

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

5023

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 37

ПОДАШЕНО

КУЛАКОВ Игорь Владимирович

УДК 687.15+613.48 :62-533

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМ РЕЖИМОМ  
ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ОДЕЖДЕ С ЭЛЕКТРОБОГРЕВОМ

Специальность 05.13.07 "Автоматизация технологических  
процессов и производств легкой  
промышленности".

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 1990.



Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте легкой промышленности.

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор А.И.Жаворонков.

Научный консультант: кандидат технических наук,  
доцент В.В.Ефремов.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор А.С.Руженцев;  
кандидат медицинских наук  
М.И.Харченко.

Ведущее предприятие: Институт Медико-Биологических  
проблем МЗ СССР.

Защита диссертации состоится 3 июля 1990 г.  
в ..... часов на заседании специализированного Совета Д.053.32.02  
при Московском ордена Трудового Красного Знамени технологическом  
институте легкой промышленности.

Адрес: 113806, ГСП, Москва, М-35, ул.Осипенко, 33.

Ваши отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печатью,  
просим направлять в Ученый совет института.

Автореферат разослан 1 июля 1990 г.

Ученый секретарь  
специализированного Совета,  
кандидат технических наук,  
доцент





## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ Данная работа посвящена актуальной проблеме создания средств для безопасной работы человека в экстремальных условиях. В настоящее время требуется осуществить комплекс мер, направленных на создание благоприятных условий для высокоэффективного труда. Теплозащитная обогревательная одежда, другие средства индивидуальной защиты занимают важное место в числе мероприятий по обеспечению безопасности человека, работающего в средах с повышенной теплопроводностью и при воздействиях на него низких температур. Такая одежда позволяет снять существующие ограничения в создании одежды с высокими теплозащитными свойствами.

Постановлением СМ СССР и ЦК КПСС от 3 августа 1983 года определен ряд задач, требующих безотлагательного решения. Одной из проблем, определенных указанным постановлением, является создание специальной одежды для водолазов. Использование обогревательного костюма с активными элементами с системой подогрева газовой смеси позволяет в несколько раз повысить эффективность труда водолаза, снизить затраты на проведение спусков и обезопасить человека от переохлаждения.

Несмотря на существование разнообразной теплозащитной спецодежды с обогревом для водолазов, стоит задача создания подобной спецодежды для глубоководного погружения. При этом для защиты органов дыхания водолаза встает задача разработки эффективной системы нагрева газовой смеси, что в свою очередь требует разработки автоматической системы управления температурным режимом газовой смеси.

Большой вклад в решение проблемы создания системы нагрева газовой смеси и разработки методик ее проектирования внесли советские ученые: М.М. Майзель, А.И. Жаворонков, В.С. Кащеев, В.В. Буремов, А.В. Стерликов, А.Г. Шелудько, А.И. Шестаков, А.И. Пастухов и ряд других. Ими успешно решены задачи по проектированию и созданию нагревателей газовой смеси, по разработке систем стабилизации температуры, а также по прогнозированию эффективности работы системы нагрева газовой смеси.

Однако, на сегодняшний день нет оснований считать проблему создания систем нагрева газовой смеси полностью решенной. Разработка эффективной системы возможна на основании научного определения взаимосвязи респираторных теплотерь с теплотерями через кожу, проведенного с целью определения оптимальных температур газовой смеси. Кроме того, необходимо создание малогабаритного безопасного нагревателя газовой смеси и методик его проектирования и исследования, а также необходима разработка автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси, позволяющей компенсировать широкий спектр возмущающих воздействий и поддерживать температуру газовой смеси на необходимом уровне.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ Целью данной работы является разработка системы автоматического управления (САУ) тепловым режимом вдыхаемой газовой смеси в специальной одежде с электрообогревом.

Для достижения поставленной цели необходима разработка математической модели, описывающей тепловое состояние водолаза при погружении, создание экспериментальной установки, использование которой в совокупности с разработкой специальных методик, позволит исследовать разработанный нагреватель газовой смеси как элемент САУ, изучение возмущающих воздействий возникающих при



работе САУ и разработка на этой основе принципов построения инвариантной системы управления.

