впервые осуществляет регулируемое криовоздействие (персонализированные режимы охлаждения для повышения точности достижения заданной температуры и однородности конечного температурного поля). Совершенствование конструкции и процесса криовоздействия в таких установках позволяют снизить потребление жидкого азота до 30% по сравнению с нерегулируемым выполнением криовоздействия в современных установках типа «криобассейн».

2) Для проведения медико-биологических исследований и развития протоколов практического применения ОГКВ созданы методика эксперимента и опубликован массив экспериментальных данных о динамике охлаждения волонтеров, а также даны примеры алгоритма сбора данных, которые позволяют вести накопление эмпирических данных.

3) Для проведения контроля криовоздействия разработана методика внесения поправки в результаты бесконтактных измерений температуры поверхности в условиях наличия низкотемпературной дисперсной среды (ледяного тумана) между объектом измерения и чувствительным элементом.

4) Предложены устройство для испарительного охлаждения газа (патент РФ на полезную модель №202257 U1) и схемы установок (патент РФ на полезную модель №131612 U1, на изобретение №2804575).

5) Выработаны практические рекомендации по выполнению ОГКВ (в том числе по длительности криовоздействия, классификации режимов, учету локальных неоднородностей, прогнозированию результатов),

по проектированию установок ОГКВ (подаче газа, применению контроля температуры объекта, коррекции элементов конструкции).

Внедрение результатов работы:

Результаты работы внедрены на предприятии ООО «Криолинн» при разработке и производстве установки ОГКВ, а также в учебном процессе кафедры холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов:

Качество физико-математических моделей и результатов расчетов, методик проведения натуральных экспериментов и их результатов подтверждается тем, что они прошли рецензирование и опубликованы в ведущих научных журналах – International Journal of Heat and Mass Transfer, International Journal of Refrigeration. Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется также применением: апробированных методик и методов измерения, сертифицированного современного измерительного оборудования, многократной проверкой повторяемости экспериментальных данных, сходимостью результатов исследований с данными отечественных и зарубежных авторов.

На защиту выносятся:

1) Результаты теоретических, численных, экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена при охлаждении человека в качестве объекта криовоздействия, позволившие впервые получить данные о требуемых параметрах подачи газа для регулируемого выполнения ОГКВ.

2) Физико-математические модели элементов установки, объекта охлаждения и разработанная компьютерная программа моделирования (средство прогнозирования).

3) Концепция регулируемого выполнения ОГКВ.

4) Алгоритм подачи газа для регулируемых режимов ОГКВ.

5) Рекомендации к исследованиям, к выполнению ОГКВ, к проектированию оборудования.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на заседаниях и научных семинарах кафедры «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: Четвертой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов Будущее машиностроения России (Москва, 2011); II Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва, 2011); Научно-практической конференции «Chillventa Россия 2012» (Москва, 2012); Международной научно-практической конференции «Инновации в холодильной технике 2012» (Москва, 2012); X Международной научно-практической конференции «Криотерапия в России» (Санкт-Петербург, 2017); III Международной конференции «Conference on cold applications in life sciences – cryotherapy and cryopreservation», проводимой

Международным институтом холода (Санкт-Петербург, 2018); III Международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, 2019); III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020); 16-й международной конференции «CRYOGENICS 2021, IIR International Conference» (Прага, 2021); XXXVII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2021); VI Минском международном форуме по теплообмену (Минск, 2022), XXXIX Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2023). Всего 12 докладов, из них 8 на международных научных мероприятиях.

Личный вклад автора:

1. Проведение анализа современного состояния, технического обеспечения и исследований ОГКВ (с 2010 г.).

2. Подготовка и отработка методик и оборудования, участие в качестве исследователя и волонтера в проведении натуральных и модельных экспериментальных исследований. Анализ результатов.

3. Проведение численных исследований, разработка и отработка моделей. Анализ результатов.

4. Формирование и реализация концепции регулируемого выполнения ОГКВ для повышения точности охлаждения человека.

5. Разработка установки.

6. Организация и проведение испытаний, анализ их результатов.

7. Анализ результатов исследований. Формирование рекомендаций.

Публикации:

Основные результаты научных исследований, методологические положения, описание методик моделирования и концепции, выполненные в соавторстве или под руководством автора изложены в 25 научных работах, в том числе 17 – в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований (включая 10 в изданиях, входящих в системы «Scopus» и «Web of Science», 3 патента РФ), а также 8 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и приложения. Работа содержит 345 страниц, в том числе 321 страницу основного текста, 165 рисунков, 24 таблицы и 222 наименования литературных источников.

Соответствие паспорту специальности:

п.1. Изучение общих свойств и принципов функционирования аппаратов холодильной и криогенной техники, разработка научно-методических основ создания установок и агрегатов (установки ОГКВ).

п.2. Теоретические и экспериментальные исследования процессов холодильной и криогенной техники с целью выявления и углубленной оценки особенностей проявляющихся в них физических закономерностей, создания надежных алгоритмов управления и прогноза работы низкотемпературных

машин, аппаратов и установок (исследования тепло- и массопереноса хладоносителей при ограничениях, вводимых конструкцией и средой эксплуатации машин и аппаратов холодильной и криогенной техники).

п.3. Развитие методов натурального и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной и криогенной техники с целью поиска оптимальных решений по экономичности низкотемпературных установок (создание оборудования для кратковременного охлаждения теплоёмкого объекта различных размеров, сложных формы и внутренней структуры).

Благодарности:

Автор глубоко признателен своим учителям, коллегам, ученикам, в том числе коллективу кафедры Э4 «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» и в целом МГТУ им. Н.Э. Баумана за переданный опыт, личный пример, а также за содействие при проведении исследований, при подготовке рукописи и обсуждении результатов работы.

Работа выполнялась в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения. Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов Российского научного фонда (проекты 19-19-00359, 22-19-00018), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-1838.2020.2), Фонда содействия инновациям (договор 3481ГС1/57491).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит описание современного состояния метода, технического обеспечения и физико-технических исследований общего газового криотерапевтического воздействия (ОГКВ, далее также криовоздействие).

В разделе 1.1 описано криовоздействие. Сегодня это преимущественно эмпирический физиотерапевтический метод, который применяется:

1) для оздоровления, как элемент здорового образа жизни – для восстановления, повышения иммунитета, улучшения самочувствия, бодрости («закаливание организма»);

2) в спортивной медицине – после травм (без использования фармакологических средств способствует восстановлению поверхностных биотканей), как «допинг» для повышения тонуса опорно-двигательного аппарата, для повышения качества сна после нагрузок;

3) в физиотерапии – в комплексном лечении посттравматического стрессового расстройства, депрессии, тревожности и зависимостей, ревматоидного артрита, болей и дерматологических заболеваний.

Достигаемые эффекты: общий (коррекция накопленных изменений в организме) и местный (обезболивающий, противовоспалительный, противоотёчный, репаративный лимфодренажный, хондропротекторный).

Назначается курсами до 15 криовоздействий.

Основные его преимущества следующие: подходит для широких слоев населения (при соблюдении правил); не вызывает простуды; имеет мало противопоказаний (например, среди них тяжелые болезни сердца, повышенная температура тела); в отличие от водных процедур не требует длительной подготовки.

В части социально-экономических предпосылок для развития в РФ оборудования для выполнения криовоздействия в ответ на вызовы XXI века отмечено следующее. Согласно стратегии НТР РФ: научно-технический прогресс, демографический переход (старение, снижение численности и изменение образа жизни населения) – привели к новым социальным и медицинским проблемам, которые вызвали потребность в средствах здоровьесбережения (в том числе профилактики) и высокотехнологичной медицинской помощи. Согласно ФЗ № 323 «Об основах охраны здоровья граждан», профилактика – это комплекс мероприятий, направленных на сохранение и укрепление здоровья и включающих в себя формирование здорового образа жизни, а также устранение вредного влияния на здоровье человека факторов среды его обитания. В связи с этим отмечено, что ОГКВ является корректирующей тренировкой человека, проживающего в микроклимате помещений, находящегося под влиянием вредных факторов среды обитания и производственных процессов.

Согласно материалам Национальной технологической инициативы РФ, для повышения уровня качества жизни населения образ будущего для рынка медицинских технологий содержит увеличенную долю превентивной («фокус медицины должен перейти с лечения на оздоровление, профилактику и активный образ жизни») и персонализированной (с учетом индивидуальных особенностей пациента) медицины. Следовательно, в будущем наиболее перспективная и потенциально массовая задача для ОГКВ – персонализированная профилактика.

Организм человека как объекта охлаждения с точки зрения инженера (далее также биообъект) предлагается рассматривать, разделив на три зоны: внутреннюю структуру, внешнюю поверхность и границу человек-окружающая среда.

Внутренняя структура человека содержит:

1) Нервную систему (терморегулятор): рецепторы, каналы передачи сигналов, центральную нервную систему (ЦНС), реактивные механизмы. На реакцию индивидуально влияет уровень адаптации к холоду, гормональное регулирование и др. Температуру внутри тела биообъект стремится поддерживать на постоянном уровне.

2) Слои биотканей (внутренние слои кожи, жир и фасции, мышцы, далее «тепловое ядро» – подвижная внутренняя граница изотермы 37 °С, и их соотношение, на которое влияют пол, возраст, регулярные физические нагрузки и др.). Высокое влагосодержание приводит к высокой теплоаккумулирующей способности биотканей.

3) Кровоток (реакция сердечно-сосудистой системы для распределения теплоты по объему, неравномерен).

4) Метаболизм, термогенез в биотканях за счет окислительных реакций.

Внешняя поверхность объекта охлаждения имеет:

1) Терморцепторы кожи (на глубине $h \approx 0,17$ мм). Это целевая область.

2) Эпидермис различной толщины (температура от 29 до 35 °С).

3) Габаритные размеры и массу (интегрально их выражает индекс массы тела, $\text{кг}/\text{м}^2$).

4) Форму (туловище, конечности и локальные неоднородности необходимо рассматривать отдельно).

5) Термическое сопротивление, которое снижает тепловой поток (волосы на коже влияют на пограничный слой, закрытые тканью участки тела).

Граница человек-окружающая среда характеризуется следующим:

1) Имеет конвективную (приточная струя и восходящий поток) и радиационную составляющие теплового потока, которые образуют взаимное влияние элементов «объект-газ-оборудование».

2) Объект имеет возможность двигаться.

3) Объект имеет неохлаждаемые части (граница меньше общей площади поверхности тела).

Этапы криовоздействия:

1) Формирование реакций центральной нервной системы (до 2 мин.).

2) Прохождение пиков ощущаемых реакций страха, боли (до 4-ой мин.).

3) Выдержка для увеличения эффекта.

Процесс криовоздействия характеризуется следующим:

1) Холодовые рецепторы включаются при $T_{\text{кожи}} \approx 28$ °С и передают сигнал в центральную нервную систему (гипоталамус).

2) Охлаждение ощущается как холод и потом боль в коже.

3) Нервная система реагирует: на гормональном уровне, расширением капилляров, поведением психики. Например, кровь активно поступает к коже (она краснеет, пульс падает), потребление кислорода растет.

4) Максимум сигнала рецепторов – при $T \approx 10$ °С.

