

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ДИЗАЙНА И
ТЕХНОЛОГИИ

На правах рукописи

Анисимов Александр Александрович

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДООБОГРЕВАЕМОЙ СПЕЦОДЕЖДЫ ГЛУБОКОВОДНЫХ
ВОДОЛАЗОВ

Специальность: 05.13.06

«Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»
(лёгкая промышленность)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Ефремов В.В.

Москва – 2014

Введение	5
Глава 1. Обзор водолазных обогреваемых спецодежд	15
1.1. Общие сведения о водолажном спецснаряжении	15
1.2. Гидрокомбинезоны	17
1.2.1. Гидрокомбинезоны «сухого» типа	19
1.2.2. Гидрокостюмы «мокрого» и «полусухого» типов.....	22
1.2.3. Водобогреваемые гидрокомбинезоны	24
1.2.3.1. Примеры спецодежды, обеспечивающей водобогрев по открытой схеме с непосредственным контактом теплоносителя с телом водолаза.....	27
1.2.3.2. Примеры спецодежды, обеспечивающей водобогрев тела водолаза по открытой схеме через стенки нагревательных элементов (трубок).....	30
1.2.3.3. Примеры спецодежды, обеспечивающей водобогрев водолаза по закрытой схеме	30
1.3. Жёсткие водолазные скафандры	31
Выводы по главе 1	32
Глава 2. Исследование температурных полей в обогреваемой спецодежде водолазов	34
2.1. Метод «сеток» (метод конечных разностей).....	34
2.1. Расчёт и построение контурных температурных графиков для водобогреваемой спецодежды водолазов	36
2.1.1. Исследование вспененного полиэтилена.....	46
2.2. Исследование электрического нагревательного элемента	49
2.3. Расчёт мощности нагревательных элементов	57
Выводы по главе 2.....	61
Глава 3. Моделирование температурного поля обогреваемой одежды с помощью создания электротепловой аналогии	62
3.1. Электротепловая аналогия	62
3.2. Компьютерное моделирование электротепловой аналогии пакета системы «человек-одежда-окружающая среда».....	63

3.3. Создание и исследование физической электротепловой модели пакета системы «человек-одежда-окружающая среда»	66
Выводы по главе 3.....	69
Глава 4. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов	71
4.1. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента	71
4.2. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием резинового нагревательного элемента	78
4.3. Робастное управление.....	82
4.3.1. Расчёт робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента	85
4.3.2. Расчёт робастной устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды с учётом возможной 5% погрешности в расчётах и измерениях.....	88
Выводы по главе 4.....	90
Глава 5. Экспериментальное исследование работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолазов.....	92
5.1. Динамическая характеристика нагревательного элемента в спецодежде водолаза.....	93
5.2. Компьютерное моделирование работы автоматической системы регулирования температуры спецодежды с релейным, П и ПИ-регуляторами	95
5.2.1. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с релейным регулятором	96
5.2.2. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с П-регулятором	98

5.2.3. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с ПИ-регулятором	99
5.3. Лабораторное исследование работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой одежды с релейным регулятором	102
5.3.1. Исследование работы АСР температуры обогреваемой спецодежды водолаза с использованием регулятора МИНИТЕРМ-400	103
5.3.2. Исследование работы АСР температуры обогреваемой спецодежды водолаза, с использованием регулятора на основе МК ATtiny45	105
5.3.3. Построение переходных характеристик температуры нагревательного элемента и температуры на поверхности человеческого тела	110
Выводы по главе 5	113
Заключение	115
Библиографический список	118
Приложение 1. Пример расчёта распределения температуры с помощью метода «сеток» на ЭВМ	126
Приложение 2. Схема компьютерной модели электротепловой аналогии	130
Приложение 3. Расчёт коэффициентов передаточной функции объекта АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с трубчатым нагревательным элементом	131
Приложение 4. Пример расчёта и построения ЛАФЧХ и переходных характеристик АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с помощью ЭВМ	134
Приложение 5. Расчёт коэффициентов передаточной функции объекта АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с резиновым нагревательным элементом	137
Приложение 6. Определение устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с помощью метода Рауса-Гурвица на ЭВМ	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы:

Освоение биологических и сырьевых ресурсов мирового океана получает всё более широкое распространение. В июне 2012 года компания British Petroleum представила доклад со статистическими данными о потреблении энергоресурсов в мире [67]. Из этого доклада следует, что в 2011 году суммарная доля нефти и газа в мировом потреблении энергоносителей составила 56.74%. Потребление энергии в целом в мире выросло на 2.5%, потребление нефти увеличилось на 0.7%, а природного газа на 2.2%. Так как спрос на углеводородное сырьё неуклонно растёт, то это приводит и к росту объёмов добычи нефти и газа. В том же докладе BP сказано, что рост добычи нефти в мире за 2011 год составил 1.3%, а добыча природного газа в мире выросла на 3.1% по сравнению с 2010 годом.

По итогам 2011 года в России было добыто 670.5 миллиарда кубометров газа и 511.4 миллиона тонн нефти и газового конденсата (10.27 миллиона баррелей в сутки).

По сравнению с 2010 годом добыча газа увеличилась на 3.1% и установила исторический рекорд (предыдущее достижение установлено в 2008 году - 665 миллиарда кубометров), а добыча нефти - на 1.2% [67].

По прогнозам специалистов на период до 2030 года, темпы добычи нефти и газа в Российской Федерации будут поддерживаться на стабильно высоком уровне [39].

Между тем, уже сегодня остро стоит вопрос об истощении уже открытых месторождений, а новые месторождения всё чаще обнаруживаются в труднодоступных регионах. Также мировая нефтяная и газовая промышленность всё чаще проводит разведку, обустройство и разработку месторождений континентального шельфа: на сегодняшний день три четверти разведанных мировых запасов нефти и газа сосредоточены именно на континентальном шельфе морей и океанов [43].

Например, в России крупнейшие месторождения находятся на шельфе Сахалина, Баренцева, Карского и Каспийского морей. На шельфе Баренцева моря наиболее изученным является Штокмановское газоконденсатное месторождение, расположенное на расстоянии в 600 км от берега, при глубине моря 350 м и характеризующееся суровейшими климатическими условиями. По объёму запасов, данное месторождение относится к уникальным. Также открыты и разрабатываются месторождения на шельфе Печорского моря, месторождение на Сахалинском шельфе и т.д. [43].

В целом в России большинство открытых месторождений нефти и газа находится на замерзающих акваториях. Работа же в условиях пониженных температур осложнена суровыми климатическими условиями и требует создания новых и совершенствования имеющихся технических средств и технологий для разработки арктического шельфа [43].

При современной технологии без участия водолазов невозможно выполнение большинства работ под водой [37]. В процессе разведки и добычи нефти и газа они работают на буровых платформах, строительно-монтажных судах, на эксплуатационных платформах морских нефтепромыслов. На стадии разведочного бурения водолазы, как правило, наблюдают за состоянием устьевого оборудования, выполняют текущие ремонтные работы и ликвидируют последствия аварий. Наиболее сложным является водолазное обеспечение в период монтажа оборудования на уже разведанном месторождении. Этот этап включает большой объём плановых подводных работ, связанных с установкой оснований платформ, оголовков скважин, монтажом трубопроводов и их стыковкой [8, 37, 57].

Однако, водолазные работы в области нефтедобычи – не единственная отрасль, в которой требуются погружения под воду. Для примера, востребованными являются подводные научные исследования морской экосистемы [24, 38, 47], ремонтные работы с участием водолазов на ТЭЦ или объектах атомной энергетики [51, 52, 64] и т.д.

Соответственно, в связи с заинтересованностью в водолазных погружениях, важной задачей, требующей решения, становится комплексное обеспечение безопасности работы человека под водой [33, 41].

Одной из проблем, связанной с водолазными работами и требующей решения, является вероятность переохлаждения организма человека при длительной работе в экстремально холодных условиях [34, 47, 57], что может вызвать, в свою очередь, появление болезненных ощущений, перенапряжение нервной системы, значительное снижение реакции человека, падение чувствительности и подвижности конечностей. Как следствие, резко снижается качество и производительность труда, повышается вероятность совершения ошибочных действий [11].

Соответственно, тепловая защита водолазов занимает важное место в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности спусков на большие глубины при экстремально низких температурных условиях. Снижение теплопотерь от организма осуществляется использованием в одежде теплоизолирующих прокладок, нагревательных элементов и систем нагрева дыхательного газа [11].

Наиболее простым и доступным средством сохранения тепла продуцируемого организмом водолаза является применение одного или более комплектов водолазного белья или специальных утеплителей. Но полностью защитить водолаза от переохлаждения, при длительной работе его в холодной воде только за счет увеличения толщины теплозащитных слоев одежды практически не удастся [11, 57].

Вследствие этого, специальная одежда водолазов состоит не только из нательного белья и утеплителей, но также и из «активных» источников тепла, т.е. нагревательных элементов. Нагревательные элементы могут выполняться в виде как электрических нагревателей [10, 11, 13, 21-23, 35, 42], так и «водяных», т.е. использующих в качестве теплоносителя горячую воду [36, 48, 63, 64, 68, 70, 71].

Температура теплоносителя в водообогреваемых водолазных костюмах регулируется с помощью автоматической системы. В связи с тем, что один

водолазный спуск может проходить в течение нескольких часов, ряд параметров АСР может менять свои значения, что влияет на устойчивость всей системы. Для решения данной проблемы необходимо рассматривать решение задачи, связанной с расчётами робастно-устойчивой автоматической системы регулирования.

Робастное управление позволяет учитывать не только «фактор старения» с течением времени, но и возможные погрешности на стадии расчётов и проектирования всего комплекса водолазного спецснаряжения. Решение задачи по созданию робастно-устойчивой автоматической системы регулирования позволяет повысить её качество и надёжность.

Степень научной разработанности проблемы:

На кафедре «Автоматика» Московского государственного университета дизайна и технологии в течение многих лет проводятся научные исследования в области создания и совершенствования обогреваемой спецодежды для мелководных и глубоководных водолазов.

Под руководством д.т.н., проф. Майзеля М.М. учёные кафедры: Ефремов В.В., Жаворонков А.И., Шелудько А.Г., Шестаков А.И., и др. – проводили исследования и разработки в области водолазного спецснаряжения и АСР температуры данного спецснаряжения. На основе проведённых исследований, была разработана и передана в производство обогреваемая спецодежда ВЭК-67 и ВЭКГ-72, разработан нагреватель дыхательного газа для аппарата ИДА-72, который входит в состав водолазного снаряжения СВГ-300 и СВГ-200 [11]. Так же учёные кафедры проводили исследования тепловых свойств материалов и пакетов одежды в газовых средах при различных внешних условиях среды, исследование теплозащитных свойств электро- и водообогреваемой спецодежды, разработки в области создания АСР температуры обогреваемой спецодежды [3, 4, 6, 10-14, 21-23, 31, 32, 44].

Исследования в области разработки и совершенствования водолазного спецснаряжения, этапов его проектирования, а также совершенствование АСР температуры водолазного спецснаряжения проводили и следующие учёные

кафедры: Суханов В.А., Гривина И.В., Фукина В.А., Никитченко И.И., Власенко О.М. и др. [3-6, 9, 30, 42].

Также известны разработки, проводимые в области создания водолазного снаряжения учёными из России [35, 36] и отечественными предприятиями [63, 64].

За рубежом исследования, связанные с водолажным снаряжением проводят как частные фирмы [34, 64, 68, 70, 71]: Diving Unlimited International (США), Trelleborg (Швеция), Divex (Шотландия, Великобритания), Northern Diver (Великобритания), AQUALUNG (Франция), Comex (Франция) и др.; так и отдельные учёные [46, 48, 50-56].

Анализ имеющейся информации об исследованиях и разработках в области обогреваемых спецодежд позволяет сделать следующие выводы:

– Создание и совершенствование водолазного снаряжения является актуальной задачей для ведущих зарубежных и отечественных фирм;

– Обогреваемое спецснаряжение нашло широкое практическое применение. Вследствие этого актуальной задачей является дальнейшее развитие и модернизация автоматической системы регулирования температуры данной спецодежды.

– В связи с развитием техники и технологий, актуальной является совершенствование методики и методологии проектирования и расчётов АСР температуры водолазной обогреваемой спецодежды.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов проектирования автоматической системы регулирования (АСР) температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с помощью развития и создания экспериментальных и теоретических моделей, как отдельных элементов, так и системы в целом, с использованием современных микроконтроллеров, ЭВМ и новых достижений в области теоретических и практических исследований АСР.

Основные задачи исследований, которые были решены в данной диссертационной работе для достижения поставленной цели:

– Проанализирован рынок водолазного спецснаряжения, сделан вывод о целесообразности исследований в области разработки водообогреваемых спецодежд и автоматической системы регулирования температуры данного снаряжения;

– Произведены все необходимые расчёты, построение и дальнейшее исследование температурных полей; произведён анализ распределения температуры в слоях спецодежды водолазов для ряда условий: используемая газовая смесь для дыхания, температура внешней среды, используемый нагревательный элемент, используемый материал в качестве слоя утеплителя;

– По результатам построения графиков температурных полей проведён анализ двух типов водообогреваемых элементов; проведено сравнение параметров данных нагревателей между собой и с электрическим нагревателем;

– Проведено исследование утеплителя из материала «вспененный полиэтилен» с целью определения возможности дальнейшего использования данного материала при проектировании и создании обогреваемой спецодежды водолазов; проведено сравнение указанного утеплителя с утеплителем АТИМ;

– Проведено компьютерное и лабораторное исследование, основанное на методе электротепловой аналогии, с целью получения экспериментальных данных и последующего построения графиков температурных полей; проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными с помощью расчётов по методу «сеток»; сделан вывод о точности результатов, получаемых с помощью расчётов и путём создания экспериментальной модели;

– Рассчитана робастная устойчивость АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента; расчёты проведены для двух случаев: с учётом возможной 5% погрешности в расчётах коэффициентов передаточных функций; с учётом фактора «старения»;

– Проведено компьютерное моделирование и анализ работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды; моделирование работы АСР температуры нагревательного элемента проведено для релейного двухпозиционного, П- и ПИ- регуляторов;

– Проанализированы переходные характеристики температуры АСР в лабораторных условиях с двумя регуляторами: промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400 и регулятором на основе микроконтроллера (МК) AVR ATtiny45;

– Проведено сравнение экспериментально-полученных данных, с данными, полученными с помощью расчётов и с помощью компьютерного моделирования.