Проблема создания САУ определяет необходимость решения ряда взаимосвязанных задач. К ним относятся:

- проблема определения диапазона температур газовой смеси, поддержание которой позволяет создать рациональное взаимодействие обогревательной одежды и системы нагрева газовой смеси, при этом возможно достижение минимума затрачиваемой на обогрев мощности с условием поддержания комфортных условий работы водолаза,
- проработка вопросов проектирования и испытания эффективного, малогабаритного, безопасного нагревателя газовой смеси, создание методик по расчету геометрических и электрических параметров такого нагревателя, а также методики, позволяющей проводить исследование нагревателя без применения сложного и дорогого оборудования,
- определение принципов построения инвариантной системы автоматического управления, позволяющей компенсировать действие широкого спектра возмущений, возможных при работе системы нагрева газовой смеси, с целью повышения комфорта и безопасности условий труда водолаза,
- разработка алгоритмов, позволяющих определять для некоторых звеньев, таких как регуляторы этой системы, передаточные функции, удовлетворяющие выбранному критерию по оценке эффективности работы САУ.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Решение поставленных задач осуществлялось на основе методов имитационного моделирования, прикладной математики, математической физики. В работе использовались вариационные методы исчисления, теории случайных процессов, теории теплового моделирования, теории и методы построения оптимальных регуляторов. Ряд задач анализа и

синтеза систем управления, а также вопросы теплового моделирования обусловили применение средств вычислительной техники как основного инструмента для решения этих проблем.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА Впервые разработана и реализована двухузловая имитационная математическая модель, позволяющая с учетом терморегуляторных реакций организма прогнозировать параметры теплового состояния организма человека при глубоководном водолазном погружении.

Определен на основании математического моделирования диапазон температур газовой смеси, позволяющий поддерживать оптимальное тепловое состояние организма водолаза в процессе погружения, а также определен диапазон температур газовой смеси, позволяющей минимизировать мощность обогрева при сохранении комфортных условий труда.

Предложены универсальные методики по определению геометрических и электрических параметров нагревателя газовой смеси, дающие возможность расчета этих параметров в зависимости от технических требований, предъявляемых к нагревателю.

Разработана на основании теории теплового моделирования специальная методика, позволяющая определять температурные характеристики нагревателя в реальных условиях работы под повышенным давлением, по результатам исследований проведенных в лаборатории при нормальном давлении.

Введены критериальные зависимости для расчета коэффициента конвективной теплопередачи, которые применимы к нагревателям газовой смеси данной конструкции и справедливы в рабочем диапазоне расходов газовой смеси.

Разработаны принципы построения инвариантной САУ, основанные на методе динамической компенсации возмущений при условии использования нескольких параметров вектора состояния объекта.



Определены алгоритмы, основанные на использовании вариационных методов исчисления, дающие возможность построения передаточных функций регуляторов системы управления. Данные передаточные функции удовлетворяют выбранному критерию минимальности среднеквадратической ошибки системы управления при наличии ограничения на среднюю мощность управления и учитывают статистические характеристики возмущающего воздействия.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.

Использование результатов работы на стадии проектирования и разработки образцов глубоководного водолазного снаряжения значительно сократит время, снизит стоимость работ, повысит эффективность использования экспериментального оборудования. Кроме того, представленная в работе возможность проведения модельных исследований позволяет проводить исследования, не подвергая опасности здоровье человека.

Использование в водолазном снаряжении разработанной автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси позволит создать более комфортные и безопасные условия труда водолазов.

Разработанная в диссертации имитационная модель прогнозирования теплового состояния человека при водолазном погружении принята для использования в научно-исследовательских работах ИБФ МЗ СССР.

Внедрение результатов работы в опытно-конструкторские разработки заинтересованной организации, занимающейся созданием образцов водолазного снаряжения, дало экономический эффект в размере 47 тыс. руб.

Выполнение исследований по данной тематике проводилось в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 3 августа 1983 года.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ Материалы диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры АВТОМАТИКА МТИЛП. (1990 г.).

ПУБЛИКАЦИИ По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Работа изложена на 174 страницах, из которых 157 страниц машинописного текста, 33 рисунка, 16 таблиц. Библиография включает 87 наименований. Приложение представлено на 49 страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе приведен систематизированный обзор отечественных и зарубежных источников, отражающих круг вопросов, связанных с необходимостью использования различных видов специальной теплозащитной одежды с обогревом, ее конструктивных особенностей и применением методов имитационного моделирования в процессе ее проектирования.

Проведенный анализ литературы, связанной с созданием водолазного снаряжения показал, что разработка новой водолазной техники в основном направлена на снижение стоимости спусков и создание безопасного комфортного снаряжения для глубоководных погружений. При этом решаются следующие задачи:

- устранение потерь дорогостоящих газов, предназначенных для водолазов;
- создание высококачественных и надежных систем регенерации и регулирования состава газовой смеси;
- создание системы надежного энергоснабжения;



- создание системы четкой связи с водолазом,
- создание системы тепловой защиты от переохлаждения.

Наибольший интерес с точки зрения создания специальной одежды представляет система тепловой защиты водолаза. Она состоит из двух взаимодополняющих друг друга составляющих: теплозащитной обогревательной одежды и системы подогрева газовой дыхательной смеси, т. е. средств защиты кожных покровов человека и средств защиты органов дыхания человека от переохлаждения. Первая составляющая системы тепловой защиты достаточно хорошо изучена, и обогревательная одежда в том или ином виде широко используется при водолазных погружениях. Что касается второй составляющей, то она менее разработана и изучена, поэтому создание системы электрообогрева дыхательной газовой смеси является перспективным и необходимым направлением в разработке средств защиты водолазов от переохлаждения.