5) Ниже $T \approx 8$ °С рецепторы выключаются. Предел безопасного снижения температуры – спазм сосудов ($T \approx 0$ °С). Подбор конкретных значений параметров охлаждения объекта возможно провести только в рамках медико-биологических исследований. Задача техники – дать возможность менять тепловой поток для достижения заданной температуры поверхности (как в среднем, так и локально).

Применение газа (воздуха или азото-воздушной смеси, с ледяным туманом) в качестве промежуточного теплоносителя основано на требованиях гигиены, безопасности и на его низкой теплоёмкости, которая позволяет интенсивно охлаждать поверхность человека с длительностью, достаточной для формирования реакции. Такое охлаждение требует значительного увеличения разности температур между человеком и газом, что повлекло за собой необходимость создания специализированной техники.

В разделе 1.2 описано техническое обеспечение ОГКВ (Рисунок 1). В отличие от систем жизнеобеспечения данный тип низкотемпературной техники нацелен на создание краткосрочных экстремальных условий.

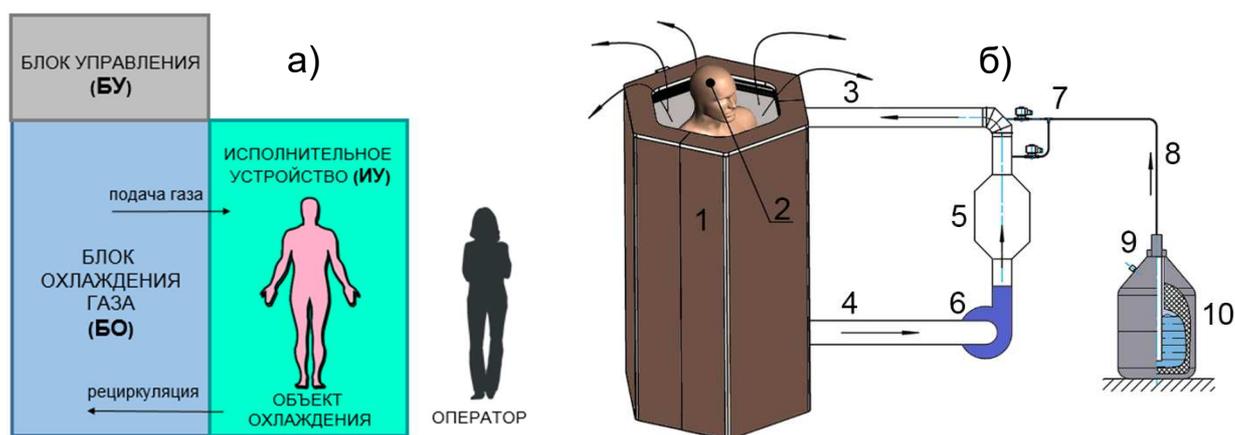


Рисунок 1. Установка для проведения криовоздействия

а) обобщенная структурная схема. ИУ применяются следующих типов – с открытым («криобассейн») и закрытым (в них охлаждаются голова и шея) верхом, для индивидуальных или групповых криовоздействий.

б) упрощенная схема азотной установки (1 – стенки ИУ, 2 – объект, 3 – канал рециркуляции, 4 – канал вытяжки, 5 – смеситель, 6 – вентилятор, 7, 8 – трубопровод подачи жидкого азота, 9 – устройство выдачи жидкого азота, 10 – сосуд Дьюара).

Его основные особенности:

- 1) высокий температурный напор в аппарате (до 170 К);
- 2) кратковременная работа (один, серия пусков от 3-х до 7-ми минут).

Сегодня в мире применяются почти все ранее разработанные серийные и опытные образцы установок ОГКВ (всего их произведено несколько тысяч). Блоки охлаждения применяются на основе жидкого азота или ПКХМ. Первая установка была сконструирована в 70-е годы, в Японии. Основными странами-разработчиками стали Германия, Польша и СССР. В России основной вклад внес профессор Баранов А.Ю., начинавший работы под руководством профессора Головки Г.А. Сегодня наиболее современными являются образцы производства США, однако, они не имеют ни средств регулирования, ни средств контроля криовоздействия. В разделе 1.2 также даны технические требования к перспективным образцам.

Первая ключевая проблема в данной области – повышение точности выполнения ОГКВ. Для этого необходима возможность регулировать отводимый от объекта охлаждения тепловой поток (например, в диапазоне от 1,5 до 3 кВт) согласно задаваемой оператором программе охлаждения. Современные установки ОГКВ не способны проводить такое регулирование. Основной причиной этого является одна из основ проектирования ИУ – концепция погружения биообъекта в пассивную охлаждающую среду (с нерегулируемыми по отношению к нему температурой и расходом на входе в аппарат, по типу «нахождение в ёмкости с малоподвижной текучей средой»). Преимуществом данного подхода являлась простота, которая в условиях недостаточной исследованности ОГКВ позволила снизить количество рассматриваемых степеней свободы организации процесса теплообмена в ИУ. При таком подходе температура и скорость движения газа должны быть

невысокими (что в частном случае может обеспечивать относительно равномерный по поверхности объекта тепловой поток). Следовательно, на практике для характеристики ОГКВ используют – «температуру газа» и «общую длительность криовоздействия» (используют изменение только длительности для конкретного оборудования). Но одного параметра – длительности недостаточно. Её ограничивают локальные минимумы температуры на поверхности объекта охлаждения. Так, например, в условиях слишком большого теплового потока (для произвольного объекта) ввиду неоднородности строения человеческого организма локально температура поверхности объекта может достигнуть предельных разрешенных значений, а в других же местах и на глубине он охладиться должным образом не успеет. В таком случае, необходимо переходить к более общему случаю регулирования процесса теплообмена в данном аппарате. Однако, ранее были неизвестны пределы диапазона регулирования и наиболее предпочтительные его области. Для этого необходима эксплуатация опытных образцов перспективных установок. Сегодня ни техническое обеспечение, ни практикующие специалисты не готовы осуществлять ОГКВ с применением большего числа степеней свободы криовоздействия. Следовательно, сначала необходимо создать опытное оборудование (инструмент исследования) и передать его на проведение медицинских исследований. В итоге этого процесса вся номенклатура установок ОГКВ может прийти к единому исполнению ИУ, поддерживающему стандарт качества криовоздействия.

Вторая ключевая проблема – повышение доступности ОГКВ. С инженерной точки зрения, для этого температура и скорость газа должны быть более высокими, чем в современных образцах. Следовательно, с точки зрения энергосбережения, из всей области диапазона параметров ОГКВ наиболее предпочтительна область с наивысшими температурами и скоростями. Возможно расширить рассмотрение данной задачи из области криогенных технологий в область кондиционирования и вентиляции (распределение воздуха в помещении). В таком ключе установки ОГКВ можно рассматривать как частный случай систем кондиционирования (хотя у них цели – противоположные). При таком подходе, наиболее близкий аналог такого оборудования – прецизионный (высокоточный) кондиционер. Общее с прецизионным кондиционером: высокие требования к точности подачи газа к объекту охлаждения и рециркуляции газа и, следовательно, к системе автоматики.

Раздел 1.3 содержит анализ результатов физико-технических экспериментов и численных исследований. Обработано более 200 источников (технические вопросы ОГКВ). Ими занимались специалисты из РФ (ИТМО, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана), Беларуси, Польши и Франции. Основной вывод: альтернативных предложенному в данной работе решений ключевых проблем не выявлено.

В разделе 1.4 описаны задачи перехода к регулируемому выполнению ОГКВ. Для осуществления такого подхода, необходимо раскрыть ключевые неопределенности, лежащие в нескольких взаимодополняющих друг друга

направлениях. Среди них теоретические и практические вопросы:

- 1) индивидуализации ОГКВ (диапазон параметров и последовательность их изменения для различных объектов);
- 2) рационализации температуры, скорости охлаждающего газа;
- 3) повышение энергетической эффективности используемого оборудования.

Для раскрытия описанных выше неопределенностей на основе физического эксперимента был необходим вычислительный эксперимент. Было необходимо описать концепцию перехода к регулируемому выполнению ОГКВ. Для его обеспечения также было необходимо изменить блоки охлаждения, которые должны формировать поток охлаждающего газа (изменением частоты вращения вентилятора, расхода хладагента и т.п.). Они накладывают свои ограничения на процесс теплообмена в ИУ. В итоге, после разработки и испытания оборудования, его возможно использовать для проведения медико-биологических исследований по рационализации выполнения ОГКВ. Было выдвинуто предложение: направить регулируемую струю к человеку. Однако, ранее было неизвестно, как это правильно и безопасно сделать. В современном оборудовании приточную струю направляют в свободное пространство ИУ. Например, в установке КАЭКТ-01 она двигается вдоль стенки, происходит теплообмен с объектом охлаждения, массообмен с окружающей средой, далее газ поступает на рециркуляцию. Требуемые для перехода к направленной подаче исследования и разработки:

- 1) Определение диапазонов, зависимостей для регулирования подачи газа с учетом особенностей объектов охлаждения (скорость, температура, направление, длительность).
- 2) Обеспечение контроля температуры объекта в условиях криовоздействия.
- 3) Создание моделей расчета ОГКВ с достаточной детализацией процесса охлаждения объекта для его регулирования и прогнозирования.
- 4) Поиск способов повышения однородности криовоздействия. Анализ неоднородностей и динамики охлаждения поверхности различных объектов (в эксперименте).
- 5) Создание оборудования нового поколения и новых алгоритмов подачи газа.

Во второй главе описаны результаты экспериментального исследования теплообмена в ИУ типа «криобассейн» в типовом режиме ОГКВ. Раздел 2.1 содержит краткое описание постановки экспериментального исследования. В разделе 2.2 описаны результаты испытаний типового оборудования. Получены данные для анализа соответствия динамики изменения температуры газа в ИУ типовой конструкции исполнительному устройству экспериментального стенда. Установлено, что температуру охлаждающего газа в ИУ возможно достаточно точно измерять с применением малогабаритных термометров сопротивления. Также установлено, что для измерения температуры поверхности биообъекта после криовоздействия приемлемо применять средства бесконтактной ИК-термометрии. Вне

зависимости от размера абсолютной ошибки измерения тепловизор позволяет сравнивать результаты криовоздействий по разнице между двумя снимками, т.к. неопределенность измерений в данном случае значительно меньше.

Раздел 2.3 содержит описание результатов разработки экспериментального стенда и методики проведения эксперимента. Использованы типовые условия на входе газа в ИУ, блок охлаждения установки «КАЭКТ-01 Крион» (Россия): средняя температура газа на входе -178 ± 2 °С (пилообразная подача), средний массовый расход 45 ± 3 г/сек. Проведено 78 криовоздействий (17 волонтеров, ИМТ от 18,1 до 32,7 кг/м²). Длительность от 3 до 7 минут (шаг 1 мин.). Человек рассмотрен только теплофизически. Использовано два тепловизора: Flir P620 и InfraTec VarioCAM HD. Разница температур между снимками составляла $\pm 0,2$ °С, тогда как абсолютная температура ИК-изображений VarioCAM была на $1,2 \pm 0,2$ °С выше. Общая погрешность определения среднего снижения температуры частей тела $\pm 0,3$ °С. Инструментальная погрешность измерения температуры газа от температуры окружающей среды (не более $\pm 0,2$ °С) до температуры кипения жидкого азота (не более $\pm 1,3$ °С).