Методы исследований:

Решение поставленных задач осуществлено с помощью методов математического и компьютерного моделирования, планирования эксперимента, использования приближённых методов решения дифференциальных уравнений (метод «сеток» или метод «конечных разностей») и с использованием метода «аналогии», а также с помощью применения современного компьютерного оборудования и программного обеспечения.

Научная новизна работы:

– Впервые проведено углублённое исследование температурных полей в обогреваемой спецодежде с применением современного компьютерного программного обеспечения; проанализировано распределение температуры в слоях обогреваемой спецодежды водолазов при расположении нагревательных элементов на поверхности слоя из нательного белья; проведено сравнение распределения температуры в слоях спецодежды при использовании двух типов утеплителей: АТИМ и вспененного полиэтилена; проведено сравнение эффективности работы электрического нагревательного элемента при расположении элемента в слое утеплителя или на поверхности слоя из нательного

белья водолаза; проанализированы контурные графики температурных полей при использовании резинового водообогреваемого элемента и проведено сравнение полученных результатов с графиками для трубчатого нагревательного элемента и для электрического нагревательного элемента;

– Впервые проведён расчёт робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента;

– Впервые исследована работа регулятора на основе микроконтроллера AVR ATtiny45 в составе автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолазов.

На защиту выносятся:

– Применение рассматриваемых методов расчёта и построения графиков температурных полей с помощью ЭВМ как этапа проектирования обогреваемой спецодежды водолазов и автоматической системы регулирования температуры данной спецодежды;

– Модель робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов при использовании трубчатого нагревательного элемента;

– Результаты использования микроконтроллеров семейства AVR для разработки компактных регуляторов АСР, на основе проведённых лабораторных экспериментов с релейным регулятором на основе МК ATtiny45 в составе автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолазов.

Практическая ценность и реализация работы:

– Полученные результаты позволяют сделать вывод об улучшении методологии в области расчётов и построения графиков температурных полей обогреваемой одежды. Полученные результаты позволяют получить более

точную и наглядную картину распределения температуры в слоях обогреваемой спецодежды, что, в свою очередь, позволяет сделать обоснованный выбор места установки датчика автоматической системы и понять преимущества исследуемых нагревательных элементов;

– Полученная система уравнений для пакета системы «человек-спецодежда-окружающая среда» позволяет реализовать на ЭВМ расчёт температурных полей для различных рассматриваемых условий, что ускоряет процесс проектирования как спецснаряжения, так и самой АСР;

– Расчёты, проведённые для получения робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов, позволили получить модель АСР, устойчивой с течением времени, при изменении состава дыхательной газовой смеси и с условием погрешности в расчётах и измерениях;

– Исследована работа релейного регулятора на основе микроконтроллера ATtiny45 семейства AVR в составе автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолаза. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования микроконтроллеров AVR для разработки регуляторов АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов.

Апробация результатов работы:

Результаты исследований были представлены на 64 научной конференции студентов и аспирантов «Молодые учёные – XXI веку», в Московском Государственном Университете Дизайна и Технологии 10-12 апреля 2012 года, на международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» в Московском Государственном Университете Дизайна и Технологии 12-13 ноября 2013 года, на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки», г. Уфа, 14 февраля 2014 года, на XVIII – XIX международной

заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук», г. Москва, в январе – феврале 2014 года. Тезисы докладов опубликованы в сборниках научных конференций [1, 15, 16, 18].

Результаты исследований опубликованы в сборнике научных трудов аспирантов МГУДТ [2]. Результаты исследований опубликованы в научном журнале, рекомендованном ВАК – «Дизайн и технологии» [17, 19, 20]. В получении и обсуждении результатов настоящей работы большую помощь оказал коллектив кафедры «Автоматика» Московского государственного университета дизайна и технологии, которым автор выражает свою искреннюю благодарность и признательность.

Проведение экспериментов и внедрение результатов работы в учебный процесс проводилось на базе кафедры «Автоматика» МГУДТ.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ВОДОЛАЗНЫХ ОБОГРЕВАЕМЫХ СПЕЦОДЕЖД

1.1. Общие сведения о водолазном спецснаряжении

Водолазное снаряжение нашло своё применение в области добычи природных ресурсов мирового океана [8, 37, 57], при исследовании морской экосистемы [24, 38, 47], в ВМФ [11], а также в других областях [51, 52, 64].

На рисунке 1.1 показан первый этап бурения скважины с участием водолаза.

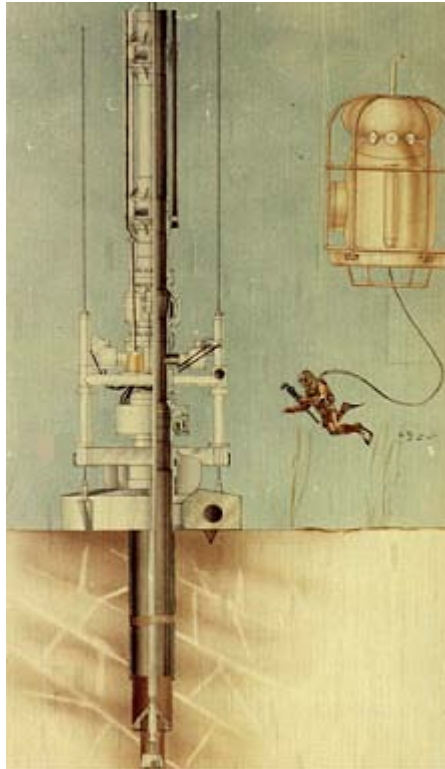


Рисунок 1.1 – Первый этап бурения с участием водолаза

Комплекс устройств и изделий, надеваемых водолазом, для обеспечения жизнедеятельности и работы в водной среде в течение заданного промежутка времени, называют водолазным снаряжением [59].

Водолазное снаряжение отвечает своему назначению, если оно может обеспечить [11, 28, 59]:

- Дыхание человека при выполнении им работы под водой;
- Достаточную подвижность и устойчивое положение под водой;

– Безопасность при погружении, выходе на поверхность и в процессе работы;

– Надёжную связь с поверхностью.

В зависимости от решаемых задач водолазное снаряжение различается:

– По глубине использования: на снаряжение для малых и средних глубин, а так же глубоководное;

– По способу обеспечения дыхательной газовой смесью: на автономное и шланговое. Спуски водолазов с использованием для дыхания воздуха возможны до глубины 60 м [11, 28]. При погружении на большие глубины, а так же для сокращения времени декомпрессии при спусках на малые глубины, для дыхания водолазам подаются специальные кислородно-гелиевые дыхательные смеси [11, 27];

– По способу теплозащиты: на снаряжение с пассивной теплозащитой, электро-, газо- и водообогреваемое;

– По способу изоляции: на снаряжение с водогазонепроницаемыми гидрокомбинезонами «сухого» типа и проницаемыми гидрокомбинезонами «мокрого» типа;

– По способу поддержания необходимого для дыхания состава газовой смеси. Здесь различают снаряжение: вентилируемое, с открытой схемой дыхания, с полужамкнутой схемой дыхания, с замкнутой схемой дыхания [11, 27, 28].

Неотъемлемой частью водолазного спецснаряжения являются водолазные гидрокомбинезоны, которые, как сказано выше, могут быть «сухого» и «мокрого» типов, а также могут дополняться средствами активной теплозащиты.

Рассмотрим подробнее существующие типы гидрокомбинезонов, одеваемые водолазами при погружении под воду.

1.2. Гидрокомбинезоны

Гидрокомбинезон – водолазная одежда, предназначенная для изоляции тела водолаза от воды. Гидрокомбинезон входит в комплект водолазного снаряжения. Шлем, куртка, штаны и чулки составляют единый костюм, причём рукава куртки чаще всего оканчиваются трёхпальными перчатками или манжетами [27]. Как говорилось ранее, различают гидрокомбинезоны «сухого» и «мокрого» типов [11, 64].

«Мокрый» гидрокомбинезон устроен таким образом, что между его тканью и телом водолаза находится тонкий слой воды, который не циркулирует и нагревается за счёт выделяемого телом водолаза тепла [11].

К «сухим» гидрокомбинезонам относятся те, которые не пропускают воду в пространство между одеждой и человеком. Достигается данный эффект за счёт использования уплотняющих манжет на руках и шее (обтюраторов), а также специальных застёжек [11].

Так же, как говорилось ранее, в качестве теплозащиты водолазов может использоваться т.н. «пассивная» и «активная» теплозащита.

«Пассивная» теплозащита обеспечивает комфортные температурные условия в подкомбинезонном пространстве при использовании комбинезонов как «сухого» так и «мокрого» типов. Однако теплозащитные свойства сохраняются лишь при спусках на небольшие глубины (до 60 м) и при температуре воды выше 15 °С. К средствам пассивной теплозащиты относятся: шерстяное и меховое водолазное бельё, утеплители, теплозащитная одежда [11].

Анализ источников [34, 64] показывает, что в настоящее время наибольшую популярность приобретают синтетические утеплители на основе современных материалов, которые пришли на смену традиционному водолазному белью. Данные утеплители по теплозащитным свойствам соответствуют одному комплекту шерстяного водолазного белья.

Наибольшее распространение и популярность получили утеплители на основе материалов Thinsulate и Polartec [34, 64].

Однако так как «пассивная» теплозащита не всегда может обеспечить условия теплового комфорта [11, 27, 28, 57], используют и «активные» источники обогрева.

«Активная» теплозащита необходима при спусках на большие глубины, а также при выполнении двигательных работ средней и малой тяжести в холодной воде на малых глубинах [11]. При этом важно учесть, что обогрев водолаза не ограничивается только обогревом тела человека: для обеспечения условий теплового комфорта необходимо так же производить и подогрев газовой смеси, используемой для дыхания при глубине погружения больше 60 м [3-6, 11, 14, 31, 44, 50, 53].

В качестве источников тепла могут использоваться: воздух, горячая вода, электрический ток, химические и изотопные вещества. Наиболее широкое распространение получила электро- [10, 11, 13, 21, 22, 35, 42] и водообогреваемая спецодежда водолазов [11, 36, 42, 48, 63-65, 68, 70, 71].

Из представленных источников тепла, горячая вода – наиболее простой и безопасный способ обогрева водолаза. Однако данный способ требует минимального расстояния между водолазом и водоподогревателем, так как горячая вода при движении по шлангу охлаждается [11]. Использование воды в качестве теплоносителя имеет ещё одну характерную особенность – это универсальность данного способа обеспечения условий теплового комфорта водолаза: воду можно использовать в тех случаях, когда погружения происходят не в холодную, а в горячую внешнюю среду, например, при проведении водолазных спусков на ТЭЦ и предприятиях металлургической промышленности [51, 52, 64]. Тогда с помощью подачи воды с поверхности можно осуществлять охлаждение водолаза и предотвратить перегрев человека под водой.

Далее рассмотрим подробнее современные «сухие» и «мокрые» гидрокombineзоны, а также представленные на рынке гидрокombineзоны с «активной» теплозащитой.

1.2.1. Гидрокомбинезоны «сухого» типа

«Сухие» гидрокомбинезоны используются водолазами, при погружениях в воду до глубины 60 м, температура которой ниже 13 °С. Основными материалами, используемыми в изготовлении современных гидрокостюмов сухого типа для профессионального использования, сегодня являются неопрен, триламинат, и натуральная резина. Все эти материалы – высочайшего качества и отличаются высокими эксплуатационными характеристиками. Использование каждого вида материалов обуславливается условиями эксплуатации гидрокомбинезонов и личными предпочтениями водолазов [64].

Для облегчения процесса одевания – раздевания гидрокомбинезоны имеют герметичные молнии. Для обеспечения комфортности водолазу гидрокомбинезоны имеют клапаны поддува и стравливания воздуха из подгидрокомбинезонного пространства, что уменьшает возможность обжима и выброса водолаза на поверхность [64].

Как правило, комбинезоны имеют закрытые (вклеенные) боты, покрытые толстым слоем маслобензостойкой и износостойчивой резины. Как правило, в районе коленей, локтей, в области плеч и паха устанавливаются специальные усиления из кевлара или высокопрочной резины. Крой костюмов выполняется таким образом, что обеспечивается возможность одевания теплоизолирующего белья [64].

Как говорилось ранее, костюмы могут комплектоваться специально разработанными утеплителями. Конструкция и материал утеплителей разработаны таким образом, что обеспечивается максимальный комфорт водолазу. Специальная ткань обладает односторонней пропускной способностью для влаги, выделяемой в процессе работы человеческим телом [64].