Было установлено, что необходимость подогрева подаваемой водолазу для дыхания газовой смеси при спусках на большие глубины считается доказанной, но, несмотря на имеющиеся данные о тепловых потерях человека через респираторный тракт в этих условиях пока нет обоснованных данных, позволяющих нормировать температуру вдыхаемой газовой смеси в зависимости от ее состава и глубины погружения. Решение этой задачи необходимо для создания эффективных средств защиты водолаза от переохлаждения.

В настоящее время получение большого количества данных о механизмах функционирования системы терморегуляции позволило создать математические модели, описывающие реакции организма человека в различных условиях среды.

Исследования проблемы моделирования показывают, что некоторые модели дают возможность весьма точно прогнозировать физические реакции организма в самых различных условиях. С их

помощью можно прогнозировать тепловое состояние водолаза при спусках на различные глубины в снаряжении с различными характеристиками. А также показать рациональное распределение между тепловыми потерями, связанными как с теплоотдачей конвекцией в окружающей среде, так и с респираторными тепловыми потерями, обусловленными нагревом дыхательной газовой смеси при сохранении теплового комфорта водолаза. Все это важно для конструкторов, разрабатывающих водолазное снаряжение, и, в частности, при создании автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси.

Анализ литературы, посвященный вопросу разработки нагревателей газовой смеси позволяет разделить существующие конструкции на нагреватели с использованием теплоносителей (в основном вода) и электрические нагреватели. В данной работе рассматривались проблемы проектирования и исследования электрических нагревателей.

При электрообогреве отпадает необходимость в теплоносителе и устройствах, обеспечивающих его циркуляцию. Подводимая электроэнергия превращается в тепло повсюду, где расположены нагреватели. Возможно также регулирование подводимого тепла за счет изменений величины питающего напряжения, что является предпосылкой к использованию регуляторов температуры газовой смеси. Однако, для электрических нагревателей остро стоит проблема электрозащиты человека.

Большая работа по разработке электрических нагревателей, а также АСР температуры газовой смеси проделана на кафедре автоматики МТИЛП.

Несмотря на имеющиеся недостатки системы электрообогрева, в связи с созданием в настоящее время новых теплопроводящих и электроизолирующих материалов получают все более широкое распространение. В связи с этим разработка относительно безопасного



компактного, эффективного электрического нагревателя газовой смеси является перспективной и необходимой.

Изучение условий труда водолаза выявило, что работа системы нагрева газовой смеси проходит при действии на нее широкого спектра возмущающих воздействий. Эти возмущения присутствуют на протяжении всего водолазного спуска, приводя в конечном итоге к скачкам температуры нагревателя газа и температуры вдыхаемой газовой смеси. Применять систему подогрева газовой дыхательной смеси без компенсации возмущения нельзя, так как колебания температуры нагревателя могут превысить допустимую величину. Кроме того, большие колебания температуры вызовут у водолаза болезненные ощущения и температурные травмы органов дыхания. Следовательно, необходимо разработать такую систему, в которой проводилась бы компенсация возмущения системой автоматического управления тепловым режимом газовой смеси.

Необходимо, чтобы такая система обеспечила в максимальной степени нейтрализацию внешнего воздействия. Это возможно при условии учета данной системой нескольких параметров газовой смеси, таких как: плотность, теплоемкость, расход, а также учета данных о температуре окружающей среды и температуре нагревателя. Кроме того, при различных условиях погружения температура газовой смеси должна быть различна. В общем виде возможно говорить о такой системе, как о составной части большой системы, обеспечивающей процесс подготовки, необходимой для дыхания водолаза газовой смеси.

Проведенные в диссертационной работе исследования позволяют утверждать, что разработка и применение средств защиты органов дыхания требует решения следующих вопросов:

- определение рационального взаимодействия системы подогрева газовой смеси и теплозащитной обогревательной одежды,
- разработка наиболее эффективной конструкции нагревателя газовой смеси,

- создание автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси, необходимой для повышения стабильности и надежности работы всей системы подогрева газовой смеси.

Вторая глава посвящена оптимизации работы электрообогревательной одежды на основе математического моделирования. Предложен математический подход, который состоит в использовании математической модели, описывающей теплообменные процессы в системе "человек-окружающая среда", для нахождения взаимодействия обогревательной одежды и системы нагрева газовой смеси и минимизации при этом мощности, необходимой для обогрева водолаза.

Было определено, что для решения этой проблемы более рационально использование упрощенной двухузловой математической модели "человек-окружающая среда", как более простой и вполне удовлетворяющей предъявляемым требованиям.