Раздел 2.4 содержит результаты проведенного в лаборатории кафедры Э4 МГТУ им. Н.Э. Баумана экспериментального исследования. В итоге исследований для верификации модели были получены подробные данные по динамике и распределению температур газа в ИУ во время криовоздействия (Рисунок 2). Влияние габаритов объекта заключалось в отставании по времени, т.к. пилообразная подача сглаживает разницу по абсолютным значениям температуры (Рисунок 3).

Впервые были получены количественные значения влияния внешнего термического сопротивления, динамика и распределение пятен минимумов и средних температур для областей объекта (различной формы). В части однородности температуры поверхности объекта выявлено, что:

1) Термическое сопротивление поверхности (в том числе волосяного покрова) обеспечивает отставание в охлаждении (по сравнению с его отсутствием) на значения от 3 до 5 К за 3 мин.

2) Минимумы температуры наблюдались на выпуклых областях, а также на периферии вблизи изоляции (срыв пограничного слоя, Рисунок 4). Показано, что компартменты конечностей имеют минимумы температур по сравнению с компартментом «торс».

3) Достигнута 7-ми минутная длительность безопасного выполнения криовоздействия.

4) Необходимо анализировать 3 части компартмента «торс» по высоте. Подтверждено, что его переднюю и заднюю поверхности следует рассматривать отдельно.

5) Получены численные значения влияния слоев биотканей. В том числе, о том, что, мышцы увеличивают однородность и температуру поверхности (охлаждение быстрее проникает внутрь по сравнению с наличием большего слоя подкожной жировой клетчатки, являющегося теплоизоляционным).

Выводы по средней температуре участков поверхности объекта:

1) Подтверждено, что поверхность кожи лиц женского пола охлаждается быстрее (т.к. больше подкожного жира, Рисунок 4, Таблица 1).

2) Быстрее всего охлаждались конечности, это необходимо учитывать при разработке оборудования нового поколения (Рисунок 5).

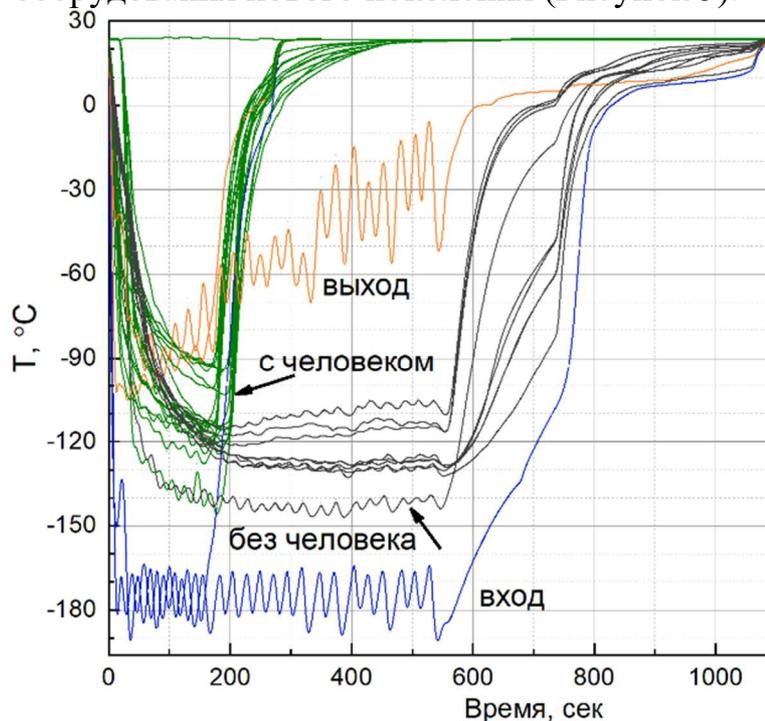


Рисунок 2. Пример динамики изменения и распределения температуры газа в аппарате ИУ без человека (600 сек.) и с человеком (180 сек.). Сверху – выход газа из ИУ, снизу – вход. Без объекта газ в ИУ разделялся на 2 части по высоте.

В верхней преимущественно осуществлялась циркуляция вход-выход. Входящий поток перемешивался с газом в ИУ, и его температура резко возрастала. В нижней – температура газа была от -126 до -131 °С (т.к. без объекта в ИУ количество газа избыточно для его охлаждения и циркуляция газа от входа к выходу втягивала воздух из помещения). С объектом температура была выше, чем без него на значения от 20 до 30 К

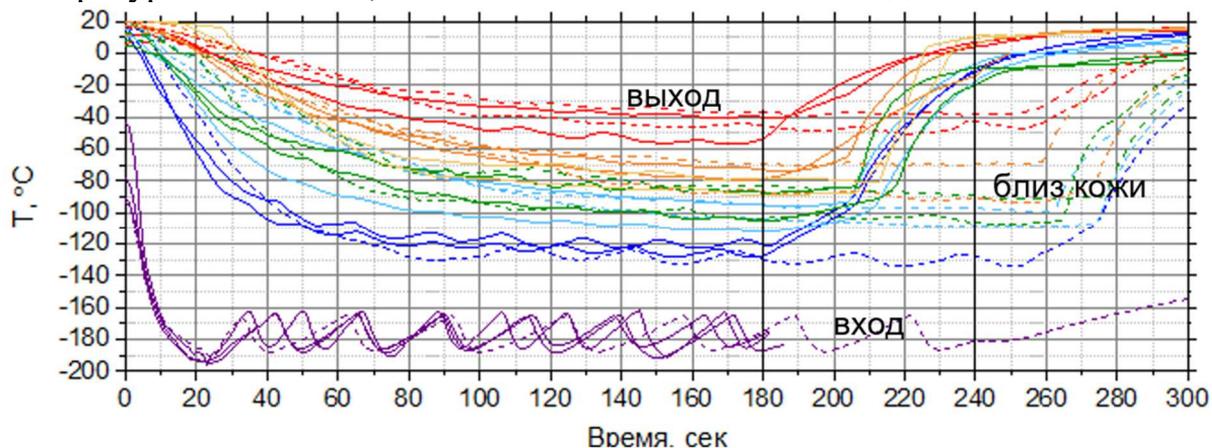


Рисунок 3. Распределение температуры газа в аппарате ИУ. Непрерывными линиями показаны данные измерений для волонтеров с ИМТ от 26 до 28 кг/м², прерывистыми – от 20 до 22 кг/м² при длительности ОГКВ 180 и 240 секунд

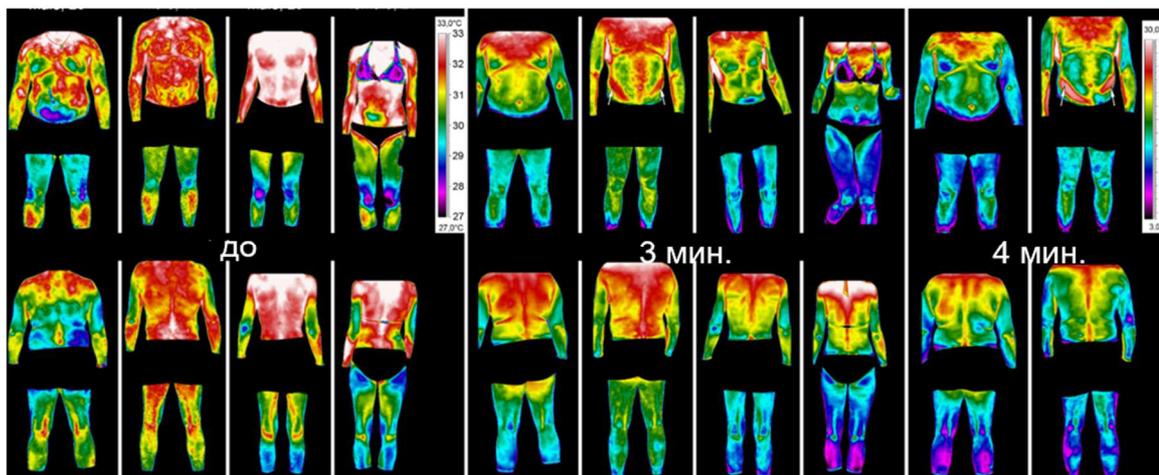


Рисунок 4. Примеры инфракрасных изображений объектов охлаждения до и после криовоздействия (цветные изображения предоставлены в электронной версии)

Таблица 1.

Снижение температуры поверхности объекта охлаждения

Индекс массы тела (ИМТ), кг/м ² ±0.25	Снижение температуры поверхности объекта, °С ± 0.3					
	Компартмент «ноги»			Компартмент «горс»		
	180 сек	240 сек	Примечание	180 сек	240 сек	Примечание
18.2	17.5	-	-	12.9	-	НВ
19.1 жен	20.3	-	нет вол. (НВ)	15.5	-	НВ
19.6	15.5	-	мышц больше среднего (МБС)	13.6	-	МБС
19.8 жен	20.5	-	НВ	15.4	-	НВ
19.9 жен	20.8	-		15.9	-	
20.7	17.5	-	-	14.1	-	НВ
21.3	17.2	20.8	-	14.4	16.8	НВ
22.8	17.1	20.5	-	13.8	16.8	-
22.9	17.3	-	-	14.0	-	-
24.1	15.2	18.7	вол. больше среднего (ВБС)	13.3	16.1	МБС
24.2	17.7	-	-	12.7	-	МБС
24.5	19.5	22.0	НВ	12.2	14.4	МБС
26.2	16.8	20.6	-	13.8	16.3	НВ
26.3	15.6	18.8	ВБС	12.1	14.7	ВБС
26.6	13.8	17.5	ВБС, МБС	10.8	13.6	ВБС, МБС
27.8	16.8	20.4	-	13.3	15.9	НВ
32.7	14.7	17.8	-	12.0	14.7	-

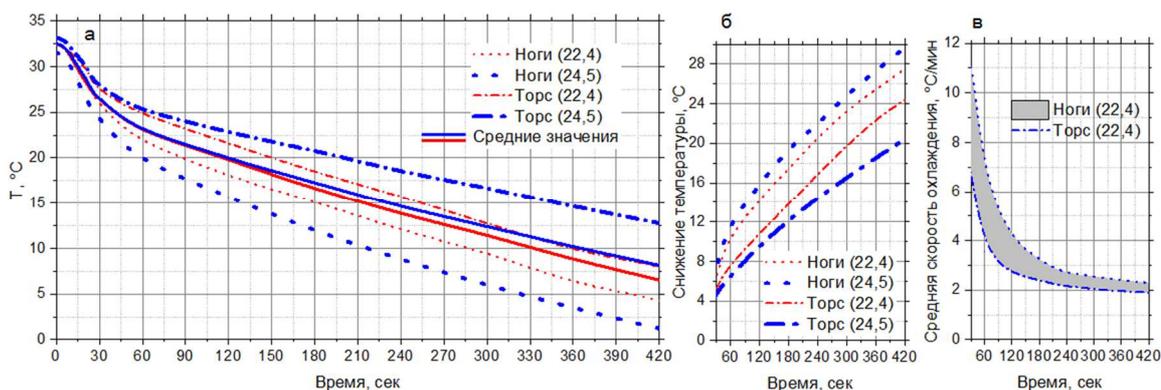


Рисунок 5. Средняя температура участков поверхности объектов с индексом массы тела 22,4 и 24,5 $\text{кг}/\text{м}^2$ (Таблица 1)

В третьей главе описаны физико-математические модели и численное исследование тепломассообмена в исполнительном устройстве типа «криобассейн» в нерегулируемом режиме ОГКВ.