В настоящий момент на рынке представлены следующие гидрокомбинезоны «сухого» типа для погружения на глубины до 60 м [64]:

Гидрокомбинезон СВУ-5 (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Гидрокомбинезон СВУ-5

Данный костюм изготавливается методом вулканизации, благодаря чему костюм не имеет клееных соединений. Имеет усиления из резины в области колен, плеч и локтей, а также регулируемые внутренние подтяжки.

Гидрокомбинезон Titan Corduna FZ (рисунок 1.3):



Рисунок 1.3 – Гидрокомбинезон Titan Corduna FZ

Гидрокомбинезон «сухого» типа серии Titan Cordura FZ с герметичной молнией, расположенной спереди разработан для выполнения особо сложных операций. Модель сочетает высокую износостойкость, прочность на разрыв. Шов гидрокомбинезона устроен по принципу впритык, который проклеивается как снаружи, так и изнутри.

Гидрокомбинезон Aqua Lung Northland (рисунок 1.4):



Рисунок 1.4 – Гидрокомбинезон Aqua Lung Northland

Гидрокомбинезоны Aqua Lung Northland изготовлены из прессованного неопрена с износостойким покрытием из нейлона. Предназначены для проведения поисковых и спасательных работ.

Гидрокомбинезон Aqua Lung Blizzard Pro (рисунок 1.5):



Рисунок 1.5 – Гидрокомбинезон Aqua Lung Blizzard Pro

Данный гидрокомбинезон изготовлен из прессованного неопрена. Имеет вклеенные боты и защитные накладки в области коленных и локтевых сгибов.

Рукава заканчиваются манжетами. Отделяемый шлем также изготовлен из неопрена. Предназначен для проведения поисковых и спасательных работ.

Гидрокомбинезон серии Sea Horse (рисунок 1.6):



Рисунок 1.6 – Гидрокомбинезон Sea Horse

Костюм Sea Horse рекомендован при проведении операций и работ, связанных с необходимостью длительного нахождения персонала как на воздухе, так и в воде. Предназначен для персонала спасательных и патрульных подразделений в вооруженных силах, пограничной охране, спасательных службах на водах и палубными командами торговых судов в качестве основной рабочей одежды спецперсонала.

Помимо вышеперечисленных гидрокомбинезонов «сухого» типа, на рынке представлены и следующие гидрокомбинезоны: гидрокомбинезоны серии MPS; гидрокомбинезоны компании Trelleborg [71]: Viking HDS 1000, Viking PRO 1000, Viking HDS 1500, Viking HD 1500, Viking X-treme, Viking PRO VSN; гидрокомбинезоны Whites; гидрокомбинезоны Arctic Circle и т.д [64].

1.2.2. Гидрокостюмы «мокрого» и «полусухого» типов

Гидрокостюмы «мокрого» и «полусухого» типов изготавливаются из неопрена толщиной 5 и 7 мм, имеют анатомический крой и плотно облегают тело водолаза.

Вода, проникая через манжеты и молнию, образует тонкий слой между телом и материалом костюма. Этот слой не подвержен циркуляции и нагревается теплом человеческого тела [64].

Отличие гидрокостюмов «мокрого» типа от гидрокостюмов «полусухого» типа состоит в том, что последние имеют водонепроницаемую молнию и улучшенную обтюрацию конечностей. В качестве обтюраторов используются манжеты из неопрена, имеющего одностороннее дублирование. Это уменьшает доступ и циркуляцию воды между телом и гидрокостюмом. Таким образом, теплозащитные свойства гидрокостюмов «полусухого» типа выше гидрокостюмов «мокрого» типа примерно на 10-15% [64].

Гидрокостюмы «мокрого» и «полусухого» типов могут изготавливаться как в виде монокостюмов, так и с отдельными частями [64].

Монокостюмы более удобны при одевании, но обладают более низкими теплозащитными свойствами. Раздельный гидрокостюм состоит из двух или трех частей – куртки, брюк и шлема. Такой костюм облегает туловище двойным слоем неопрена и обладает лучшими теплоизолирующими свойствами. Оба типа гидрокостюмов могут иметь клеенный или отдельный шлем [64].

В последнее время появились комбинированные гидрокостюмы, представляющие собой монокостюм с длинными штанинами и рукавами без капюшона, жилета-безрукавки и шлема. Такой костюм довольно универсален и, используя его разные части, можно проводить спуски, как в теплой, так и в холодной воде [64].

На рынке представлены следующие типы «мокрых» и «полусухих» гидрокостюмов [64]: гидрокостюмы серии ГКН-5, гидрокостюмы серии ГКН-7: «Белеарес», «Баланс-комфорт», «Гудзон»; гидрокостюм Aqua Lung Bali (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Гидрокостюм Aqua Lung Bali

Данный гидрокостюм изготовлен из неопрена толщиной 3.5 мм с подкладкой из джерси. Может использоваться в качестве пассивной теплозащиты по принципу гидрокombineзона мокрого типа и одеваться под водообогреваемые гидрокombineзоны.

1.2.3. Водообогреваемые гидрокombineзоны

Как говорилось ранее, в случаях, когда «пассивной» тепловой защиты недостаточно для обеспечения условий теплового комфорта водолаза, используют «активную» тепловую защиту. В состав водообогреваемой системы, как правило, входят: нагреватель теплоносителя – воды, шланги подачи горячей воды от нагревателя к спецодежде, нагреватель газовой смеси и водообогреваемый костюм. Шланги подачи горячей воды изготавливаются из материалов с низкой теплопроводностью. Контроль за температурой нагревателя происходит с помощью специальной автоматической системы регулирования [11, 64].

На рынке водолазного спецснаряжения широко представлены водообогреваемые гидрокombineзоны, которые могут работать с открытым либо с закрытым циклом. Общий принцип работы водообогреваемых

гидрокомбинезонов по открытому и закрытому циклам представлен на рисунках 1.8 и 1.9 соответственно.

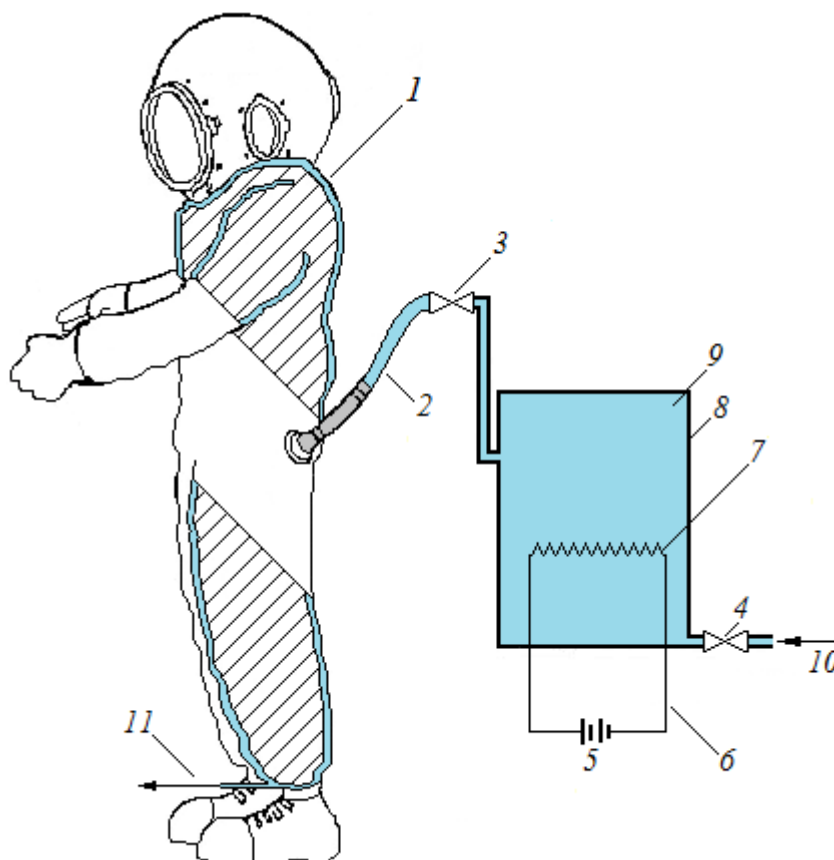


Рисунок 1.8 – Схема гидрокомбинезона с жидкостным обогревом открытого цикла

1 – гидрокостюм; 2 – теплоизолированный шланг; 3 и 4 – запорно-регулирующие вентили; 5 – источник питания нагревателя воды; 6 – кабель питания; 7 – нагреватель воды; 8 – корпус нагревательного агрегата; 9 – теплоноситель (вода); 10 – водозабор; 11 – слив воды.

На рисунке 1.8 представлен случай обогрева водолаза по открытой схеме с использованием «мокрого» костюма.

Как правило, вода поступает по теплоизолированному шлангу к гидрокостюму водолаза. В гидрокостюме проложены разводящие трубки, через которые вода вытекает в подкомбинезонное пространство, после чего, под влиянием давления, отработанная вода вытекает во внешнюю среду через соединения гидрокостюма с водолазными перчатками, ботинками и шлемом [11, 64].

Так же обогрев водолаза по открытой схеме может быть не только «мокрого» типа, и осуществляться без непосредственного контакта человека с теплоносителем – через стенки нагревательных элементов (как правило, полимерных трубок).

Полимерные трубки так же используются в водообогреваемой спецодежде и в случае с обогревом по закрытой схеме.

На рисунке 1.9 представлена общая схема работы гидрокомбинезона с закрытым (замкнутым) циклом.

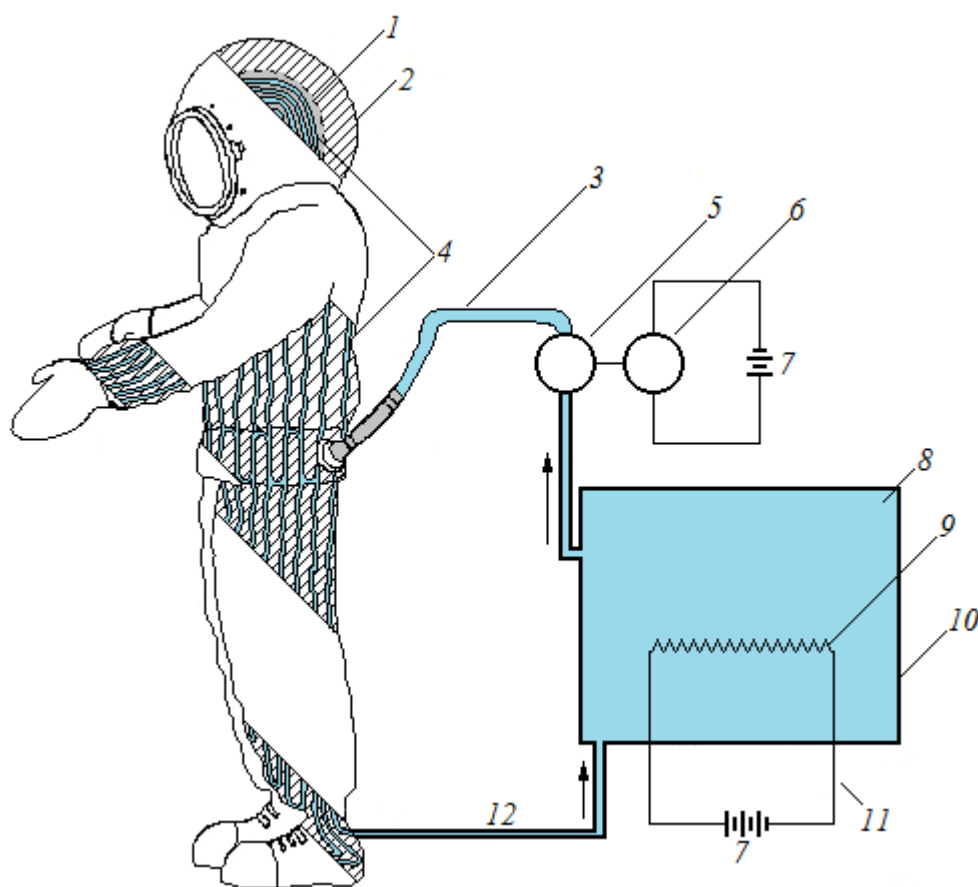


Рис. 1.9 – Схема гидрокомбинезона с жидкостным обогревом закрытого цикла

1 – внутренний обогреваемый комбинезон; 2 – гидрокомбинезон; 3 – теплоизолированный шланг; 4 – трубчатый нагревательный элемент; 5 – перекачивающий насос; 6 – электродвигатель; 7 – источники электрического питания; 8 – теплоноситель (вода); 9 – нагреватель воды; 10 – корпус нагревательного агрегата; 11 – кабель питания; 12 – отводная трубка

В данном случае вода также поступает от нагревателя к гидрокомбинезону по теплоизолированному шлангу, после чего, либо попадает в накопительный резервуар, либо сразу в систему из трубок, которые располагаются в гидрокомбинезоне. Трассировка и расположение трубок предусматривают равномерное распределение теплоносителя по телу человека, в случае необходимости возможен обогрев головы водолаза со стороны затылка, обогрев лицевой макси, обогрев ладоней и ног водолаза. Отработанный теплоноситель удаляется через отводной шланг обратно к нагревателю, расположенному в водолазном колоколе или на судне [11]. Таким образом, обеспечивается циркуляция воды в контуре «обогреваемая одежда – нагреватель воды».

Далее приведём примеры обогреваемых гидрокомбинезонов, работающих по представленным схемам.

1.2.3.1. Примеры спецодежды, обеспечивающей водообогрев по открытой схеме с непосредственным контактом теплоносителя с телом водолаза

В качестве примера спецодежды, осуществляющей обогрев по такому принципу, можно привести водообогреваемые гидрокомбинезоны фирмы Divex, рисунок 1.10.