Физической основой такой модели является представление человека в виде двух, находящихся один внутри другого, цилиндров: тела и кожи (рис. 1). Модель включает комплекс зависимостей, описывающих функционирование системы терморегуляции организма. В результате решения уравнений системы терморегуляции определяются параметры регулирующих реакций организма. Данная модель позволяет имитировать регуляцию температуры тела методом итерационного исчисления. Применение этой модели возможно для задач, в которых не существенен местный перегрев или переохлаждение.

Однако, данная модель не учитывает ряд важных параметров окружающей среды, а также имеет упрощенное описание некоторых процессов теплообмена организма и соответственно требует доработки и изменения. Так изменения, в частности, коснулись:

- теплопотерь испарением,
- возможности использования активной обогревательной одежды,
- возможности использования подогрева газовой смеси,
- необходимости учета повышенной физической нагрузки на водолаза,



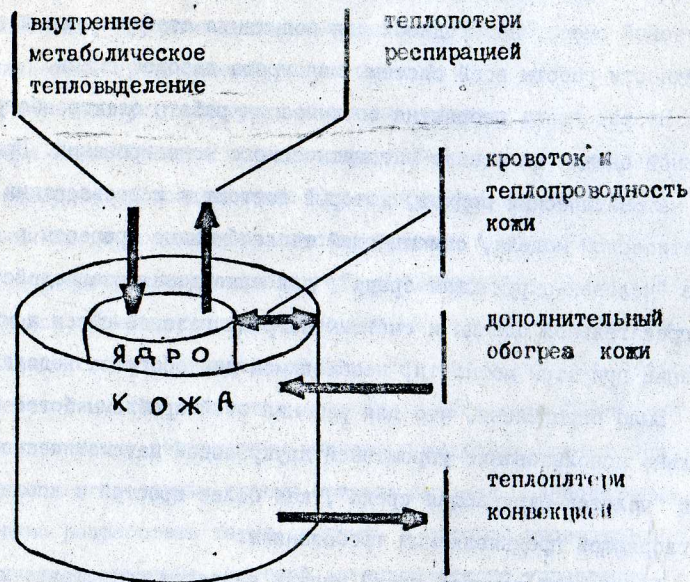


Рис. 1. Физическая основа математической модели.

- определения температуры выдыхаемой газовой смеси,
- расчета респираторных потерь.

Доработанная модель способна с достаточной точностью прогнозировать тепловое состояние человека при глубоководном водолазном погружении. Проверка адекватности проводилась путем сравнения параметров теплового состояния при погружении и при моделировании тех же условий. В результате установлено, что расхождение экспериментальных и расчетных данных для средневзвешенной температуры кожи не превышает 1,1 градуса, а для температуры тела - 0,6 градуса.

Используя доработанную модель, была составлена программа, которая по заданным условиям и начальным температурам газовой смеси и мощности, подводимой к обогревательной одежде, проводит расчет изменения теплосостояния человека во времени. Результатом

расчета является ряд точек, соответствующих определенным значениям температуры газовой смеси и мощности обогревательной одежды. По этим точкам можно очертить замкнутую область (рис. 2), при нахождении внутри которой значения температуры газовой смеси и мощности обогревательной одежды и при постоянных прочих условиях параметры теплового состояния человека (температура тела и средневзвешенная температура кожи) останутся в пределах границ, заданных их максимальными и минимальными величинами.

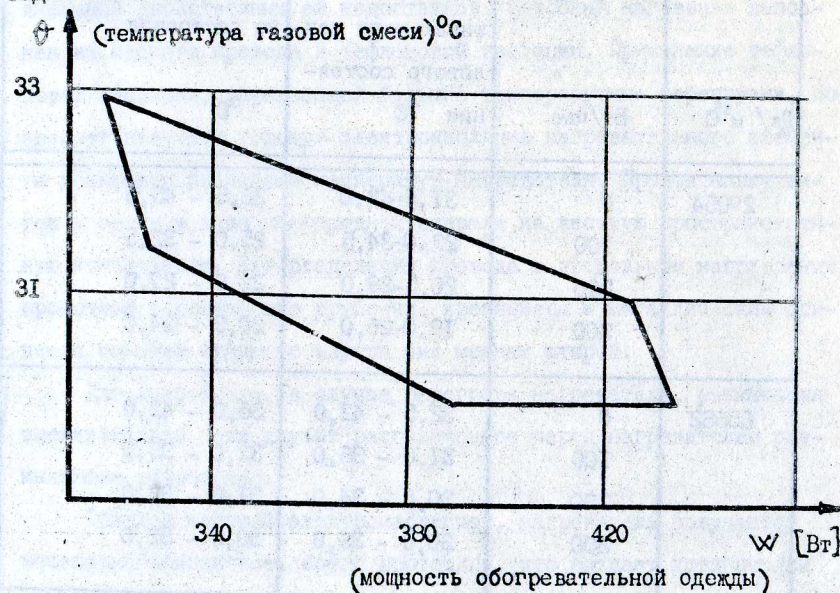


Рис. 2. Область оптимального теплового состояния водолаза при теплофизических параметрах газовой смеси 65682 Дж/м<sup>3</sup> и дополнительной метаболической теплопродукцией 100 Вт. Анализ полученных результатов моделирования позволил минимизировать общую мощность обогрева водолаза. Результатом исследований, проведенных в этой главе, явилась таблица, в которой связаны теплофизические параметры газовой смеси, необходимой для поддержания комфортного (оптимального) теплового состояния орга-