В разделе 3.1 дано описание: задачи численного моделирования тепломассообмена в ИУ, особенностей применения универсальных программных комплексов численного моделирования в задачах тепломассообмена, алгоритма проведения вычислительного эксперимента, особенностей поставленной задачи. Отмечено, что данных эксперимента (температура газа во время криовоздействия в точках, температура поверхности объекта охлаждения в отдельные моменты времени) недостаточно для создания технических средств, выполняющих требования к перспективным установкам ОГКВ. Предложен подход, включающий в себя одновременное получение данных как от натурального эксперимента, так и уточняющее, расширяющее его результаты численное исследование. Это связано с тем, что для решения задачи необходимо вместе использовать возможности как численного, и так и теплофизического эксперимента, а именно модель не может полностью описать биообъект, но сокращает время проведения исследования. Теплофизический эксперимент необходим для верификации модели и дополнения её результатов.

Раздел 3.2 содержит описание физико-математических моделей установки и объекта охлаждения. Разработанные модели направлены с одной стороны на решение задачи регулируемого обеспечения ОГКВ (этим они в первую очередь отличаются от аналогов), с другой стороны модели имеют компромисс между точностью результатов и временем вычислений. Задача состояла также в том, чтобы использовать современные подходы к расчету для адекватного прогнозирования результата ОГКВ. Результаты моделирования в данном случае направлены не только на расширение данных, полученных из эксперимента. В дальнейшем с помощью этих моделей возможно искать оптимальные варианты проведения криовоздействия. Это требует проведения серий расчетов.

Модель объекта охлаждения имеет следующие особенности. Геометрическая модель трехмерная антропометрическая из 11-ти элементов, параметрическая (на Рисунке 6 показано 3 варианта размеров, Таблица 2),

четырёхслойная. Физическая модель – с учетом экспериментально полученного источника теплоты кровотока от температуры поверхности и длительности криовоздействия (Таблица 3). В ней учтен радиационный теплообмен, теплофизические свойства зависят от температуры, граница окружающая среда-человек рассчитывается для каждой ячейки.

Таблица 2.

Взаимосвязь между габаритами волонтеров и моделями

ИМТ группа	ИМТ, кг/м ² ±0.3	Пол	Охлаждаемая поверхность тела, м ² ±0.1	Номер модели в расчетах	Высота, см±0,5
менее 20 кг/м ²	19.1	ж	0.87	2	150
20-25 кг/м ²	22.8	м	1.24	1	177
больше 25 кг/м ²	26.3	м	1.52	3	190

Модель оборудования детально соответствует условиям эксперимента. Текущая среда («газ» – воздух) имеет граничные условия «вход газа» (см. Рисунок б), «выход газа» (скорость газа 2,5 м/сек), сверху установлено граничное условие открытой в окружающую среду границы.

Благодаря этому модели учитывают взаимное влияние элементов конструкции и выявленные в эксперименте особенности охлаждения объектов ОГКВ. Это необходимо для решения задачи прогнозирования.

Тепловой поток в биоткани (уравнение теплопроводности с источником членом конвекции и перфузии крови) (1):

$$\rho_{\text{чел}} C_{p,\text{чел}} \frac{\partial T_{\text{чел}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{чел}} \frac{\partial T_{\text{чел}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{чел}} \frac{\partial T_{\text{чел}}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{чел}} \frac{\partial T_{\text{чел}}}{\partial z} \right) + q_{\text{чел}}, \quad (1)$$

$$\text{где } (T, \tau, x, y, z) = \sum q_{\text{чел}i} = \frac{Q_{\text{чел, часть тела}}^{\text{MAX}}}{V_{\text{чел, часть тела}}} * F(\tau) * F(T_i), \quad (2)$$

где T_i вычисляет решатель для каждого элемента сетки отдельно и $V_{\text{чел, часть тела}}$ для каждого компартмента (всего их 11).

Таблица 3.

Составляющие источников члена $q_{\text{чел}}$

$Q_{\text{чел, часть тела}}^{\text{MAX}}$, Вт	«Грудь»		«Живот»		«Рука»		«Нога»	
Модель 1	1100		580		350		800	
Модель 2	960		800		480		1600	
Модель 3	1270		1050		630		1600	
$F(\tau)$	0	0.05	0.1	0.25	0.5	0.85	0.95	1
τ, s	0	25	40	55	65	70	75	80
$F(T_i)$	0		1		0,7		0	
$T_i, ^\circ\text{C}$	32		20		7		0	

Радиационный тепловой поток (от поверхности человека) (3):

$$q_{\text{чел}}^{\text{Rad}} = \varepsilon_{\text{чел}} * \sigma * \left(\bar{T}_{\text{чел}}^4 - \bar{T}_{\text{стенка}}^4 \right), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{чел}} = 0.98$ и $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$ Вт м⁻² К⁻⁴.

Радиационный тепловой поток (к поверхности человека, индекс «с» – «стенка»):

$$q_C^{Rad} = -\varepsilon_C * q_{чел}^{Rad} * \left(\frac{S_{чел}}{S_{стенка}/6} \right) * h_{C,чел}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_C=0.93$. Коэффициент $h_{C,чел}$ учитывает относительное положение человека и стенок (всего 6 стенок).

Теплообмен в ИУ описывается уравнением (индекс «с» – «стенка»):

$$\rho_C C_{p,C} \frac{\partial T_C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_C \frac{\partial T_C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_C \frac{\partial T_C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_C \frac{\partial T_C}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Теплоперенос и конвективный массоперенос в области газа описан следующими уравнениями.

$$\text{Уравнение неразрывности: } \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + g_y, \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение энергии для текучей среды (индекс «f» – «текущая среда») (8):

$$\rho_f C_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_x \frac{\partial T_f}{\partial x} + u_y \frac{\partial T_f}{\partial y} + u_z \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right). \quad (8)$$

«Средняя» (№1): «Малая» (№2): «Большая» (№3):

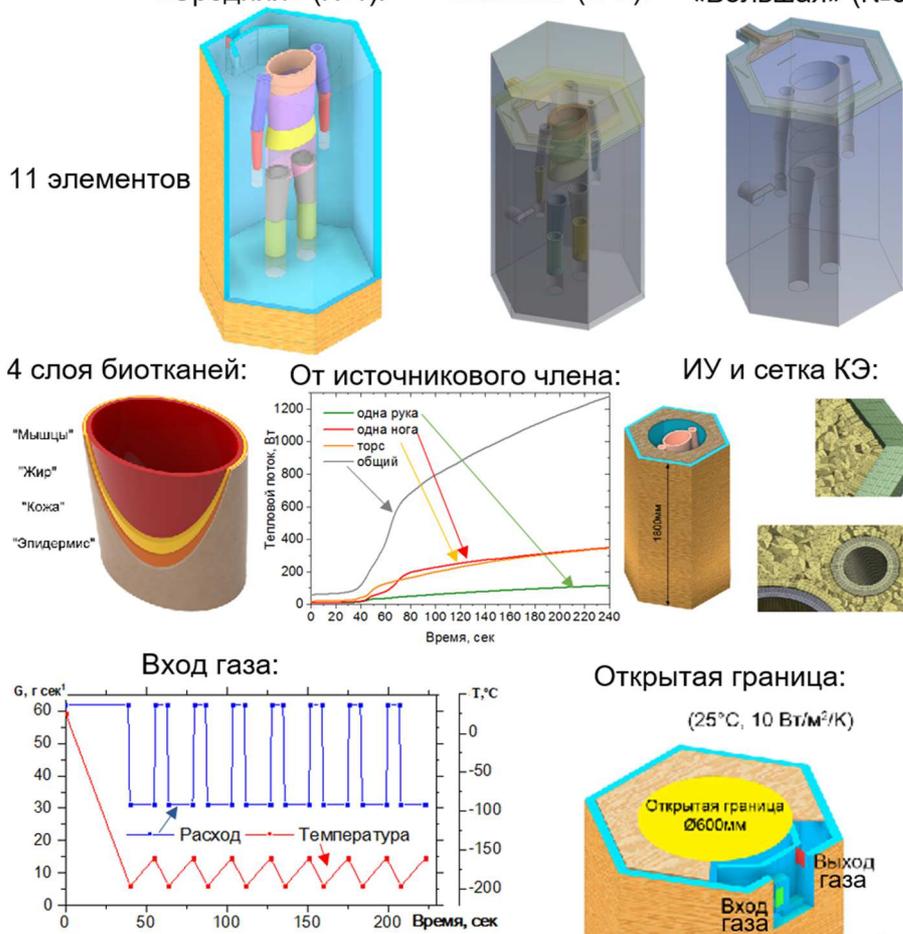


Рисунок 6. Особенности физико-математических моделей (цветные изображения предоставлены в электронной версии)

На контактных поверхностях использованы «теплообменные поверхности жидкость-твердое тело», в которых сетка по обе стороны от двух соединяемых поверхностей не совпадала. Со стороны воздушной области интерфейсы имеют условие прилипания:

$$u_{\text{на границе}}(x, y, z, t) = 0. \quad (9)$$

Чтобы учесть градиенты зависимых переменных и влияние вязкости газа на транспортные процессы использована модель турбулентности SST (перенос напряжения сдвига, Shear Stress Transport turbulence), являющаяся комбинацией моделей k-ε (для зон, удаленных от твердых поверхностей) и k-w (для зон, близких к твердым поверхностям). Турбулентное число Прандтля изменено со стандартных 0,9 на 0,7, что больше подходит для воздуха.

Таблица 4.

Граничные условия для модели (изображена на Рисунке 6)

	Стенка	Детали граничного условия
“Текучая среда“	Вход газа в ИУ	2 рода – массовый расход и температура газа от времени (полученные в эксперименте)
	Выход газа из ИУ	2 рода – скорость газа (2,5 м/сек, получено в эксперименте)
	Открытая граница (в окружающую среду)	Для упрощения модели применено специальное граничное условие (Ansys CFX), имитирующее пересечение жидкостью граничной поверхности в любом направлении. Температура окружающей среды 25 °С.
“Стенка“ (ИУ)	Верх (газ)	3 рода – температура 25°С и коэффициент теплоотдачи 10 Вт/м ² /К
	Верх (стенка)	2 рода – адиабата
	Боковые стенки	3 рода – температура 25 °С и коэффициент теплоотдачи 8 Вт/м ² /К
	Низ (изоляция)	1 рода – температура 25 °С (получена в эксперименте)
	Газ-стенка	4 рода – равенство температур поверхности тела и обтекающего его слоя жидкости, условие "прилипания" потока
“Человек“	Внутренняя поверхность	2 рода – адиабата
	Одежда	2 рода – адиабата
	Газ-человек	4 рода – равенство температур поверхности тела и обтекающего его слоя жидкости и условие "прилипания" потока

Раздел 3.3 содержит описание результатов разработки и верификации компьютерной программы расчета. Использован ANSYS CFX 2020R1. Данный программный комплекс способен рассчитывать теплообмен с граничными и начальными условиями разработанных физических моделей, задавать теплофизические свойства необходимыми выражениями (уравнениями и точками). Модуль CFX относится к решению задач вычислительной гидродинамики – подраздела механики сплошных сред, включающего совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. Математический аппарат универсальной программной системы конечно-элементного анализа включает в себя предложенную математическую модель в качестве частного случая в полном объеме. А именно, он включает в себя дифференциальные уравнения конвективного теплообмена в газе, уравнения кондуктивного теплообмена в объекте охлаждения и ИУ, а также радиационного теплообмена между стенками объекта охлаждения и ИУ. Использовался метод конечных объемов, так как для дискретизации уравнений Навье-Стокса этот метод удовлетворяет требованиям закона сохранения, обеспечивая локальное хранение контрольных объемов, построенных вокруг каждой вершины или узла сетки. Применялось адаптивное количество итераций на расчетный временной шаг (0,2 сек), что обеспечивало оптимизацию машинного времени. Все расчеты проводились до тех пор, пока среднеквадратичное значение остаточных значений для всех значений не стало ниже 10^{-5} . В настройках решателя была установлена двойная точность. Расчеты были распараллелены с использованием двух процессоров Intel Xeon Gold 6246 3,3 ГГц и 256 ГБ оперативной памяти.