Рисунок 1.10 – Водообогреваемый гидрокомбинезон POLARIS

В данном образце обогреваемой одежды по внутренней поверхности гидрокombineзона прокладываются разводные трубки. Трассировка и конструкция данных трубок обеспечивают равномерное распределение тёплой воды по телу водолаза и исключают их перегибание и закупорку. Для доставки теплоносителя в водолазные боты, перчатки и шлем гидрокombineзона трубки подачи тёплой воды выходят за пределы рукавов, штанин или шейного обтюраторов. Теплоноситель, двигаясь по разводящим трубкам, истекает через отверстия и открытые концы трубок, наполняя подкомбинезонное пространство, обогревает водолаза и затем удаляется во внешнюю среду [64, 68].

Похожим образом осуществляется обогрев водолаза с помощью гидрокombineзона фирмы «Comex». В данном гидрокombineзоне теплоноситель с температурой 36-37°C подается по тонким трубкам к ногам, рукам, груди, спине и голове (с затылочной части). Через отверстия трубок вода выливается в подкомбинезонное пространство. Так как давление в подкомбинезонном пространстве больше окружающего – теплая вода перемещается через костюм в окружающую среду. Таким образом, обеспечивается равномерный обогрев тела водолаза [11].

По похожему принципу работают гидрокombineзон Viking Hot Water Suit (HWS) компании Trelleborg (рисунок 1.11) и водообогреваемый гидрокombineзон фирмы Northern Diver (рисунок 1.12).



Рисунок 1.11 – Водообогреваемый гидрокombineзон Viking HWS

В гидрокombineзоне Viking HWS Система трубок проложена по торсу со стороны спины и груди. Концы трубок, выходящих из рукавов и штанин гидрокombineзона, открыты для свободного истечения теплоносителя [64, 71].



Рисунок 1.12 – Водобогреваемый гидрокостюм фирмы Northern Diver

В гидрокостюме фирмы Northern Diver вода поступает в комбинезон по трубкам, которые выполнены из специальной резины, позволяющей предотвратить их перелом в процессе эксплуатации. Для комфорта водолаза, данные трубки фиксируются внутри костюма с помощью мягкой обшивки из неопрена. Трубки прокладываются таким образом, чтобы обеспечить максимально комфортные условия, необходимые для жизнедеятельности водолазов при длительных погружениях. Штанины и рукава костюма можно обрезать до нужной длины, а трубки прокладываются обратно в комбинезон через специальные фиксаторы. Так же есть возможность обогрева лицевой маски и шеи со стороны затылка. Данный гидрокостюм прошёл удачные испытания на нефтедобывающей платформе в Северном Море на глубине в 355 метров [70].

1.2.3.2. Примеры спецодежды, обеспечивающей водообогрев тела водолаза по открытой схеме через стенки нагревательных элементов (трубок)

Примером обогреваемой спецодежды, работающей по открытой схеме, с обогревом водолаза через стенки нагревательных элементов, в качестве которых используется система трубок, является отечественный гидрокостюм водяного обогрева (КВО-2), представленный на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Костюм водяного обогрева КВО-2

Костюм предназначен для погружений в воду с температурой 0-10°C и при наличии под гидрокombineзоном газовых смесей с содержанием гелия до 99%. Теплоноситель поступает от надводного или подводного объекта по шлангу через соединительный узел гидрокombineзона, разъём и приёмный коллектор. Далее теплоноситель циркулирует по трубкам на костюме и отводится наружу, во внешнюю среду [11, 41, 63].

1.2.3.3. Примеры спецодежды, обеспечивающей водообогрев водолаза по закрытой схеме

Примером костюма, работающего по закрытой схеме, является модель гидрокombineзонов фирмы DUI (рисунок 1.14), которые применяются на глубинах до 300 м при температуре окружающей воды +4.4°C [11].



Рисунок 1.14 – Водобогреваемый костюм фирмы DUI

1.3. Жёсткие водолазные скафандры

Стоит отметить, что для глубоководных погружений также применяются так называемые «жёсткие» или нормобарические водолазные скафандры (рисунок 1.15).

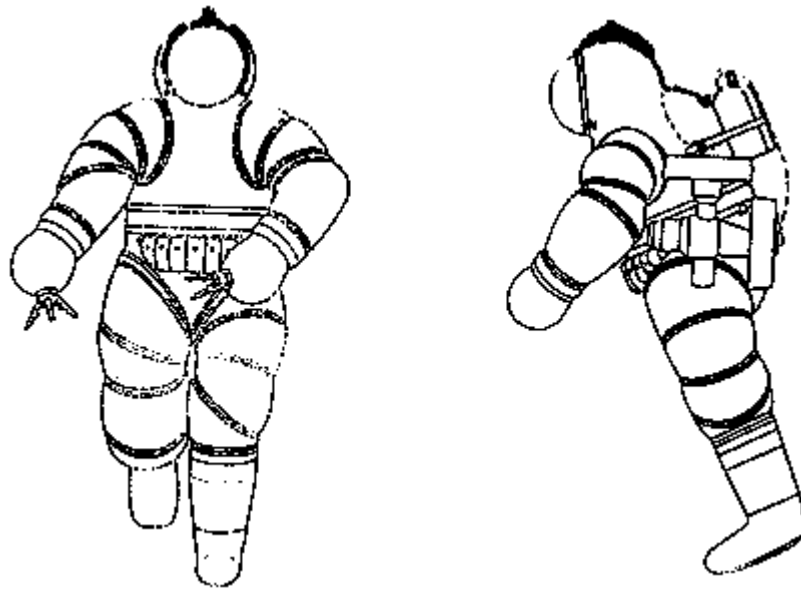


Рисунок 1.15 – Нормобарический скафандр

Название «нормобарический скафандр» означает, что жёсткая оболочка скафандра принимает на себя давление от 30 до 60 *атм*, в то время, как внутри скафандра остаётся давление, близкое к атмосферному. Это позволяет избежать продолжительного времени, которое тратится на декомпрессию в случае использования так называемых «мягких» водолазных скафандров [61].

Недостатком же данных водолазных скафандров можно назвать отсутствие средств активного обогрева или охлаждения. Поддержание необходимой температуры тела водолаза достигается путём использования средств пассивной теплозащиты, а так же за счёт того, что газоочиститель при поглощении углекислого газа выделяет тепло. В случае же работ на небольших глубинах в тёплой воде, охлаждение водолаза приходится проводить путём временного погружения его на большую глубину, где вода имеет более низкую температуру [61].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

– Исследован рынок водолазных гидрокombineзонов и гидрокостюмов, в том числе и водообогреваемых. Показано, что водообогреваемые гидрокombineзоны пользуются большим спросом, что обуславливает их широкий выбор на рынке водолазного спецснаряжения. Рост конкуренции на рынке водолазного спецснаряжения приводит к совершенствованию водолазных обогреваемых гидрокombineзонов. В центре внимания ведущих фирм-производителей водолазного снаряжения остаётся создание удобного и надёжного обогреваемого гидрокombineзона;

– Исследованы литературные источники, в которых подтверждается универсальность гидрокombineзонов, использующих водонагревательные элементы: данная спецодежда может использоваться для погружения не только в холодную, но и в горячую воду. Данный фактор также обуславливает спрос и необходимость в создании и совершенствовании водообогреваемой спецодежды водолазов;

– Приведена информация о «жестких» водолазных скафандрах, которые являются конкурентами «мягких» водолазных скафандров. Не смотря на успехи в области разработок нормобарических скафандров, «мягкие» водолазные костюмы продолжают широко использоваться при погружениях под воду. В отличие от

своих конкурентов, «мягкие» водолазные скафандры можно обеспечить средствами активного обогрева/охлаждения, что позволяет обеспечить условия теплового комфорта водолаза во время работы под водой. И, следовательно, актуальной является задача по разработке и совершенствованию методов проектирования и создания автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолазов в целом, и водообогреваемой спецодежды в частности.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБОГРЕВАЕМОЙ СПЕЦОДЕЖДЕ ВОДОЛАЗОВ

Для создания автоматической системы регулирования температуры обогреваемой одежды и её корректной работы, необходимо правильно выбрать места размещения датчиков температуры в слоях пакета одежды, а также оценить качество обогрева при использовании того или иного нагревательного элемента. Для этого в работе произвели расчет температурных полей.

Расчёты и построение температурных полей пододёжного пространства производятся с помощью различных методик. Например, процесс теплопередачи с поверхности тела человека, через слои одежды в окружающую среду рассматривается в работе [40]. Авторами предлагается методика расчёта температуры в пододёжном пространстве на основе итерационного метода и реализованная на языке PLI/L.

В работе [42] для этих целей рассматривается метод сплайнов. Расчёт производится для проволочного и трубчатого нагревателей, однако не учитывается слой нательного белья – при расчётах считается, что нагревательные элементы располагаются в толще утеплителя.

В данной работе для расчётов и нахождения температуры в слоях спецодежды глубоководных водолазов рассматривается метод «сеток», а так же считается, что нагревательные элементы располагаются на поверхности нательного белья, что способствует более качественному обогреву водолаза.

2.1. Метод «сеток» (метод конечных разностей)

Один из наиболее простых и распространённых методов решения задачи теплопроводности называется методом «сеток» или же методом конечных разностей. Подробное описание метода приводится из источника [45].

Этот метод основан на замене производных, входящих в дифференциальное уравнение, приближёнными значениями, выраженными через разности значений

функции в отдельных точках (узлах) сетки (рисунок 2.1). Дифференциальное уравнение для этого случая имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0. \quad (2.1)$$

В результате преобразований дифференциального уравнения (2.1) можно получить соответствующее ему уравнение в конечных разностях.

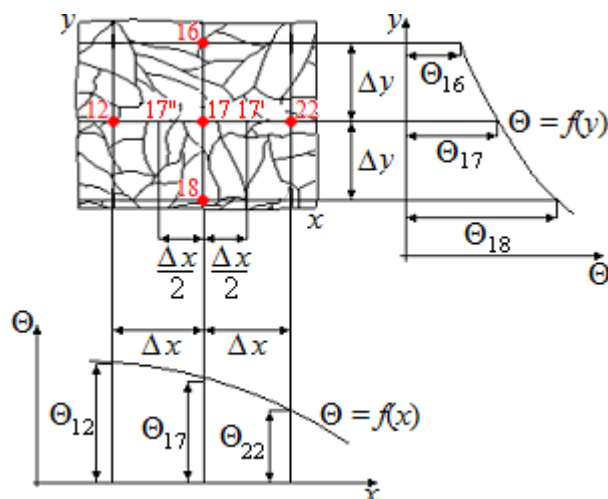


Рисунок 2.1 – К выводу уравнения теплопроводности в конечных разностях для двумерного температурного поля

Координаты точки x и y , температуры Θ_{17} , Θ_{12} , Θ_{16} , Θ_{18} , Θ_{22} , в точке 17 и узлах сетки 12, 16, 18, 22 соответственно.

Градиент температур в направлении оси x для точки 17 можно написать в виде:

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x+(\Delta x/2), y} \approx \frac{\Theta_{12} - \Theta_{17}}{\Delta x}. \quad (2.2)$$

Точность последнего равенства возрастает с уменьшением Δx .

Аналогично градиент температуры в направлении точки 17' можно написать в виде:

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x-(\Delta x/2), y} \approx \frac{\Theta_{12} - \Theta_{22}}{\Delta x}. \quad (2.3)$$

Теперь можно определить вторую производную в направлении оси x для точки 17'':

$$\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}\right) \approx \frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x+(\Delta x/2), y} - \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x-(\Delta x/2), y} \right] = \frac{1}{\Delta x^2} (\Theta_{12} + \Theta_{22} - 2\Theta_{17}). \quad (2.4)$$

Также можно определить вторую производную в направлении оси y для точки 17:

$$\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}\right) \approx \frac{1}{\Delta y^2} (\Theta_{16} + \Theta_{18} - 2\Theta_{17}). \quad (2.5)$$

Подставим значения вторых производных из (2.4) и (2.5) в (2.1) и при условии $\Delta x = \Delta y$:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \approx \frac{1}{\Delta x^2} (\Theta_{12} + \Theta_{22} + \Theta_{16} + \Theta_{18} - 4\Theta_{17}) = 0$$

или $\Theta_{12} + \Theta_{22} + \Theta_{16} + \Theta_{18} = 4\Theta_{17}$. (2.6)

Из уравнения (2.6) следует, что температура в любом узле плоской сетки есть среднее арифметическое температур в соседних четырёх узлах сетки.

Данный метод также можно применить для трёхмерного температурного поля [45].

Рассмотрим применение данного метода для расчёта и построения графиков температурных полей обогреваемой спецодежды водолазов.

2.1. Расчёт и построение контурных температурных графиков для водообогреваемой спецодежды водолазов

В работе так же, как и ранее [11, 42] рассматривается двумерная задача теплопередачи с поверхности тела человека и нагревательного элемента через многослойный пакет одежды в окружающую среду. Считаем, что пакет системы (рисунок 2.2) состоит из четырёх слоёв: 1 – прорезиненного материала гидрокомбинезона; 2 – утеплителя (АТИМ); 3 – нагревательного элемента; 4 – нательного белья; 5 – нетермостатированного участка человеческого тела толщиной 4 мм.