низма и диапазон оптимальной для минимизации мощности обогрева температуры при поддержании комфортного теплового состояния.

параметры газовой смеси	дополнительная метаболическая теплопродукция	общий диапазон температур газовой смеси для поддержания оптимального теплового состояния °С	диапазон оптимальных температур газовой смеси для поддержания оптимального теплового состояния °С
Дт/ м³С	Вт/час	°С	°С
27054	0	31,0-43,0	26,5 - 45,5
	100	22,0-34,5	25,0 - 32,5
	200	20,5-29,0	22,0 - 27,0
	300	19,0-26,0	20,5 - 24,0
65682	0	32,5 - 42,0	36,0 - 42,0
	100	31,0 - 36,0	32,0 - 35,5
	200	30,5 - 34,0	31,0 - 33,0
	300	30,0 - 33,0	30,0 - 32,0

В третьей главе изложены вопросы, связанные с определением эффективной конструкции нагревателя, разработкой методик расчета его геометрических параметров, электрических параметров, а также методик исследования нагревателя.

В качестве прототипа был использован разработанный на кафедре автоматики МИИЛ металлический спиральный нагреватель. Испытания показали хорошую работоспособность данного нагревателя при различных условиях водолазного погружения.

Однако, данный нагреватель имеет один существенный недостаток - это отсутствие электроизоляции поверхности теплообмена, что повышает вероятность поражения водолаза электрическим током.

Разработанные в последнее время и находящие все большее применение синтетические материалы, в частности тефлоновые электроизоляторы проводников, позволили создать нагревательный элемент, вбирающий в себя все преимущества выше описанной конструкции, и лишенный свойственных ей недостатков. Подобный нагреватель выполнен из медного провода в тефлоновой изоляции. Применение тефлоновой изоляции, переносящей большие температурные перегрузки, позволяет получить хорошую электроизоляцию нагревательного элемента в широком диапазоне температур нагревателя. Провод навит виток к витку в виде многорядной спирали на жесткую пространственную конструкцию. Для разделения провода в продольном направлении проложены керамические трубочки, крепящиеся к металлическим спицам с помощью продетых внутри них медных штырей.

Для аварийного, в случае перегрева нагревателя, размыкания электрической цепи служит расположенное перед нагревателем размыкающее устройство.

Обладая хорошей электроизоляцией, нагреватель получается несколько компактнее своего прототипа, что создает предпосылки установки данного нагревателя в непосредственной близости от клапанной коробки респираторного устройства.

Разработанные методики с использованием выведенных в работе формул позволяют быстро проводить расчет электрических и геометрических параметров нагревателя, таких как: длина и электрическое сопротивление провода, длина и диаметр нагревателя, площадь поперечного сечения каналов, поверхность теплоотдачи, эквивалентный диаметр.

Приведенные в главе теоретические выкладки показывают, что как элемент автоматической системы управления температурой газа



нагреватель может быть описан дифференциальным уравнением, соответствующим аperiodическому звену первого порядка, а процесс передачи тепла от нагревателю к газу уравнением пропорционального звена.

Точное значение гидравлических и теплообменных параметров работы нагревателя можно определить в процессе испытания нагревателя в натуральных условиях путем измерения их непосредственно на образце. Однако, такие испытания требуют больших затрат труда и средств, а зачастую и представляют опасность для человека. Более безопасным, простым и дешевым способом нахождения необходимых параметров является метод испытания реального нагревателя в условиях, моделирующих процессы гидравлического течения газа и теплообмена. Такие испытания можно проводить в нормальных условиях по специальным методикам, используя в качестве газа обычный воздух.