В части верификации компьютерной программы проведены анализ качества по критериям сетки (размер элементов, шаг по времени и др., в расчетах использовано от 19 до 26 млн. элементов), анализ чувствительности к изменению параметров (граничные условия, ТФС), а также расчеты без и с объектом охлаждения. Сделаны следующие выводы. Модель оборудования с достаточной точностью повторяет эксперимент без человека. Модель человека достаточно точно согласуется с экспериментом и пригодна для анализа средних значений температуры поверхности объекта и потока теплоты при криовоздействии.

В разделе 3.4 описаны результаты численного исследования тепломассобмена в ИУ типа «криобассейн» в типовом режиме ОГКВ. Впервые получены:

1) Распределения теплового потока в диапазоне объектов (от женщины, 150 см, ИМТ 19,1 кг/м² (модель 2) до мужчины, 190 см, ИМТ 26,3 кг/м² (модель 3), Рисунок 7).

2) Распределения скорости и температуры газа в нерегулируемом режиме в зависимости от времени (Рисунок 8).

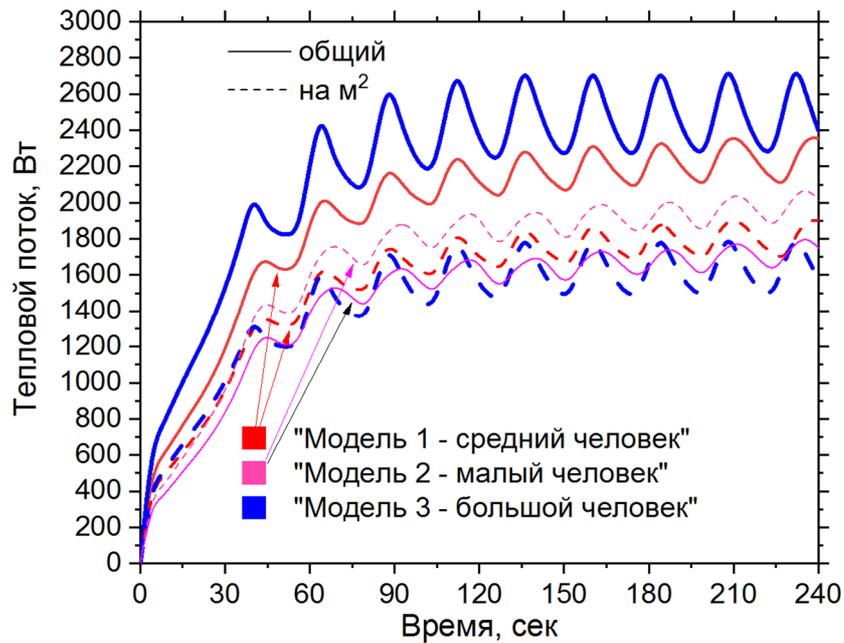


Рисунок 7. Тепловой поток от объектов охлаждения

В результате расчета экспериментально полученные данные дополнены полями температур, скоростей газа, данными о тепловых потоках, расходах газа, в том числе данными о средних значениях изменения массы газа в ИУ в динамике криовоздействия. В результате чего получена подробная картина тепломассобмена в современных установках ОГКВ. На основе нее возможно исследовать, прогнозировать варианты регулируемого криовоздействия.

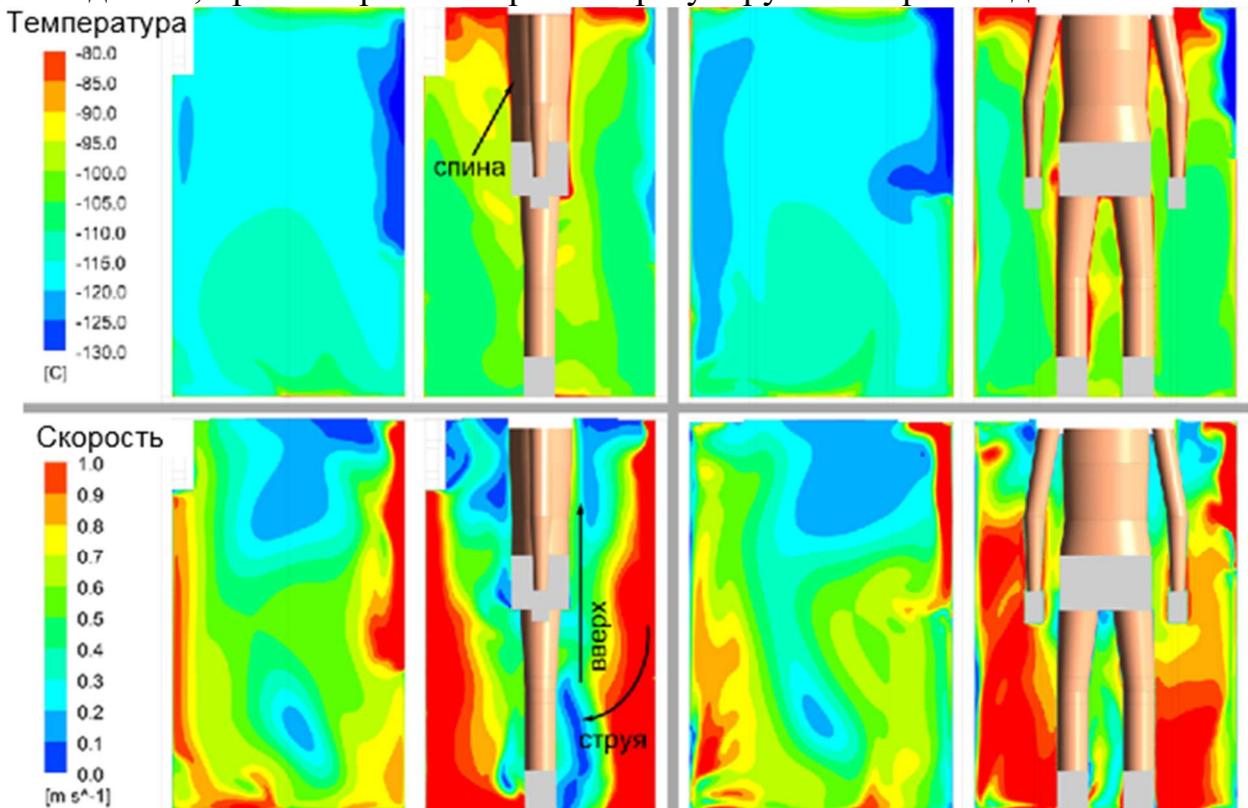


Рисунок 8. Пример распределений скорости и температуры газа в нерегулируемом режиме криовоздействия в зависимости от времени без и с объектом (цветные изображения предоставлены в электронной версии)

В четвертой главе описаны экспериментально-теоретические основы разработки установки ОГКВ регулируемого типа. В разделе 4.1 предложена концепция регулируемого выполнения ОГКВ (Рисунок 9). Она содержит способы регулирования степеней свободы режимов (температура и расход газа во времени) и этапы обеспечения точности кривоздействия (Этап 1 – прогноз, Этап 2 – выполнение под контролем, Этап 3 – анализ). Среди степеней свободы с точки зрения объекта (в общем случае), которые возможно использовать для индивидуализации ОГКВ (для коррекции теплового потока): (1) температура газа от времени (на контакте с объектом охлаждения); (2) скорость газа от времени (на контакте с объектом охлаждения). Скорость может быть номинальной или сниженной. Изменение скорости и температуры составляет алгоритм подачи (частный случай которого – общее время непрерывного постоянного кривоздействия). Среди степеней свободы с точки зрения оборудования, которые подходят для регулирования процесса ОГКВ: (1) температура газа от времени (в контрольной точке); (2) расход газа на входе в ИУ, (3) направление приточной струи, (4) длительность.

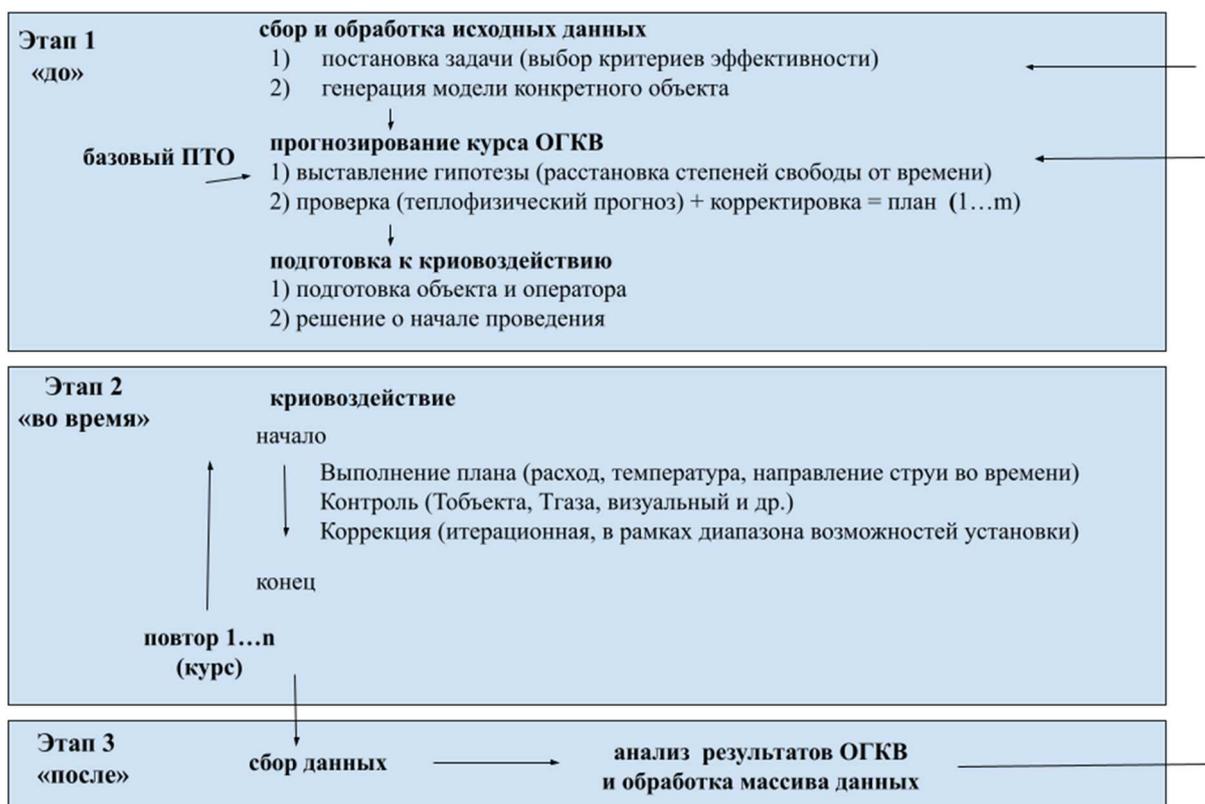


Рисунок 9. Схема концепции выполнения регулируемого ОГКВ

Раздел 4.2 содержит описание схем перспективных ИУ регулируемого типа. Они включают в себя: (1) объект охлаждения (один из всего возможного их количества); (2) конструкцию аппарата, а именно часть контура циркуляции охлаждающего газа со стенками, ограничивающими его (3) средства контроля его температуры. Контур циркуляции охлаждающего газа включает в себя вентилятор, теплообменный аппарат, канал подачи газа, распределительное устройство, приточную струю и пространство газа со стенками ИУ.