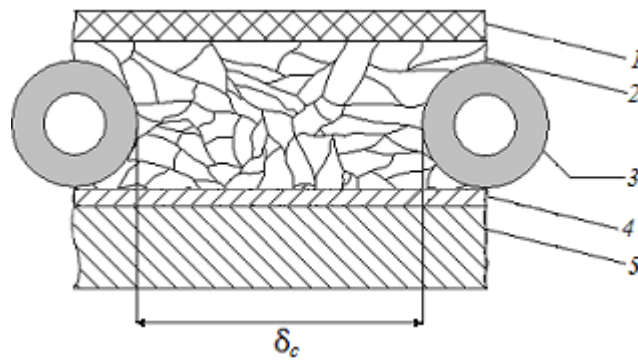


Рисунок 2.2 – Пакет системы

δ_c – расстояние между трубками нагревательного элемента

Нагревательные элементы выполнены в виде полимерных трубок (рисунок 2.3), чтобы изменить направление поступления теплоносителя (горячей воды) в подкомбинезонное пространство, их сгибают. Слишком малый диаметр сгиба трубки приводит к её пережиму. Поэтому после выбора оптимального диаметра сгиба трубки образуется петля, а это, в свою очередь, означает, что расстояние между точками нагревания непостоянно.

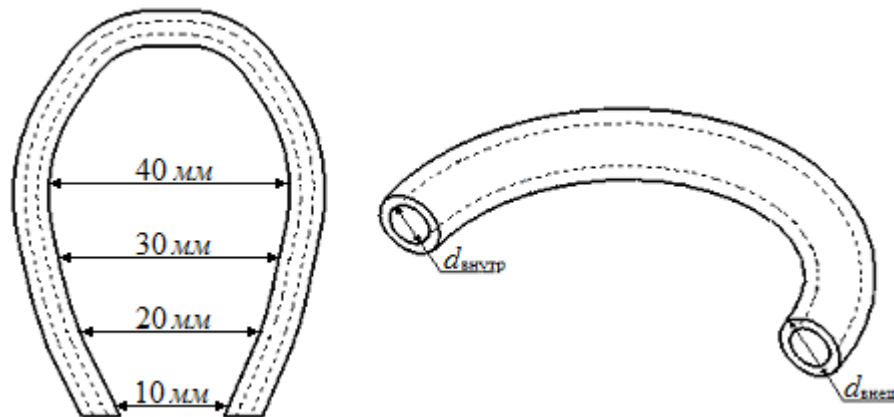


Рисунок 2.3 – Нагревательный элемент из полимерной трубки

$d_{\text{внутр}}$, $d_{\text{внеш}}$ – внутренний и внешний диаметры трубок, мм

Максимальное и минимальное расстояние между трубками нагревательного элемента равно 40 и 10 мм.

Как уже говорилось ранее, решается задача с помощью метода «сеток», при этом температура в любом узле плоской сетки (рисунок 2.4) определяется как среднеарифметическое температур в соседних четырёх узлах сетки (для двумерного поля) или в шести узлах сетки (для трёхмерного поля) [45].

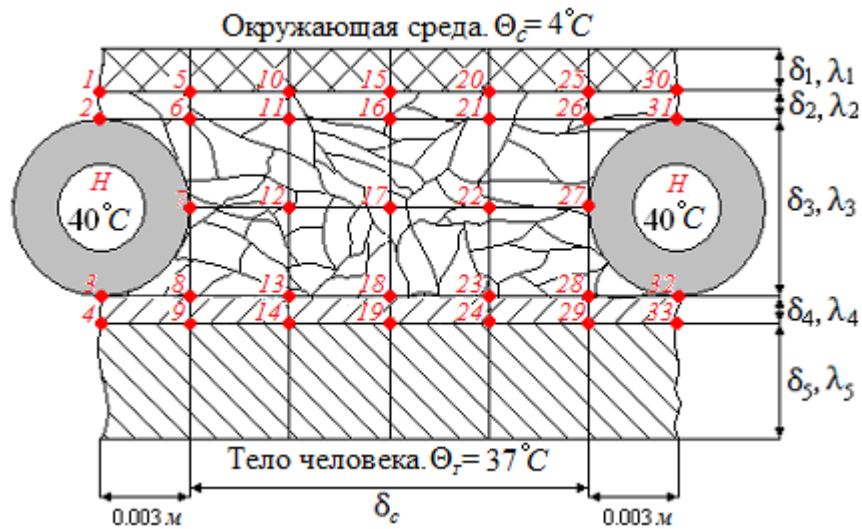


Рисунок 2.4 – Пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» с нанесённой сеткой

1 – 33 – номера точек плоской сетки; H – точки нагрева; Θ_c – температура окружающей среды, °C; Θ_T – температура внутренних участков тела человека, °C; $\delta_{(1-5)}$ – толщины слоёв пакета одежды, м; $\lambda_{(1-5)}$ – теплопроводность слоёв пакета одежды, Вт/(м·°C)

Во втором слое спецодежды выделяют две части δ_2, δ_3 . Связано это с тем, что линейные размеры слоя соизмеримы с размерами нагревательных элементов. Поэтому теплофизические и геометрические параметры трубопроводов следует учитывать при расчёте температурного поля [11]. Нагревательные элементы выполнены из трубок с диаметрами $d_{\text{внутр}} = 3$ мм и $d_{\text{внешн}} = 6$ мм, полимерный материал, из которого сделаны данные нагревательные элементы, обладает теплопроводностью $\lambda_{\text{нагр}} = 0.14$ Вт/(м·°C).

Исходя из этого, можно составить систему уравнений для всех узлов сетки. При составлении уравнений необходимо учитывать теплопроводность и толщину слоёв спецодежды:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda_1}{\delta_1} \Theta_c + \frac{2\lambda_1}{0.003} \Theta_5 + \frac{\lambda_2}{\delta_2} \Theta_2 = \left(\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{2\lambda_1}{0.003} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} \right) \Theta_1; \\ \frac{\lambda_2}{\delta_2} \Theta_1 + \frac{2\lambda_2}{0.003} \Theta_6 + \frac{\lambda_{нагр}}{\delta_{нагр}} \Theta_n = \left(\frac{\lambda_2}{\delta_2} + \frac{2\lambda_2}{0.003} + \frac{\lambda_{нагр}}{\delta_{нагр}} \right) \Theta_2; \\ \dots \\ \frac{\lambda_4}{\delta_4} \Theta_{18} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} \Theta_{14} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} \Theta_{24} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \Theta_T = \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \right) \Theta_{19}; \\ \dots \\ \frac{\lambda_4}{\delta_4} \Theta_{32} + \frac{2\lambda_5}{0.003} \Theta_{29} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \Theta_T = \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \frac{2\lambda_5}{0.003} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \right) \Theta_{33}. \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Пример решения данной системы с помощью программного обеспечения на ЭВМ представлен в приложении 1.

Значения температуры в узлах сетки в соответствии с рисунком 2.4, полученные из решения системы (2.7) при расстоянии между нагревателями 10 мм для воздушной среды, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда»

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	9.9	12	30.8	23	36
2	30.4	13	36	24	36.7
3	38.8	14	36.7	25	8.2
4	37.3	15	6.9	26	18.8
5	8.2	16	13.8	27	37
6	18.8	17	29	28	37.1
7	37	18	35.6	29	37
8	37.1	19	36.6	30	9.9
9	37	20	7.2	31	30.4
10	7.2	21	14.9	32	38.8
11	14.9	22	30.8	33	37.3

По значениям из таблицы 2.1 построен график температурного поля в трёхмерных координатах (рисунок 2.5):

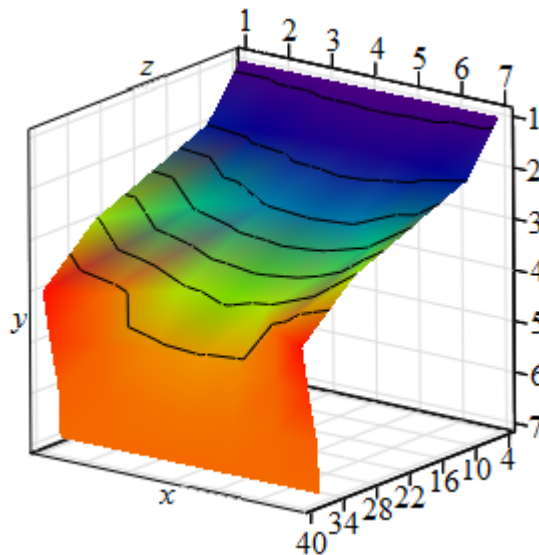


Рисунок 2.5 – График температурного поля в трёхмерных координатах

По оси x откладывается расстояние между нагревателями, по оси y – расстояние между слоями пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» (где 1 – среда, а 7 – тело человека), по оси z показана температура.

На рисунке 2.6 показаны контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 10 мм для воздушной и гелиевой среды.

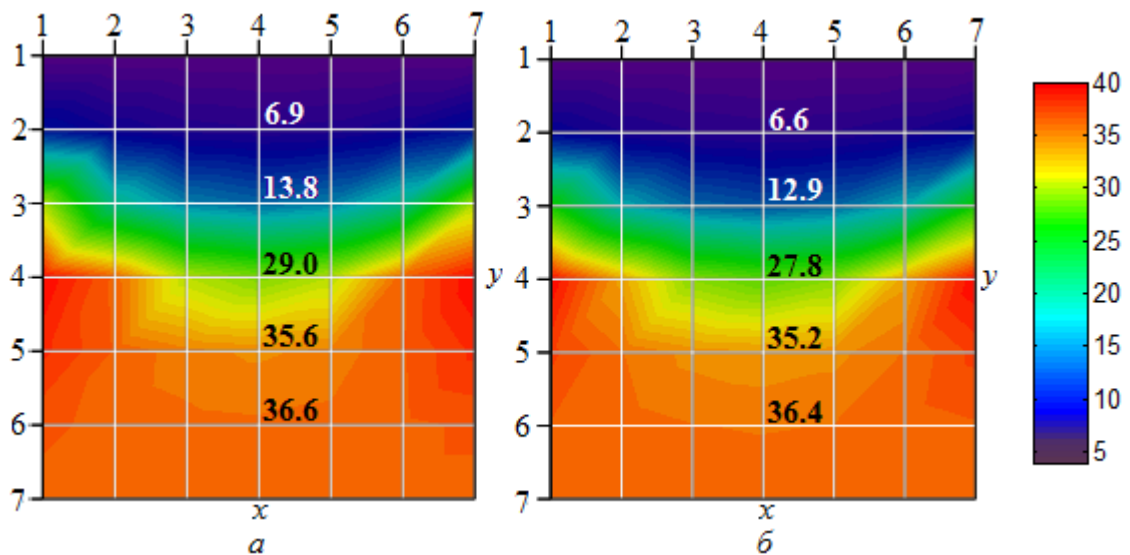


Рисунок 2.6 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 10 мм для воздушной (а) и гелиевой (б) сред

При построении контурных графиков температурных полей для наглядности используется цветовая карта. Для всех графиков минимальное значение

температуры в спецодежде обозначается фиолетовым или тёмно-синим цветом, максимальное значение температуры обозначается красным цветом. На двумерных графиках также указаны значения температуры в центральных точках пакета системы.

Из анализа графиков температурных полей на рисунках 2.5 и 2.6 следует, что перепад температур на поверхности тела человека соответствует условиям теплового комфорта.

На рисунке 2.7 показаны графики температурных полей для воздушной и гелиевой сред, при расстоянии между нагревателями 40 мм.

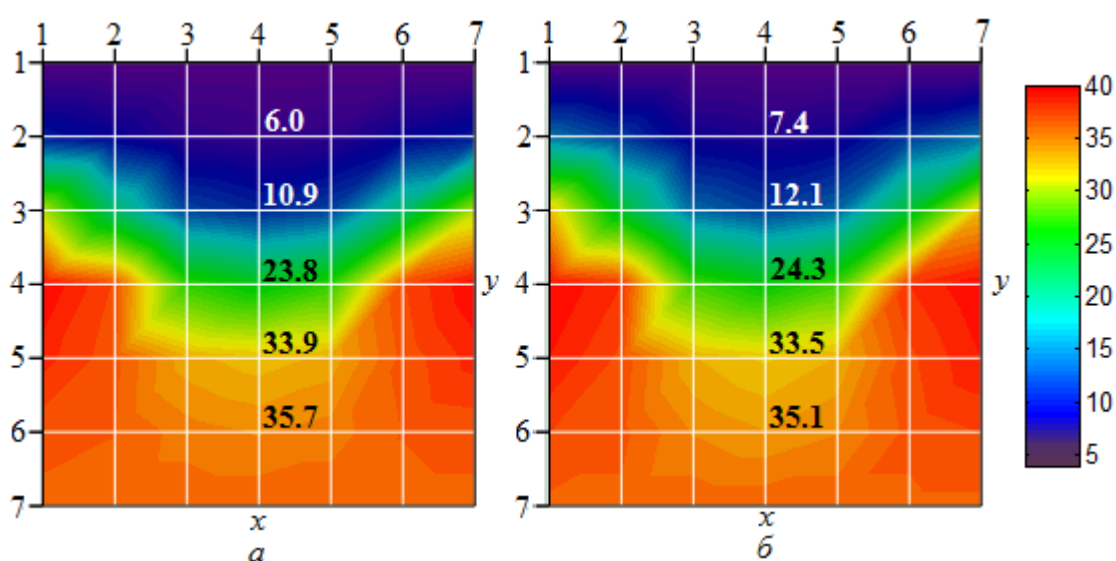


Рисунок 2.7 – Контурные графики температурного поля в двумерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 40 мм для воздушной (а) и гелиевой (б) сред

Из сопоставления температурных полей на рисунках 2.6 и 2.7 следует, что перепад температур на поверхности тела человека возрос, температура в слоях одежды распределяется не равномернее, чем показано на рисунке 2.6. Однако тепловые условия для нормальной жизнедеятельности водолаза, при использовании воздушной и гелиевой дыхательных смесей, находятся в пределах нормы [11].