Рассмотрение гидродинамической картины работы нагревателя, а также процессов теплообмена позволило на основе теории теплового подобия разработать эффективную методику проведения испытания нагревателя в воздушной среде, при этом выведена формула, связывающая температуру поверхности нагревателя в реальных и экспериментальных условиях:

$$\theta_{н1} = \theta_{н2} \frac{K_a}{K_h} - \frac{K_a}{K_h} (\theta_{г(х)2} + K_{т2} X) + (\theta_{г(х)1} + K_{т1} X)$$

где:  $\theta_{н1}$  - температура нагревателя в реальных условиях,

$\theta_{н2}$  - температура нагревателя в условиях эксперимента,

$K_a$  - коэффициент пропорциональности между мощностью в реальных условиях и в эксперименте,

$K_h$  - коэффициент пропорциональности между коэффициентами конвективной теплопередачи в реальных и экспериментальных условиях,

$K_{т1}$  - коэффициент, определяемый как разность температур нагретого и холодного газа в реальных условиях,

$K_{т2}$  - коэффициент, определяемый как разность температур нагретого и холодного газа в экспериментальных условиях,

$\theta_{г(х)1}$  - температура холодного газа в реальных условиях,

$\theta_{г(х)2}$  - температура холодного газа в экспериментальных условиях,

$X$  - линейная координата по длине нагревателя той точки в которой необходимо определить температуру.

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что постоянная времени нагревателя при описании его как звена автоматической системы управления температурой газовой смеси прямо пропорциональна теплоемкости нагревателя и обратно пропорциональна поверхности теплоотдачи и коэффициенту теплоотдачи. Таким образом, постоянная времени нагревателя с изменением расхода газа через нагреватель, который определяет коэффициент конвективной теплоотдачи, также изменяется. Это создает дополнительные трудности при разработке автоматической системы управления температурой газовой смеси.

Учитывая, что экспериментальные исследования нагревателя требуют специальных условий протекания газа, плавного изменения подводимой мощности к нагревателю, различных измерительных приборов, была создана специальная экспериментальная установка, позволяющая решать указанные задачи. Она состоит из вентилятора, набора трансформаторов, комплекса измерительных приборов и специально разработанного прерывателя газового потока, имитирующего дыхание водолаза.

Использование экспериментальной установки позволило провести ряд исследований, давших возможность определить критериальные зависимости по расчету коэффициента конвективной теплоотдачи от нагревателя к газу. Так выявлено, что число Нуссельта для нагревателей данной конструкции в рабочем диапазоне расхода газа нахо-



дится как:

$$N_u = 0,0032 Re^{1,2} Pr^{0,33}$$

где:  $N_u$  - число Нуссельта,

$Re$  - число Рейнольдса,

$Pr$  - число Прандтля.

Анализ конструкции нагревателя и параметров его работы, проведенный в третьей главе позволил сделать заключение о пригодности данного нагревателя для работы в составе системы нагрева газовой смеси и создал предпосылки к использованию нагревателя, как объекта автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси.

В четвертой главе рассмотрены принципы построения инвариантной системы управления тепловым режимом газовой смеси, построенные на основе метода динамической компенсации возмущений, разработаны алгоритмы построения передаточных функций звеньев данной системы с использованием вариационных методов исчисления и на основе статистических характеристик возмущения. Установлено, что среди широкого спектра возмущающих воздействий, возникающих в системе нагрева газовой смеси наиболее характерными и требующими компенсации являются:

- изменение температуры воды,
- изменение расхода газа,
- изменение состава газа,
- изменение глубины погружения,
- нестационарность газового потока.

Анализ возмущения позволил определить принцип построения инвариантной системы управления, в которой поставленная задача решается при использовании двухконтурной схемы регулирования. Такой подход обусловлен тем, что при регулярных возмущениях (нестационарность газового потока), когда расход газа в течение некоторого промежутка времени равен нулю, размещение датчика

температуры за нагревателем по ходу газа приводит к большим колебаниям температуры поверхности нагревателя. Это обусловлено отсутствием информации о температуре нагревателя при нулевом расходе газа. Таким образом, наиболее качественная компенсация этих возмущений выполняется при размещении датчика непосредственно на нагревателе.

Однако, проведенные исследования показывают, что поддержание заданной температуры нагревателя не обеспечивает при изменении параметров погружения поддержание требуемой температуры газа. Для выполнения этого условия необходимо ввести в систему второй датчик, измеряющий температуру нагретой газовой смеси.

Представленная на рис. 3 структурная схема показывает функционирование такой системы. Порядок ее работы следующий: определяя температуру газовой смеси с помощью датчика, расположенного за нагревателем, автоматическая система управления при необходимости повышает или понижает температуру поверхности нагревателя, которая контролируется датчиком, расположенном на нагревателе. Полученные данные при моделировании теплообменных процессов в системе "человек-окружающая среда" позволяют утверждать, что в задачу автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси входит и необходимость изменения заданной температуры нагретого газа в процессе водоланого погружения на основании измеряемых параметров погружения. Кроме того, как отмечалось при исследованиях нагревателя, параметры нагревателя, как элемента системы управления, могут изменяться. Все это определяет инвариантную систему управления, способную поддерживать комфортные условия для водолаза при любых режимах его работы и представленную на рис. 4.

Изучение структуры системы управления показало, что в настоящий момент наибольший интерес представляет вопрос, связанный с нахождением передаточных функций регуляторов.