Раздел 4.3 содержит результаты экспериментального исследования подачи приточной струи к объекту охлаждения (Рисунок 10). Описаны экспериментальный стенд, распределение скоростей приточной струи, влияние скорости приточной струи на динамику охлаждения объекта, влияние положения вентилятора на динамику охлаждения объекта, анализ способов регулирования скорости охлаждения объекта.

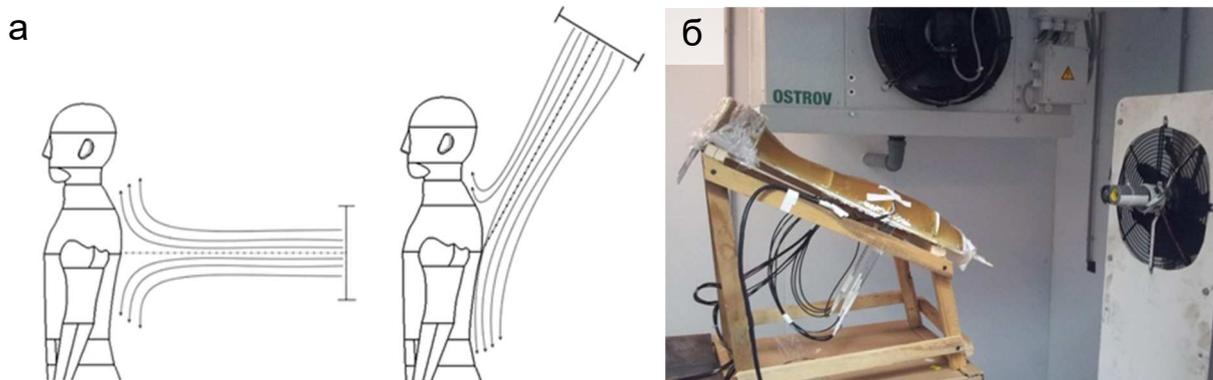


Рисунок 10. Экспериментальное исследование: а) направление вариантов обдува при изменении расположения вентилятора; б) фото эксперимента

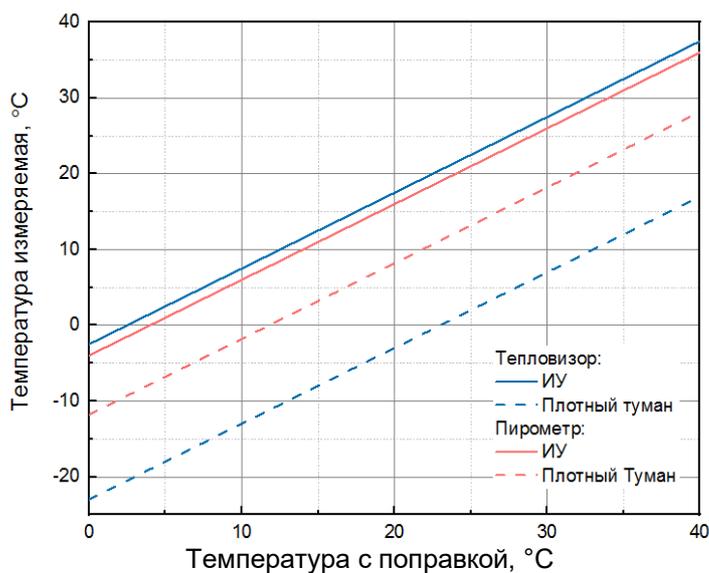


Рисунок 11. Коррекция показаний пирометра и тепловизора

Пятая глава содержит результаты разработки и исследований установки ОГКВ регулируемого типа. В разделе 5.1 описаны результаты расчета диапазона рациональных режимов подачи охлаждающего газа (Таблица 4, Рисунок 12). Используются следующие возможности программы расчета: прогнозирование произвольного воздействия (тепловой поток, температура поверхности, скорость и температура газа), проектирование оборудования с использованием принципа цифрового двойника. Используются следующие критерии выбора режима: повышение однородности конечной температуры компартментов, снижение потребления жидкого азота. Общий поток теплоты от человека к газу не является критерием выбора режима. Получен диапазон режимов для различных объектов. Разница

В разделе 4.4 описан способ бесконтактного контроля температуры поверхности объекта охлаждения в ледяном тумане (Рисунок 11). Проанализированы влияние охлаждения прибора на результат измерений, влияние ледяного тумана на результат измерения во время ОГКВ, позиционирование пятна измерения пирометра на поверхности объекта ОГКВ. Дана поправка к показаниям пирометра и тепловизора в условиях ледяного тумана.

температуры компартиментов составила от 4 до 10 °С. Расчетное потребление жидкого азота в установившемся режиме от 8 до 14 г/сек (до 16 минут работы от одного сосуда Дьюара объемом 25 л). Даны рекомендации по режимам подачи охлаждающего газа.

Таблица 5.

Диапазон рекомендуемых режимов подачи газа (отмечен «+»)

Температура газа на входе в ИУ, °С	Расход на входе в ИУ, г/сек \ расход на рециркуляцию, г/сек						
	40\20	50\30	55\35	60\40	65\55	80\60	90\70
-180							
-160	+	+	+	+	+		
-140							
-120							

Расчетом показана возможность снижения потребления жидкого азота до 30 %. Также дан пример выполнения Этапа 1 концепции (прогноз с использованием принципа цифрового двойника установки, получены результаты предварительных расчетов).

Следовательно, на основе разработанных моделей было подготовлено средство прогнозирования криовоздействия.

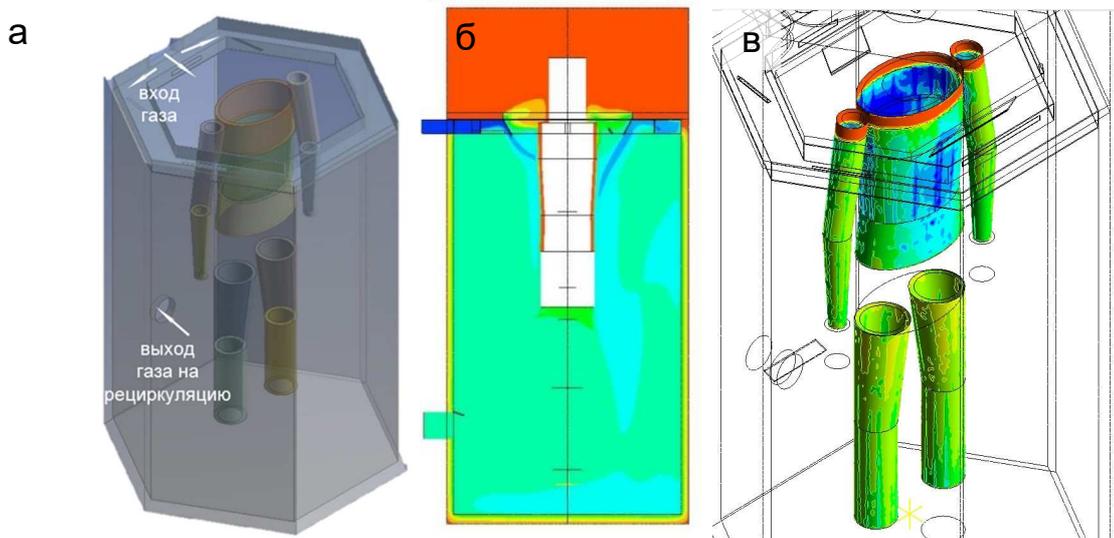


Рисунок 12. Изображения элементов программы прогнозирования: а) геометрическая модель, б) распределение температур газа, в) распределение температур поверхности объекта (цветные изображения предоставлены в электронной версии)

В разделе 5.2 описаны результаты разработки установки для выполнения регулируемого ОГКВ. Были выдвинуты следующие технические требования:

1. Расчетная длительность охлаждения (подача газа) до 7 минут.
2. За первые 30 секунд температура газа на входе в ИУ должна достигнуть значений не выше минус 60 °С.
3. Далее температура газа на входе в ИУ должна иметь возможность поддерживаться до минус 180 °С. Система регулирования должна иметь

возможность менять температуру подаваемого газа в зависимости от текущих требований алгоритма. В том числе иметь регулирование частоты вращения вентилятора и средства направленной подачи газа.

4. Для обеспечения поддержания необходимого количества охлаждающего газа и выполнения требований эргономики объем внутреннего пространства ИУ должен быть не менее 1 м^3 .

5. Расход жидкого азота при проведении воздействия не должен превышать 2,2 литров в минуту.

6. Установка должна иметь средства контроля температуры поверхности объекта охлаждения.

В итоге работ была изготовлена установка (Рисунки 13, 14) и успешно проведены ее испытания (Рисунок 15).