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что данные нагревательные элементы обеспечивают условия теплового комфорта, при которых возможна нормальная жизнедеятельность водолаза под водой [11].

Рассмотрим другой тип нагревательного элемента. Этот нагревательный элемент (рисунок 2.8) выполнен в виде резиновой пластины с каналами для прохождения по ним теплоносителя.

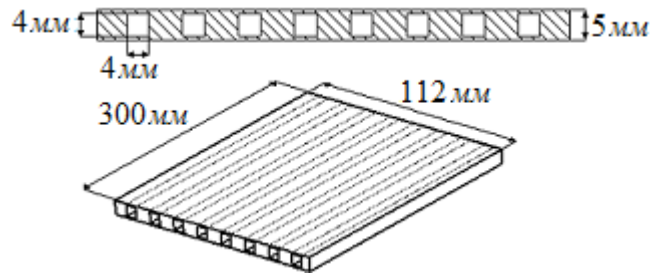


Рисунок 2.8 – Резиновый нагревательный элемент

Считаем, что пакет системы (рисунок 2.9) состоит из пяти слоёв: 1 – прорезиненного материала – гидрокомбинезона; 2 – утеплителя (АТИМ); 3 – нагревательного элемента; 4 – нательного белья; 5 – нетермостатированного участка человеческого тела толщиной 4 мм.

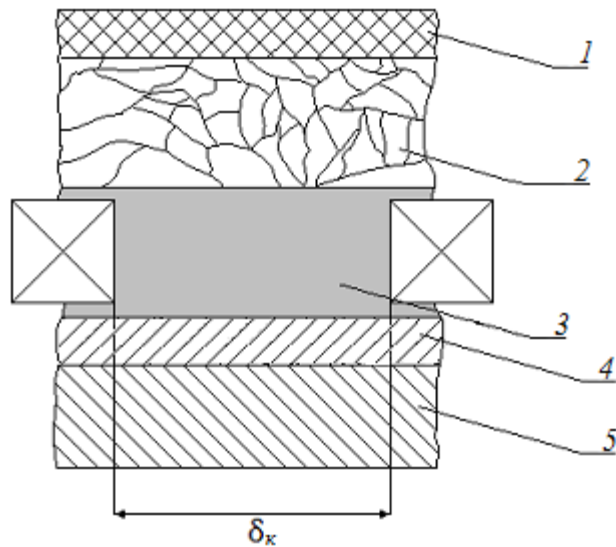


Рисунок 2.9 – Пакет системы

δ_k – расстояние между каналами нагревательного элемента

Как видно из рисунка 2.9, в данном случае нагревательный элемент выполняет роль дополнительного слоя пакета системы. Расстояние между каналами нагревателя, по которым поступает теплоноситель $\delta_k = 10$ мм.

Далее разбиваем данный пакет системы на области (рисунок 2.10) для получения сетки и производим необходимые расчёты для нахождения значений температуры в указанных точках:

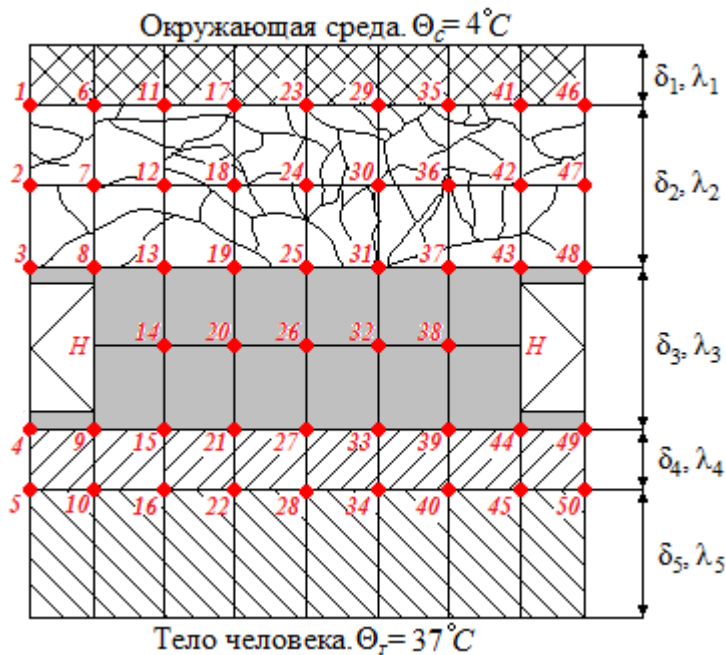


Рисунок 2.10 – Пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» с нанесённой сеткой:

1 – 50 – номера точек плоской сетки; H – точки нагревания; δ_{1-5} – толщина слоёв пакета одежды, m ; λ_{1-5} – теплопроводность слоёв пакета одежды, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; Θ_c – температура окружающей среды, $^\circ C$; Θ_T – температура внутренних участков тела человека, $^\circ C$; Θ_n – температура теплоносителя, $^\circ C$.

Составим систему уравнений (2.8) для всех точек, показанных на рисунке 2.10:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda_1}{\delta_1} \Theta_c + \frac{2\lambda_1}{0.002} \Theta_6 + \frac{\lambda_2}{\left(\frac{\delta_2}{2}\right)} \Theta_2 = \left(\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{2\lambda_1}{\delta_c} + \frac{\lambda_2}{\left(\frac{\delta_2}{2}\right)} \right) \Theta_1; \\ \dots \\ \frac{\lambda_4}{\delta_4} \Theta_{49} + \frac{2\lambda_5}{0.002} \Theta_{45} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \Theta_T = \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \frac{2\lambda_5}{0.002} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \right) \Theta_{50}. \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Решением системы уравнений (2.8) являются значения температуры во всех узлах сетки, показанной на рисунке 2.10. Решалась система для двух случаев: заполнение подкомбинезонного пространства гелиевой или воздушной смесью.

По данным значениям строятся контурные температурные графики (рисунок 2.11):

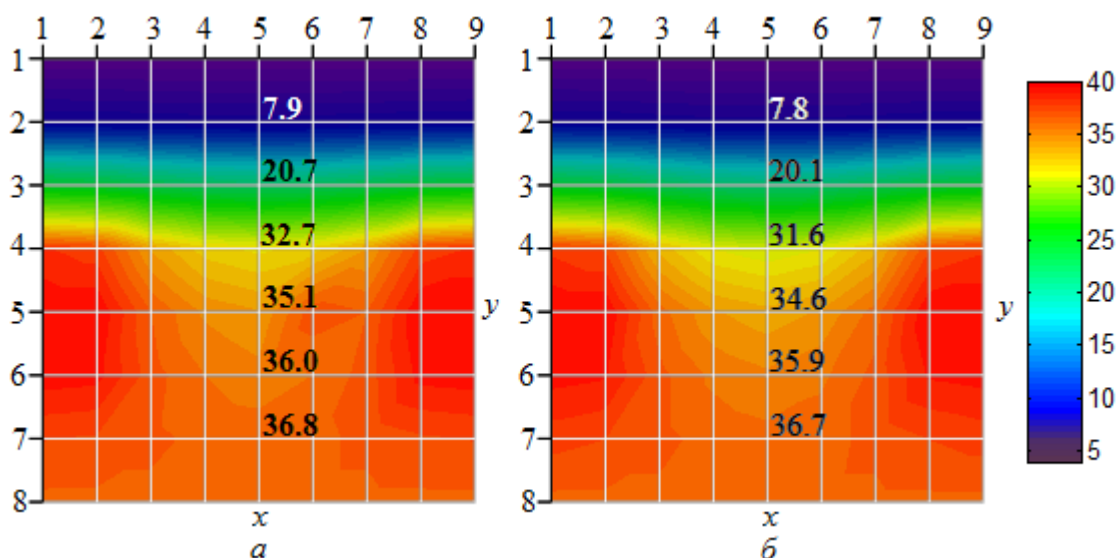


Рисунок 2.11 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах для воздушной (а) и гелиевой (б) сред при использовании резинового нагревательного элемента

Анализируя графики на рисунке 2.11, можно заметить, что перепад температур между крайней и средней точками на поверхности тела человека при использовании резинового нагревательного элемента в виде пластины фактически отсутствует. Температурный перепад в слоях спецодежды также незначителен. Связано это с дополнительным слоем в пакете одежды (резиновым нагревательным элементом) и его теплопроводностью.

При разработке новых образцов специальной одежды необходимо учитывать фактор увеличения влаги в подкомбинезонном пространстве, так как повышение влажности влияет на теплоотдачу с поверхности тела человека. Графики распределения температуры в условиях повышения влажности в слоях одежды при использовании трубчатого нагревательного элемента приведены на рисунке 2.12.

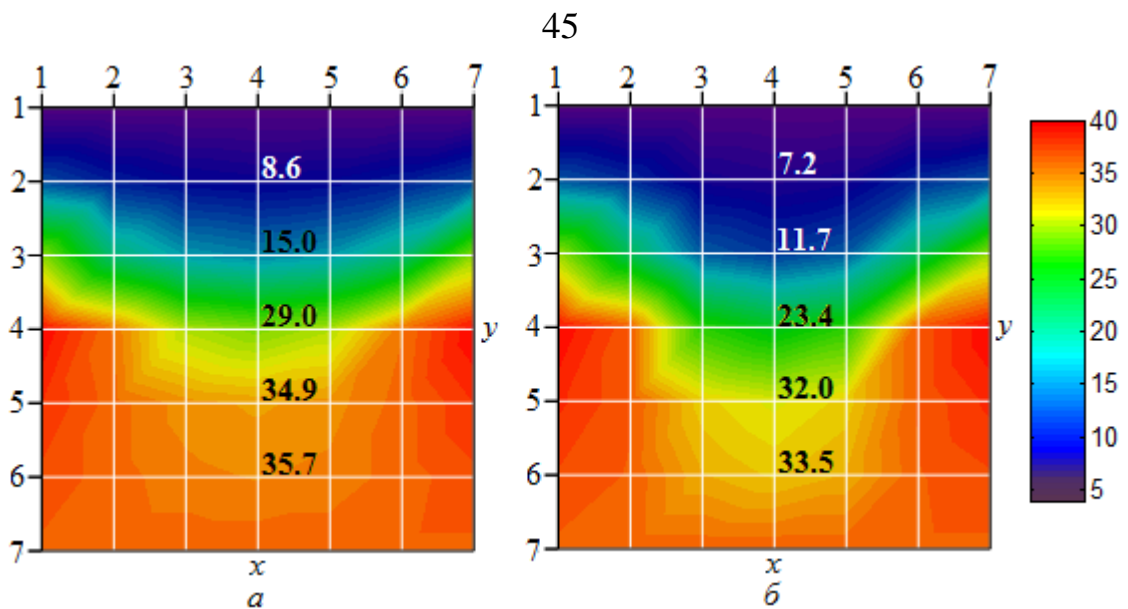


Рисунок 2.12 – Контурные графики температурного поля для нагревательного элемента в виде трубок. При расстоянии 10 мм (а) и 40 мм (б) между трубками

При увеличении влажности увеличилась и теплоотдача с поверхности тела человека в окружающую среду. Максимальный перепад температур достигает 4°C. Однако значение температуры на поверхности тела человека находится в пределах нормы [11].

График температурного поля для резинового нагревательного элемента в условиях повышения влажности показан на рисунке 2.13.

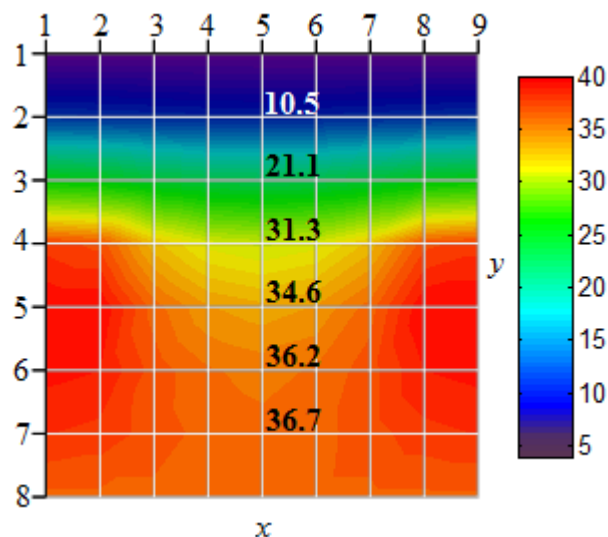


Рисунок 2.13 – Контурный график температурного поля для резинового нагревательного элемента с условием повышения влажности

Резиновый нагревательный элемент сводит к нулю влияние влажности на распределение температуры за счёт дополнительного слоя и как видно из рисунка 2.13 влияние влажности не оказывает воздействия на распределение температуры в слоях одежды с данным нагревательным элементом.

Стоит отметить, что при водяном обогреве использоваться могут оба представленных типа элементов.

Трубки с водой нашли широкое применение в различных водообогреваемых гидрокостюмах [с. 24-31]. Этот элемент более дешёвый, по сравнению с резиновым нагревателем, и как показали расчёты, может обеспечить необходимые тепловые условия для жизнедеятельности водолазов.

Производство резинового элемента более затратное, но данный нагревательный элемент может использоваться при создании гидрокомбинезона, рассчитанного на использование в экстремальных условиях, так как он обеспечивает равномерный обогрев и защиту человека при самых неблагоприятных условиях внешней среды.