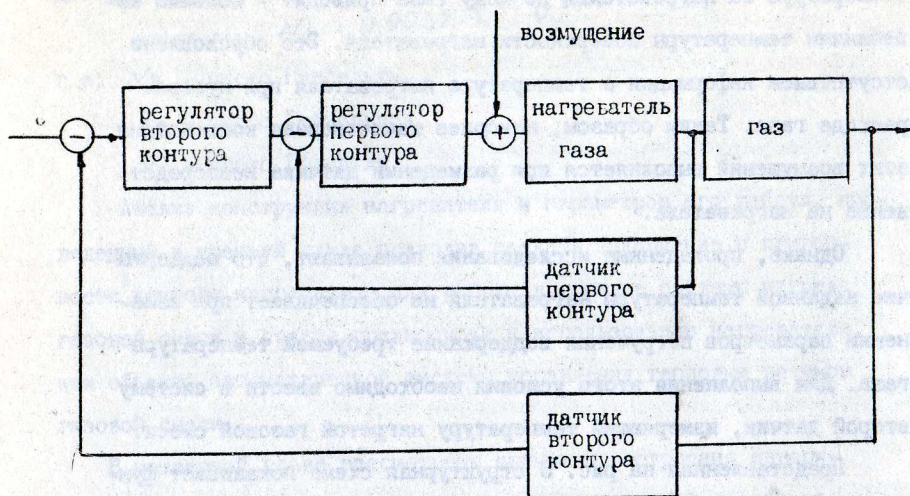


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной системы.

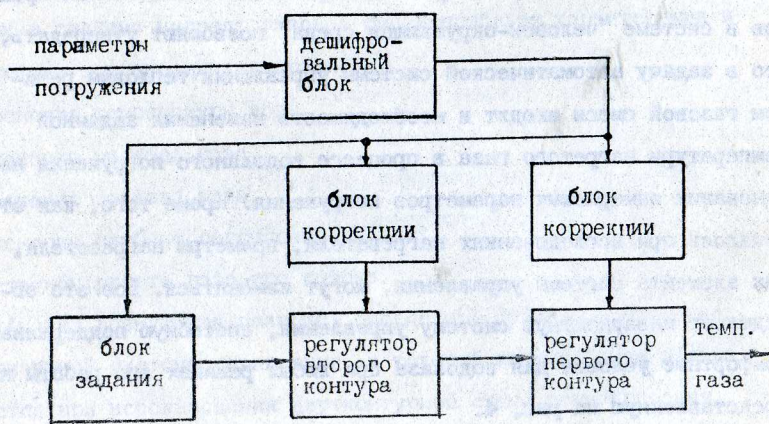


Рис. 4. Схема инвариантной системы управления.

Приведенный в главе алгоритм позволяет находить передаточные функции на основе теорий и методов проектирования оптимальных регуляторов. В качестве определяющего критерия избрана величина средне квадратического отклонения ошибки системы при наличии ограничения на мощность управления. Расчет проводился с использованием вариационных методов исчисления и на основе статистических характеристик возмущающего воздействия. Данный алгоритм был переведен на машинный язык и определение передаточных функций велось с помощью ЭВМ.

Результатом проведенного исследования явилось определение передаточных функций регуляторов первого и второго контуров, рекомендуемых для использования в САУ тепловым режимом газовой смеси. Принципиальные схемы данных регуляторов, разработанных на основе полученных передаточных функций, представлены на рис. 5.

Проведенная с использованием экспериментальной установки реализация двухконтурной системы (рис. 3), сделанной на основе двухпозиционных регуляторов, показала, что разработанный принцип построения системы управления работоспособен и дает возможность значительно улучшить параметры системы управления.

Разработанное программное обеспечение позволило провести машинный эксперимент с целью изучения работоспособности предложенных регуляторов. Данная работа показала, что двухконтурная схема управления с использованием регуляторов, полученных в диссертационной работе, работоспособна и может быть рекомендована для использования в реальных образцах водолазного снаряжения в качестве автоматической системы управления тепловым режимом газовой смеси с целью повышения комфортности и безопасности условий труда подлодочника.