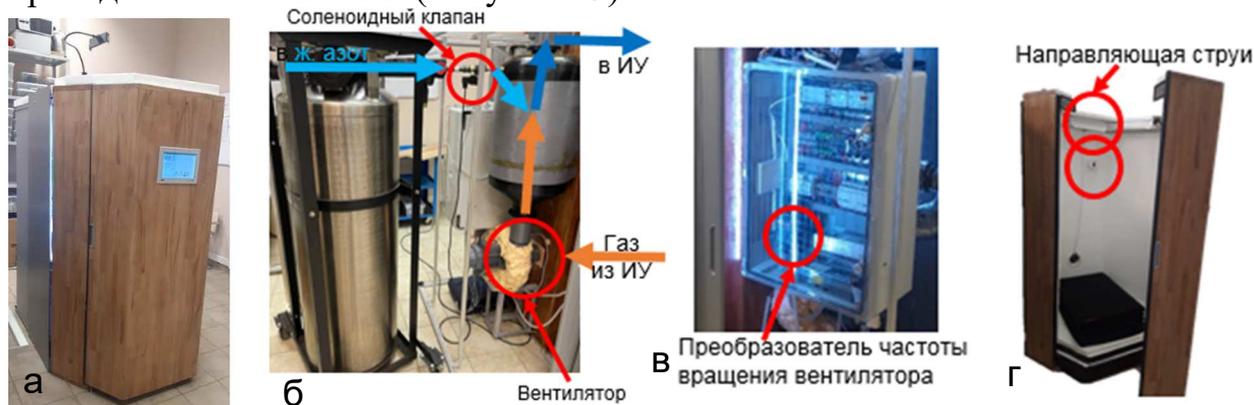


Рисунок 13. Разработанная установка: а) общий вид; б) блок охлаждения (корпус не показан); в) блок управления; г) ИУ, выделены направляющая струи и блок контроля температуры объекта (цветные изображения предоставлены в электронной версии)

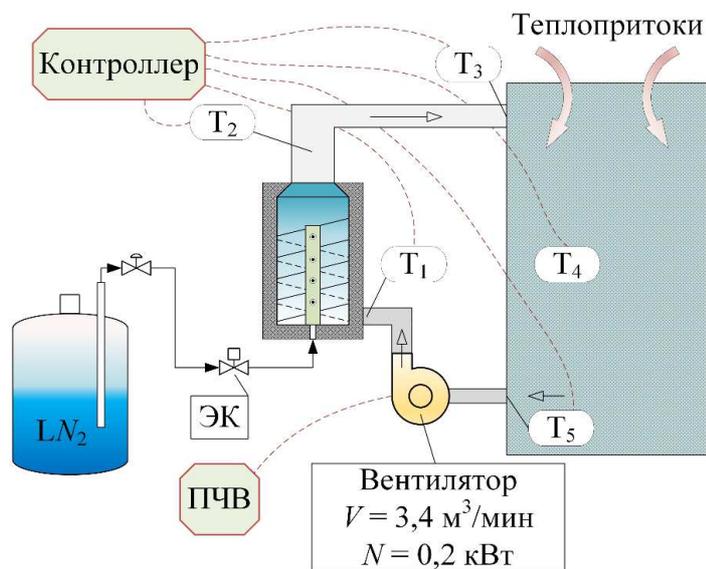


Рисунок 14. Схема блока охлаждения. LN_2 – жидкий азот; $T_1 \dots T_5$ – датчики температуры; ЭК – электронный криогенный клапан; ПЧВ – преобразователь частоты векторный

В разделе 5.3 описаны результаты проведенного в лаборатории кафедры Э4 МГТУ им. Н.Э. Баумана экспериментального исследования регулируемого ОГКВ. Оно имело следующие задачи:

- 1) испытания разработанной установки с человеком;
- 2) проверка гипотезы повышения однородности охлаждения (снижение разницы температур компартмента и между компартментами для группы волонтеров);

3) проведение Этапа 2 предложенной в Главе 4 концепции (выполнение криовоздействия под контролем) и апробация средств контроля температуры;

- 4) сравнение с результатами расчета.

Выводы:

- 1) Апробирован диапазон регулируемых режимов подачи газа.
- 2) Достигнуто повышение однородности охлаждения (признаки – в среднем минимальная температура выше до 5 К, диапазон значений температуры поверхности уменьшен до 25%, выражен характерный пик, Рисунок 17).

3) Дан пример выполнения Этапа №2 концепции (контроль, Рисунок 18).

- 4) Расхождение между расчетом и экспериментом по средней температуре поверхности не более 1,2 К.

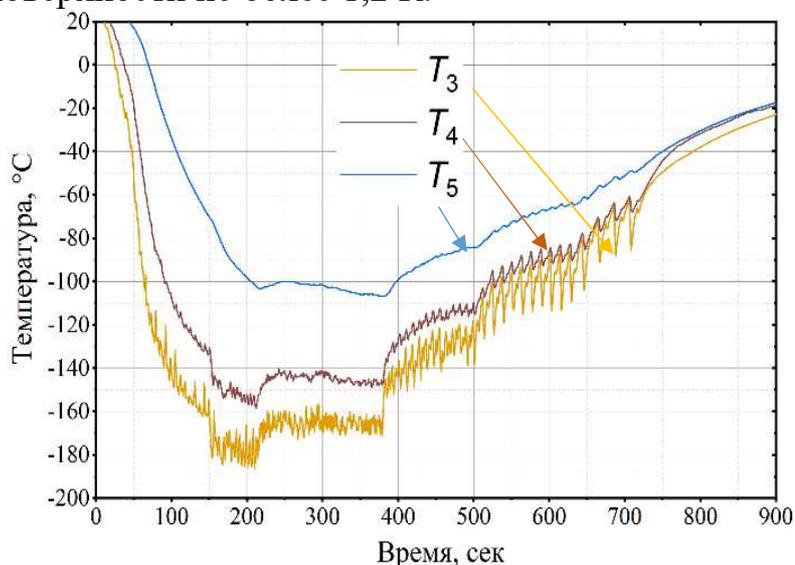


Рисунок 15. Результаты испытаний (T₁, T₂, T₃ см. Рисунок 14). Показаны возможности регулирования температуры газа во время воздействия



Рисунок 16. Экспериментальное исследование: а) фото эксперимента, б) примеры ИК-снимков после криовоздействия (цветные изображения предоставлены в электронной версии). Показаны возможности повышения

однородности охлаждения объекта

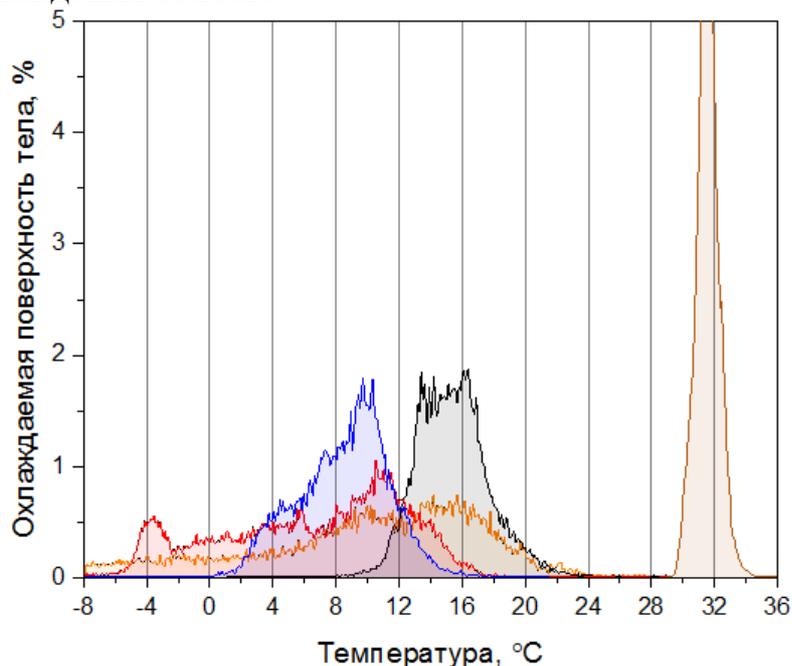


Рисунок 17. Распределения температуры поверхности объекта: начальное (справа), два варианта более однородного (выраженные пики в центре), два варианта со слабой однородностью (нерегулируемое ОГКВ, кривые с пиками менее 1%).

В разделе 5.4 предложены алгоритмы выполнения регулируемых режимов ОГКВ (Рисунок 19). Алгоритм выполнения режимов ОГКВ – последовательность изменения степеней свободы при одновременно конвективном и радиационном охлаждении объекта, которая характеризуется упрощенно режимом подачи газа в ИУ.

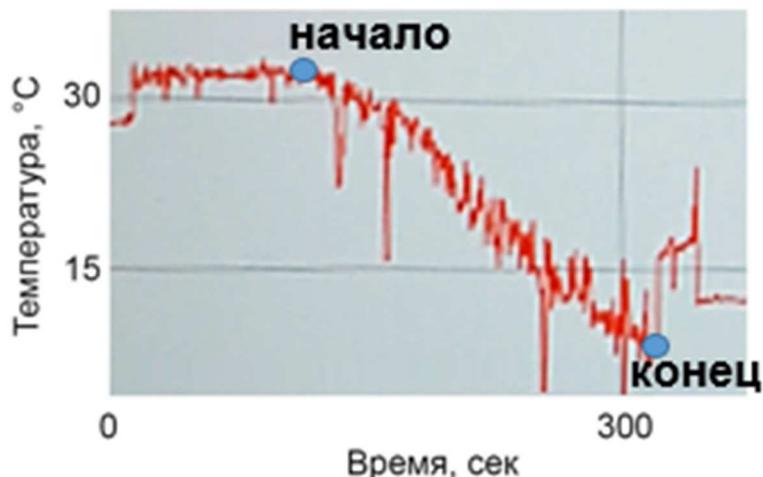


Рисунок 18. Пример результатов контроля температуры поверхности
Разработанная конструкция позволяет конфигурировать режим подачи газа согласно цели произвольного криовоздействия, изменяя:

- 1) частоту вращения вентилятора от 10 до 50 Гц (расход газа);
- 2) расход жидкого азота от 10 до 20 гр./сек (расход и температура газа);
- 3) направление потока приточной струи;
- 4) длительность криовоздействия.

Возможно как повышать однородность охлаждения, так и регулировать криовоздействие локально. Подбор конкретных значений параметров режима охлаждения необходимо проводить в рамках медико-биологических исследований, для которых подготовлена технологическая основа.

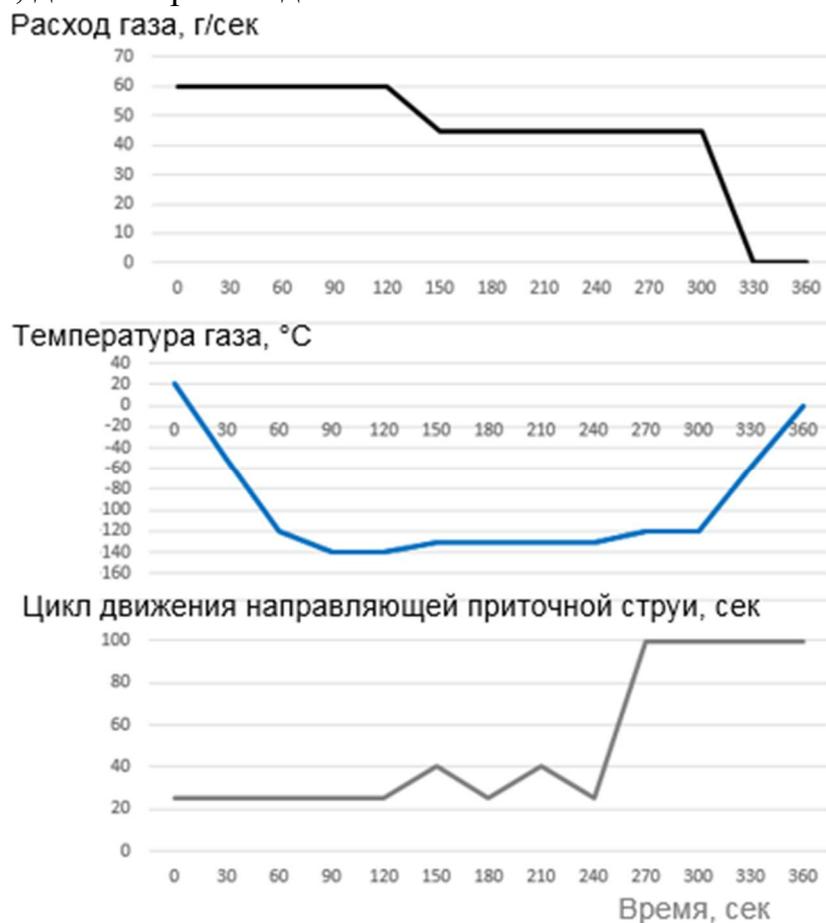


Рисунок 19. Пример алгоритма регулируемого ОГКВ

В итоге проведённых исследований и разработок подготовлен комплекс оборудования по исследованию и выполнению регулируемого криовоздействия, в составе которого:

1) Компьютерная программа прогнозирования результата ОГКВ. Она является цифровым двойником исполнительного устройства установки. Возможен расчет для произвольного человека, произвольного алгоритма подачи газа. Программа предоставляет данные по температуре и тепловому потоку для проверки выполнения задачи криовоздействия. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по средней температуре поверхности не более $\pm 1,2$ К.