Исследование методики проведения расчётов по построению температурных полей, выполнялась для условий обеспечения теплового комфорта водолаза в районе груди и поясницы. В работе [11] представлена таблица диапазонов температур на поверхности тела человека в условиях теплового комфорта для различных частей тела. Стоит отметить, что анализ температурных полей показывает возможность снижения температуры теплоносителя для всех рассматриваемых случаев на $\sim 2^{\circ}\text{C}$.

2.1.1. Исследование вспененного полиэтилена

АТИМ – материал, который давно зарекомендовал себя в качестве утеплителя для водолазного спецснаряжения. Однако за последние годы появилось множество различных образцов утеплителей, которые могут быть выбраны в качестве одного из слоёв спецодежды. Например, за рубежом широко используется утеплитель типа Thinsulate [34, 64].

В данной работе рассматривается возможность использования в качестве утеплителя вспененного полиэтилена.

Материалы, используемые при изготовлении специальной одежды должны обладать следующими показателями: прочность, износостойкость, формоустойчивость, удобство пользования, газопроницаемость [26].

Вспененный полиэтилен – пористый материал, изготовленный на основе полиэтилена с хорошей паро-, тепло- и гидроизоляцией. Преимуществами данного материала как раз и являются: упругость и эластичность при широком диапазоне рабочих температур, износостойкость и низкая чувствительность к деформации (высокие амортизирующие свойства, устойчивость к ударным нагрузкам), химическая и биологическая стойкость, гидрофобность, низкое водопоглощение, экологичность и относительно низкая стоимость.

Вспененный полиэтилен обладает низким коэффициентом теплопроводности (не более $0.034 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$), препятствует образованию конденсата [58].

Ниже приведены графики температурных полей для двух типов нагревательных элементов с использованием в качестве утеплителя вспененного полиэтилена.

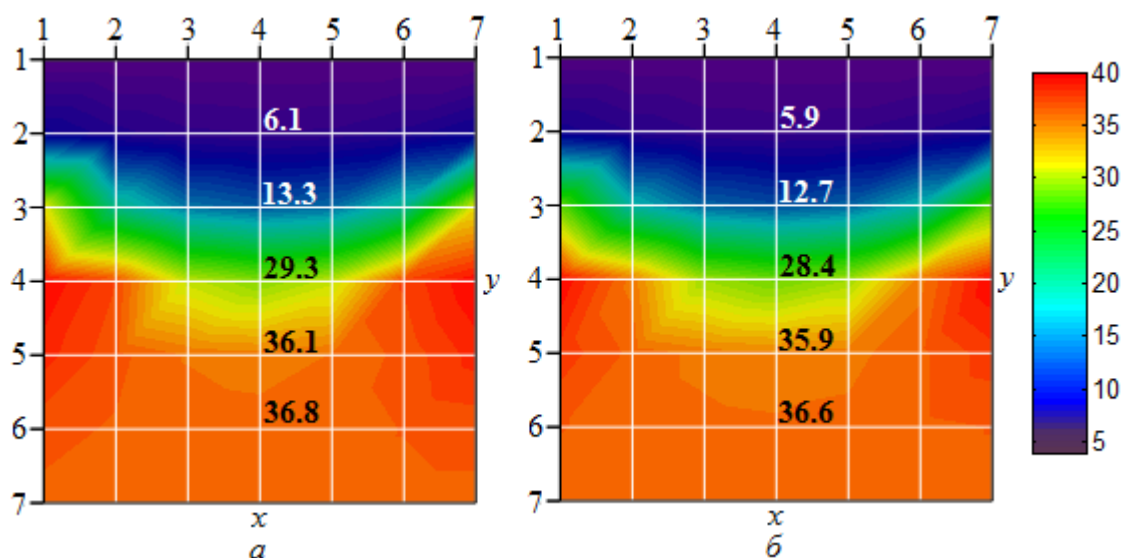


Рисунок 2.14 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 10 мм при использовании вспененного полиэтилена для воздушной (а) и гелиевой (б) сред

Для корректности сравнения утеплителя АТИМ и вспененного полиэтилена расчёты проводились для тех же условий, что и в предыдущих случаях: Θ_c – температура среды 4°C , Θ_n – температура теплоносителя 40°C , Θ_m – температура ядра человеческого тела 37°C .

Анализируя графики на рисунках 2.6 и 2.14 можно сделать вывод, что при использовании в качестве утеплителя вспененного полиэтилена, температура в средней точке между нагревателями фактически не отличается от случая, когда используется утеплитель АТИМ.

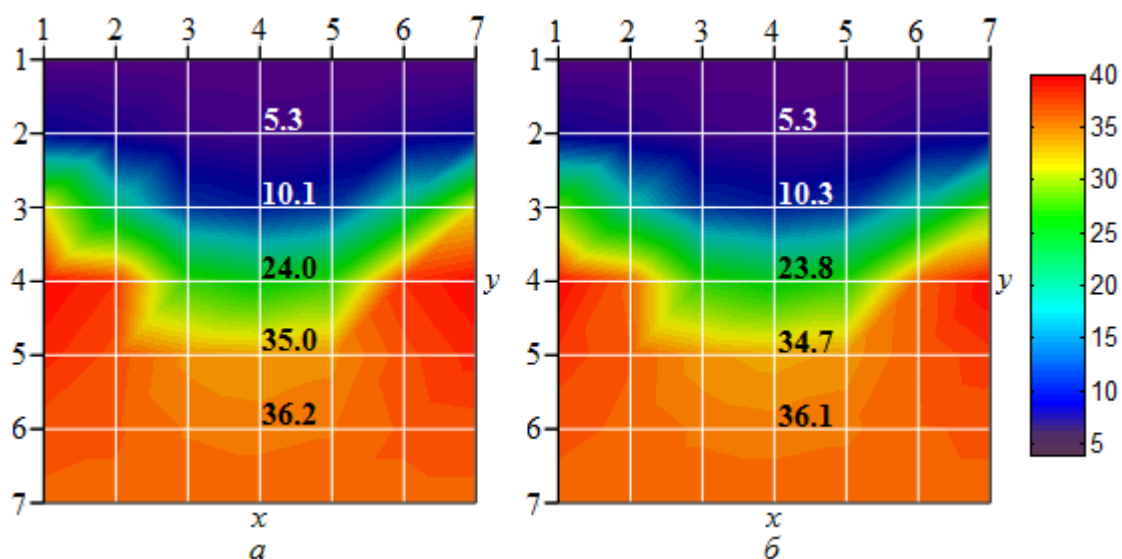


Рисунок 2.15 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 40 мм при использовании вспененного полиэтилена для воздушной (а) и гелиевой (б) сред

При увеличении расстояния между трубками нагревательного элемента, температура в средней точке в слоях водолазного снаряжения в случае, когда в качестве второго слоя пакета системы выступает вспененный полиэтилен (рисунок 2.15) выше примерно на 1°C , чем в случае с применением АТИМ (рисунок 2.7).

0.5°C составляет разница между полученными значениями температуры для расчётов резинового нагревательного элемента с использованием вспененного полиэтилена (рисунок 2.16) и АТИМ (рисунок 2.11).

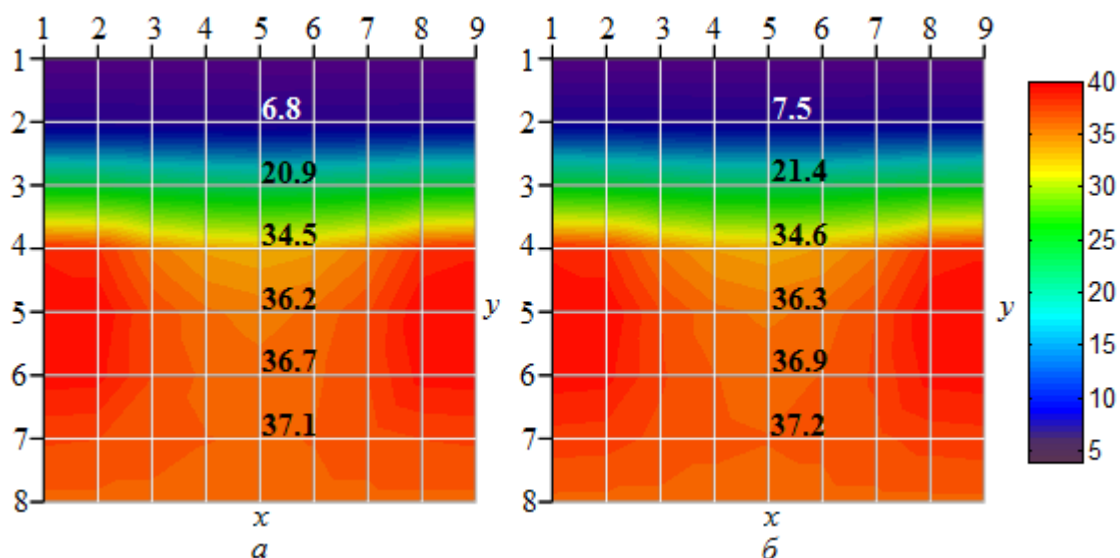


Рисунок 2.16 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при использовании вспененного полиэтилена для воздушной (а) и гелиевой (б) сред с использованием резинового нагревательного элемента

В результате анализа графиков на рисунках 2.14-2.16 можно сделать вывод о целесообразности использования вспененного полиэтилена в качестве утеплителя водолазного снаряжения: данный материал обеспечивает необходимую теплозащиту для рассматриваемых условий, и с учетом его преимуществ, является подходящим материалом для использования в обогреваемой спецодежде.

Также анализ температурных полей позволяет сделать вывод о том, что для рассматриваемых условий температуру теплоносителя нужно уменьшить на 2-3°C для обеспечения необходимых условий теплового комфорта водолаза.

2.2. Исследование электрического нагревательного элемента

В работах [11, 42] проводились исследования электрического нагревательного элемента, выполненного в виде тонких проволочных проводников. Данная глава является продолжением указанных работ и в ней рассматривается дополнительный слой пакета системы при расчётах и построении температурных полей – слой нательного белья. А также нагревательный элемент рассматривается выполненным в виде прорезиненного материала, в толще которого и проложены тонкие проволочные проводники

(рисунок 2.17). Стоит отметить, что данный элемент имеет определённое сходство с резиновым водонагревательным элементом.

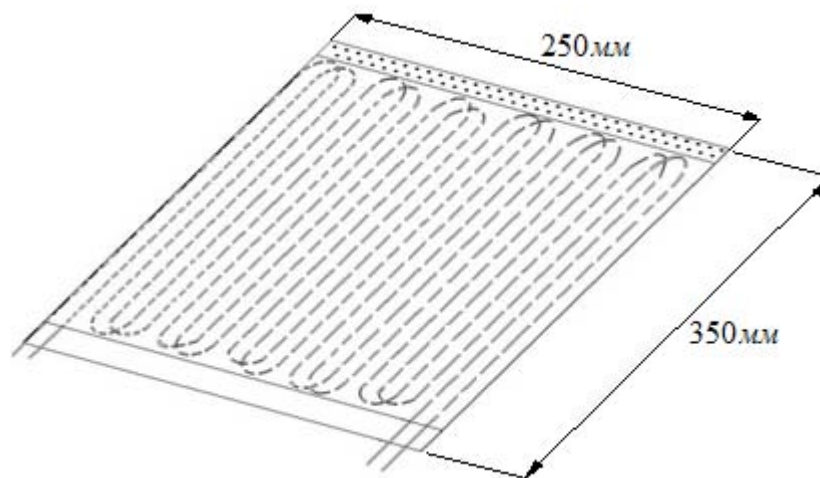


Рисунок 2.17 – Проволочный нагревательный элемент

Расчёт температурных полей для электрического нагревательного элемента имеет определённую особенность: проводники, используемые в качестве нагревательного элемента, необходимо рассматривать как безразмерную точку ввиду их малого размера [11].

На рисунке 2.18 показана система «человек-одежда-окружающая среда» при использовании электрического нагревательного элемента и его расположении, как и в предыдущих случаях, на поверхности слоя из нательного белья.

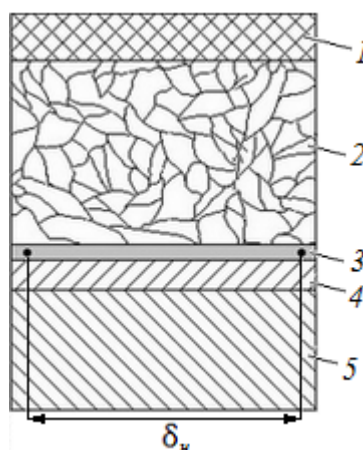


Рисунок 2.18 – Система «человек-одежда-окружающая среда» при использовании электрического нагревательного элемента

Пакет одежды состоит из таких же слоёв, как и в случае с водообогревом: 1 – прорезиненного материала – гидрокомбинезона; 2 – утеплителя (вспененный

полиэтилен); 3 – нагревательного элемента; 4 – нательного белья; 5 – нетермостатированного участка человеческого тела толщиной 4 мм. Расстояние между точками нагрева постоянно и равно $\delta_n = 10$ мм.

На рисунке 2.19 представлен пакет одежды при использовании электрического нагревательного элемента и с нанесённой сеткой.

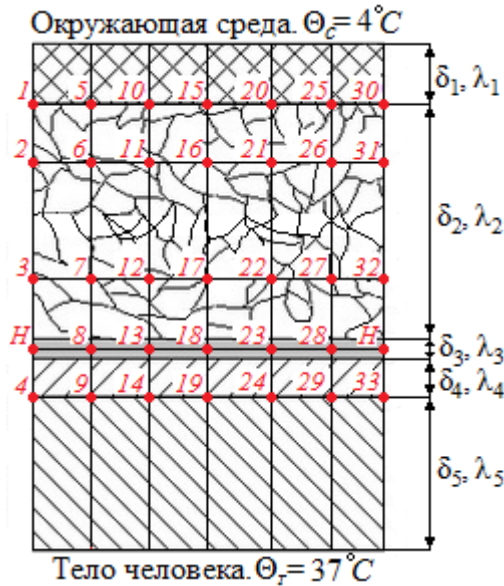


Рисунок 2.19 – Пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» с нанесённой сеткой и при использовании электрического элемента

Для расчётов температура нагревательных элементов бралась равной 38°C .