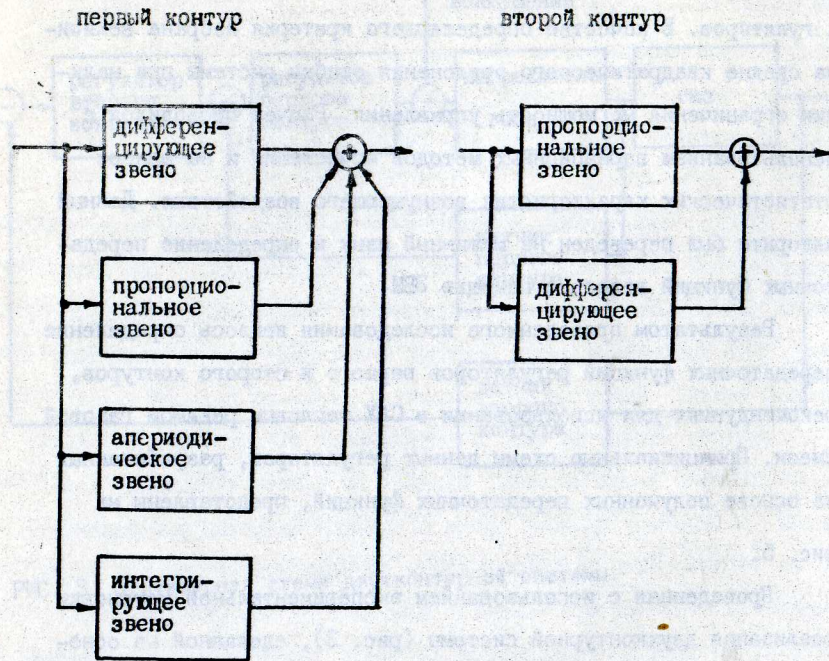


РИС. 5. Структурные схемы регуляторов первого и второго контуров.

Основные выводы.

1. Анализ современных средств тепловой защиты человека в условиях экстремально низких температур или в средах с повышенной теплопроводностью показал, что обеспечение его защиты и поддержание высокой работоспособности может быть осуществлено только с применением активного обогрева.

2. Разработана и реализована двухузловая имитационная математическая модель, позволяющая с учетом терморегуляторных реакций организма прогнозировать параметры теплового состоя-

ния организма человека при глубоководном водолазном погружении.

3. Установлена адекватность математической имитационной модели системы "человек - окружающая среда" реальному состоянию системы в ходе экспериментальной проверки. Установлено, что отклонения прогнозируемых значений температуры тела человека хорошо укладываются в области дисперсии нормального распределения температуры в физических экспериментах.

4. Определен на основании математического моделирования диапазон температур газовой смеси, позволяющий поддерживать оптимальное тепловое состояние организма водолаза в процессе погружения, а также определен диапазон температур газовой смеси, позволяющий минимизировать мощность обогрева при сохранении комфортных условий труда.

5. Предложены универсальные методики по определению геометрических и электрических параметров нагревателя газовой смеси, дающие возможность расчета этих параметров в зависимости от технических требований, предъявляемых к нагревателю.

6. Разработана на основании теории теплового моделирования специальная методика, позволяющая определить температурные характеристики нагревателя в реальных условиях работы под повышенным давлением, по результатам исследований, проведенных в лаборатории при нормальном давлении.

7. Выведены критериальные зависимости для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи, которые применимы к нагревателям газовой смеси данной конструкции и справедливы в рабочем диапазоне расходов газовой смеси.

8. Разработаны принципы построения инвариантной САУ, основанные на методе динамической компенсации возмущений при условии использования нескольких параметров вектора состояния объекта.

9. Определены алгоритмы, основанные на использовании ва-



риационных методов исчисления, дающие возможность построения передаточных функций регуляторов систем управления. Данные передаточные функции удовлетворяют выбранному критерию минимальности средне квадратической ошибки системы управления и учитывают статистические характеристики возмущающего воздействия.

Ю. Разработанная в диссертации имитационная модель прогнозирования теплового состояния человека при водолазном погружении принята для использования в научно-исследовательских работах ИВФ МЗ СССР.

II. Внедрение результатов работы в опытно-конструкторские разработки заинтересованной организации, занимающейся созданием образцов водолазного снаряжения, дало экономический эффект в размере 47 тыс. руб.

Опубликованные работы по теме диссертации:

1. Анализ эффективности работы АСР температуры газа респираторного устройства// Сборник научных трудов МТИЛП. Автоматизация и комплексная механизация производственных процессов легкой промышленности.-М.: МТИЛП, 1988./ соавтор Ефремов В.В.
2. Тепловая защита акванавта при подводных рыбохозяйственных исследованиях// Сборник научных трудов ВНИРО. Подводные исследования в био океанологических и рыбохозяйственных целях.-М.:ВНИРО, 1989. / соавтор Жаворонков А.И. и др.
3. Прогнозирование эффективности тепловой защиты человека на основе математического моделирования.//Деп. в ЦИИТЭИ легпром.06.09.89 № 2948 - лп./ соавтор Жаворонков А.И. и др.
4. Малогабаритный нагреватель воздуха как элемент активной теплозащитной одежды с автоматическим регулированием температуры//Деп. в ЦИИТЭИ легпром.06.09.89 № 2947 - лп./соавтор

Жаворонков А.И.  
Готапринт МТИЛП  
Заказ № 258.  
Тираж- 100 экз.

*Жаворонков*