2) Установка (ИУ тип 2 «Криобассейн», Таблица 6).

Шестая глава содержит анализ результатов проведенных исследований, а также практические рекомендации. А именно, в разделе 6.1 описаны результаты анализа проведенных исследований, основные выводы:

1) Предложен, исследован, реализован и внедрен новый подход к выполнению процесса (регулируемое выполнение) и к анализу результатов ОГКВ (по изменению температуры поверхности).

Таблица 6.

Сравнение разработанной установки с типовым образцом

Параметр	Было:	Стало:
Степени свободы регулирования	1 (длительность)	4 (температура, расход, направляющие струи газа, длительность)
1. Температура газа (в ИУ)	до -130 °С, без регулирования	до -150 °С, точность регулирования $\pm 2,5$ К
2. Расход газа (вход в ИУ)	без регулирования (2 уровня)	от 30 до 70 г/сек, точность регулирования ± 4 г/сек
3. Положение направляющих струи	-	регулируется в диапазоне углов до 110 °
4. Длительность	до 7 минут	возможно более 7 минут
Контроль температуры объекта	-	с точностью до ± 1 К
Среднее потребление ж. азота	до 37 гр./сек	25 гр./сек (ниже аналогов до 30%)

2) Разработано оборудование. Проведенные изменения обеспечили улучшение конструкции и качества выполнения ОГКВ (повышена точность выполнения ОГКВ и снижено энергопотребление).

3) Результаты работы позволяют ввести в современную практику более экономичное, управляемое выполнение ОГКВ. Далее необходимы медико-биологические исследования. Они определяют область применения метода для удовлетворения потребностей медицины будущего (например, в трендах предиктивной и персонализированной медицины).

В разделе 6.2 предложены рекомендации к будущим исследованиям. В том числе предложены рекомендации к проведению медико-биологических поисковых исследований по рационализации курса ОГКВ. В разделе 6.3 предложены рекомендации к выполнению криовоздействий. В разделе 6.4 предложены рекомендации по модернизации ранее разработанных конструкций. В том числе рекомендуется применение наиболее легких теплоизоляционных и конструкционных материалов (для снижения теплопритока). Отмечено, что метод ОГКВ еще не достиг насыщения в своем развитии. Чем более широко он будет применяться в дальнейшем, тем скорее будет возможно его оптимизировать. В таком случае рациональным является использование всех имеющихся альтернативных типов конструкций установок. Постепенно, в рамках рыночных отношений наибольшее применение найдет то оборудование, которое будет иметь большую удельную ценность для потребителя при минимизации издержек.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) На основе выполненного анализа технического уровня находящегося в эксплуатации оборудования, реализующего криовоздействие на организм человека, показано, что еще не решена проблема индивидуализации криовоздействия и соответственно равномерного охлаждения биообъекта, что требует проведения исследований вопросов регулируемого охлаждения биообъекта.

2) Получены данные о динамике охлаждения, распределении температур газа и поверхности биообъектов в нерегулируемом режиме ОГКВ (усредненно и с учетом наиболее охлаждаемых областей) в исполнительном устройстве типа «криобассейн» при длительности криовоздействия от 180 до 420 сек. Выявлено, что увеличение индекса массы тела на 10 кг/м^2 уменьшает снижение температуры на $0,7 \text{ К}$, термическое сопротивление поверхности обеспечивает отставание в охлаждении до $1,25 \text{ К/мин}$. Наличие биообъекта повышает температуру газа до 30 К , стабилизация температуры газа происходит после 4-й минуты.

3) Разработаны трехмерные физико-математические модели и компьютерная программа моделирования процессов тепломассообмена в установке, позволяющие прогнозировать результат криовоздействия. Они основаны на результатах проведенного эксперимента, учитывают взаимное влияние элементов конструкции и неоднородность температуры и скорости газа. Модель оборудования содержит аппарат (исполнительное устройство) и газ, который в нем находится (воздух). Для учета неоднородности температур газа и поверхности биообъекта граница газ-биообъект рассчитывается в каждой ячейке. Модель биообъекта параметрическая, состоит из 11-ти пространственных элементов, четырехслойная, содержит экспериментально полученный источниковый член теплоты кровотока от температуры поверхности объекта и времени криовоздействия. При создании компьютерной программы использован ANSYS CFX 2020R1 (число элементов от 19 до 26 млн.). Модель верифицирована для анализа криовоздействий длительностью более 60 сек, расхождение средней температуры поверхности биообъекта в таком случае составило не более 1 К .

4) Определены основные параметры охлаждающего потока в нерегулируемом режиме выполнения ОГКВ. Показано, что распределение температур газа имеет локальные неоднородности с максимальной разницей температур до 55 К ; скорость газа по сечению не превышает $1,4 \text{ м/с}$; тепловой поток от биообъекта к аппарату находится в диапазоне от 1500 до 2000 Вт/м^2 .

5) Впервые разработаны концепция реализации процесса регулируемого по заданной величине температуры поверхности объекта ОГКВ и основы конструирования установок ОГКВ нового поколения, обеспечивающие регулирование плотности теплового потока, отводимого от биообъекта (схемы аппаратов, режимы подачи струи к объекту, методы контроля охлаждения). При этом максимальное расхождение средней температуры поверхности биообъекта не превышает $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ от заданного.

6) Разработано средство прогнозирования результата ОГКВ и впервые определен диапазон рациональных параметров подачи газа в исполнительное устройство установки при выполнении регулируемого ОГКВ (от 40 до 70 г/сек, от -140 до -160 °С).

7) Разработан и создан опытно-промышленный образец, который позволяет проводить криовоздействие с изменением основных параметров работы оборудования в широком диапазоне температуры потока охлаждающего газа от -50 до -160 °С, скорости набегающего потока от 0,1 до 2 м/с, времени криовоздействия до 420 сек. Вместе со средством прогнозирования он образует комплекс по исследованию и регулируемому выполнению ОГКВ в широком диапазоне рабочих параметров. Разработаны алгоритмы выполнения регулируемых режимов ОГКВ для различных биообъектов и различных целей воздействия и выработаны рекомендации, что позволяет осуществлять практическое применение предложенной концепции.

8) Впервые решена научная проблема создания техники для выполнения индивидуализированного ОГКВ. Разработаны научные основы совершенствования процессов и аппаратов установок ОГКВ. Результаты работы обеспечили повышение равномерности охлаждения (диапазон значений температуры поверхности уменьшен до 25%, пик распределения увеличен до 2-х раз), снижение энергопотребления до 30%. Инженеры получили научно-техническую основу для создания серийного оборудования, выполняющего регулируемое, индивидуализированное воздействие.

9) Медицинские работники получили инструмент для проведения исследований ОГКВ для решения медико-биологической научной проблемы повышения точности выполнения ОГКВ. Решение этой проблемы и последующее внедрение изложенных в данном исследовании технических решений сделает возможным импорт-независимое лечебное и профилактическое применение индивидуализированного закаливания организма, в первую очередь необходимое людям, работающим в опасных экстремальных условиях. Его эффект заключается в снижении рисков при воздействии опасных факторов профессиональной деятельности, в повышении качества жизни и в увеличении производительности труда, что вносит значительный вклад в развитие страны в социально-экономических условиях XXI века.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шакуров А.В., Жердев А.А. Индивидуальная криотерапевтическая кабина на базе парокомпрессионной холодильной машины // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 10. С. 37 (0,32п.л./0,20п.л.).

2. Шакуров А.В., Жердев А.А., Щелчков А.А. Способы реализации общей криотерапевтической процедуры // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5 (5). С. 14 (0,9п.л./0,3п.л.).

3. Математическая модель охлаждения наддувом газа / А.В. Шакуров

[и др.]. Химическое и нефтегазовое машиностроение. № 11, 2015, С. 30-33 (0,25 п.л./0,15 п.л.).

4. Experimental and computational study of the vertical axis temperature gradient of the liquid nitrogen individual cryo-cabin / A.V. Shakurov [et al.]. Refrigeration Science and Technology, 2018-Sept. P. 91-96 (0,40 п.л./0,15 п.л.).

5. Target region temperature history approach for increasing accuracy of cryoexposure dose providing // A.V. Shakurov [et al.]. Refrigeration Science and Technology. 2018-Sept, P. 3-7 (0,30 п.л./0,20 п.л.).

6. Шакуров А.В., Колышкин Л.М., Андреев Н.А. Состояние и перспективы развития технического обеспечения криотерапевтического воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020. Т. 47, №3. С. 26-38 (0,81 п.л./0,40 п.л.).

7. Numerical thermal simulation of cryoexposure using Ansys / A.V. Shakurov [et al.]. MATEC Web of Conferences 324, 01002. 2020 (0,5 п.л./0,1 п.л.).

8. Shakurov, A.V., Kolishkin, L.M. Heat transfer between human and fluid under extreme conditions of partial body cryotherapy // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1683 (2), № 022021 (0,44 п.л./0,22 п.л.).

9. Thermal Properties of Human Soft Tissue and Its Equivalents in a Wide Low-Temperature Range / A.V. Shakurov [et al.]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021, 94 (1), P. 233-246 (0,82 п.л./0,22 п.л.).

10. Experimental and computational thermal analysis of partial-body cryotherapy / A.V. Shakurov [et al.]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. 183, № 122194. (1,06 п.л./0,50 п.л.).

11. Experimental Study of Prolonged Partial Body Cryotherapy / A.V. Shakurov [et al.]. Refrigeration Science and Technology. 2021-October, P. 189-194 (0,40 п.л./0,20 п.л.).

12. Шакуров А.В., Колышкин Л.М. Исследование режимов работы криогенного распылительного смесительного газификатора с регулируемой производительностью // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №2, 2023. С.19-23 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

13. Experimental evaluation of partial body cryotherapy unit with gas supply regulation / A.V. Shakurov [et al.]. International Journal of Refrigeration, 2023, 155, P. 105–113 (0,6 п.л./0,3 п.л.).

14. Шакуров А.В. Регулируемое общее газовое криовоздействие на человека // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 1. С. 49-52 (0,25 п.л./0,25 п.л.).

15. Установка для криотерапии. Патент РФ на полезную модель № RU 131612 U1 / Шакуров А.В., Жердев А.А.; заявл.15.05.2013; опубл.27.08.2013. Бюлл. №5.

16. Устройство для испарительного охлаждения газа. Патент РФ на полезную модель № 202257 U1/ Шакуров А.В., Колышкин Л.М., Андреев Н.А., Воронов В.А.; заявл. 18.11.2020 № 2020137840; опубл. 09.02.2021.

17. Криотерапевтическая установка. Патент РФ на изобретение № 2804575/ Шакуров А.В., Колышкин Л.М., Жидков Д.А., Воронов В.А.; заявл. 18.04.2023 № 2023109803; опубл. 02.10.2023.