После составления и решения системы уравнений, были получены значения температуры для воздушной и гелиевой сред, представленные в таблице 2.2 и таблице 2.3 соответственно.

Таблица 2.2 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» с электрическим нагревательным элементом, среда - воздух

Номер точки	Температура, $^\circ\text{C}$	Номер точки	Температура, $^\circ\text{C}$	Номер точки	Температура, $^\circ\text{C}$
1	7.1	5	7.0	9	35.5
2	16.6	6	16.3	10	7.0
3	37.0	7	34.6	11	16.0
4	37.6	8	35.2	12	33.5

Продолжение таблицы 2.2

Номер точки	Температура, °С	Номер точки	Температура, °С	Номер точки	Температура, °С
13	34.1	20	7.0	27	34.6
14	34.5	21	16.0	28	35.2
15	7.0	22	33.5	29	35.5
16	15.8	23	34.1	30	7.1
17	33.2	24	34.5	31	16.6
18	33.7	25	7.0	32	37.0
19	34.3	26	16.3	33	37.6

Таблица 2.3 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» с электрическим нагревательным элементом, среда - гелий

Номер точки	Температура, °С	Номер точки	Температура, °С	Номер точки	Температура, °С
1	7	12	32.4	23	33.3
2	16.2	13	33.3	24	34.3
3	36.1	14	34.3	25	7
4	37.2	15	6.8	26	15.8
5	7	16	15.4	27	33.5
6	15.8	17	32.1	28	34.5
7	33.5	18	33.0	29	35.3
8	34.5	19	34.1	30	7
9	35.3	20	6.8	31	16.2
10	6.8	21	15.5	32	36.1
11	15.5	22	32.4	33	37.2

Графики температурных полей, построенные по результатам из таблиц 2.2 и 2.3, приведены на рисунке 2.20.

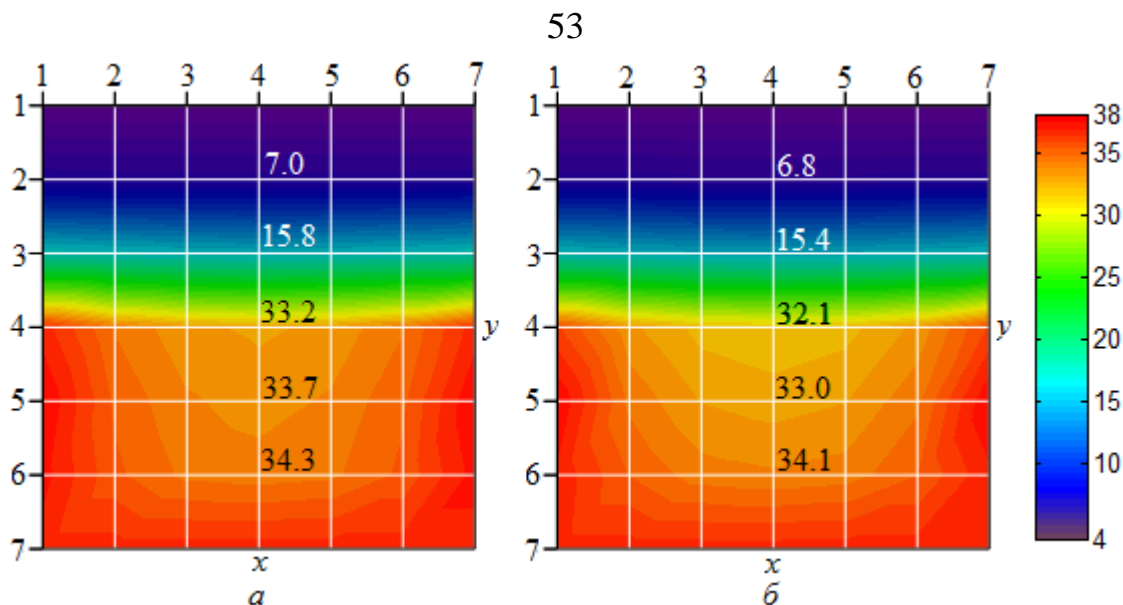


Рисунок 2.20 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при использовании электрического нагревательного элемента для воздушной (а) и гелиевой (б) сред

Анализ полученных результатов показывает, что перепад температур между крайней и средней точками составляет порядка 3°C , температура в средней точке на поверхности тела человека находится в норме. В итоге, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемого случая условия теплового комфорта водолаза обеспечиваются [11].

В случае, если наблюдается высокая температура тела в точках, непосредственно располагающихся под точками нагревания, и человек ощущает дискомфорт, можно снизить температуру нагревательных элементов на $1-2^{\circ}\text{C}$ или разместить нагревательный элемент не на слое нательного белья, а в толще утеплителя, как это рассматривалось в работах [11, 42].

Рассмотрим случай размещения рассматриваемого электрического нагревательного элемента в толще утеплителя из вспененного полиэтилена, без увеличения толщины данного слоя одежды. Также будем учитывать слой нательного водолазного белья.

Расположим нагревательный элемент в 2.5 мм от поверхности человеческого тела, где 1 мм – это толщина нательного белья, а 1.5 мм – это толщина утеплителя, расположенного под нагревательным элементом. Пакет системы для данного случая показан на рисунке 2.21.

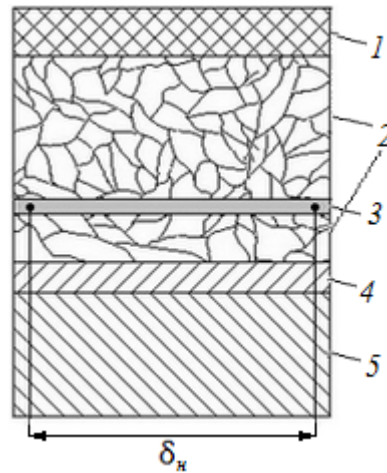


Рисунок 2.21 – Система «человек-одежда-окружающая среда» при использовании электрического нагревательного элемента в толще утеплителя

1 – прорезиненный материал – гидрокомбинезон; 2 – утеплитель из вспененного полиэтилена; 3 – нагревательный элемент; 4 – нательное бельё; 5 – нетермостатированный участок человеческого тела. Расстояние между точками нагрева $\delta_n = 10$ мм.

Система с нанесённой сеткой будет выглядеть следующим образом (рисунок 2.22):

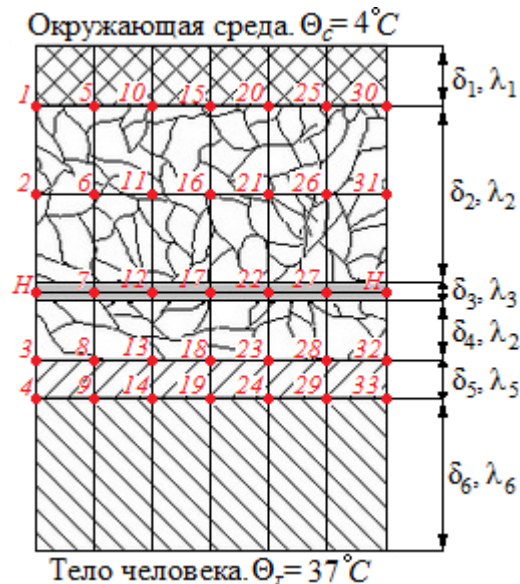


Рисунок 2.22 – Система «человек-одежда-окружающая среда» с нанесённой сеткой при использовании электрического нагревательного элемента в толще утеплителя

В итоге решения системы для данного случая, были получены значения температуры в точках системы для воздушной и гелиевой сред, которые представлены в таблицах 2.4 и 2.5 соответственно.

Таблица 2.4 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда». Среда – воздух

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	9.3	12	30.0	23	30.5
2	36.2	13	30.5	24	34.2
3	37.3	14	34.2	25	9.0
4	36.4	15	8.6	26	31.5
5	9.0	16	28.4	27	32.4
6	31.5	17	29.2	28	32.8
7	32.4	18	29.8	29	35.2
8	32.8	19	34.0	30	9.3
9	35.2	20	8.7	31	36.2
10	8.7	21	29.1	32	37.3
11	29.1	22	30.0	33	36.4

Таблица 2.5 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда». Среда – гелий

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	9.0	12	28.7	23	29.9
2	34.5	13	29.9	24	33.9
3	36.7	14	33.9	25	8.6
4	36.2	15	8.2	26	29.6
5	8.6	16	26.5	27	31.2
6	29.6	17	28.0	28	32.1
7	31.2	18	29.2	29	34.9
8	32.1	19	33.6	30	9.0
9	34.9	20	8.3	31	34.5
10	8.3	21	27.2	32	36.7
11	27.2	22	28.7	33	36.2

Анализ таблиц 2.4 и 2.5 показывает, что перепад температур между крайней и средней точками теперь составляет $\sim 2.6^{\circ}\text{C}$. Температура на поверхности тела человека в средней точке находится в пределах допустимых значений, то есть условия теплового комфорта для водолаза обеспечиваются.

На рисунке 2.23 приведены графики температурных полей, построенные по значениям из таблиц 2.4 и 2.5.

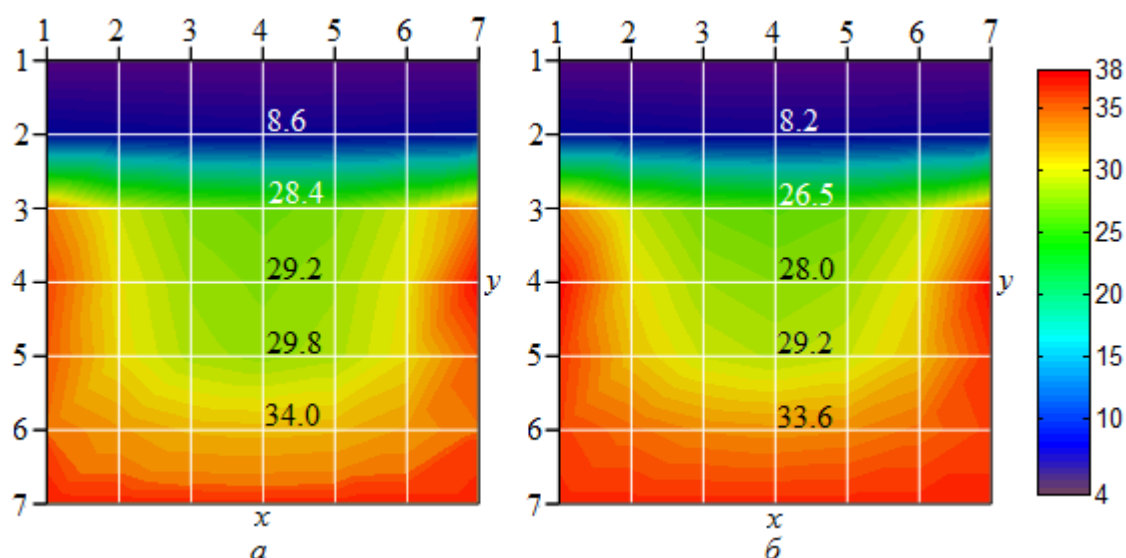


Рисунок 2.23 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при использовании электрического нагревательного элемента в толще утеплителя для воздушной (а) и гелиевой (б) сред.

Анализ графиков на рисунке 2.23 показывает, что при расположении нагревательного элемента в толще утеплителя уменьшается КПД обогрева. Увеличилась средняя температура во втором слое пакета системы, распределение температуры носит неравномерный характер, но температура на поверхности человеческого тела находится в пределах допустимых значений и условия теплового комфорта обеспечиваются.

Однако можно сделать вывод о том, что в случае наблюдения перегрева водолаза в отдельных точках, целесообразнее снижать температуру нагревательных элементов, что не приведёт к потере КПД обогрева.

Сравнивая результаты, полученные для нагревательных элементов, использующих в качестве теплоносителя горячую воду, и для электрического нагревательного элемента, можно сказать, что электрический нагревательный

элемент обеспечивает распределение температуры в слоях спецодежды также равномерно, как и резиновый водонагревательный элемент. Значения температуры на поверхности человеческого тела, при одинаковых начальных условиях для данных нагревательных элементов, отличаются примерно на 2°C , связано это с тем, что проводник в электрическом нагревательном элементе рассматривается как безразмерная точка, при рассмотрении же резинового водонагревательного элемента необходимо учитывать геометрические размеры каналов, по которым поступает теплоноситель.

Однако лабораторный анализ работы электрического нагревательного элемента в составе АСР температуры обогреваемой одежды позволяет получить общую картину обогрева для всех рассматриваемых нагревательных элементов, при учёте отличий между водообогреваемыми и электрическими элементами (которые можно получить с помощью построения графиков температурных полей).

Также можно сделать вывод о том, что для получения объективной картины обогрева тела водолаза и предотвращения перегрева человека в отдельных точках, актуальной является задача по созданию нескольких компактных регуляторов. Задача данных регуляторов состоит в контроле температуры в различных секциях водолазного снаряжения.

2.3. Расчёт мощности нагревательных элементов

Расчёт температурных полей позволяет произвести вычисления для определения необходимой мощности нагревательных элементов. В данном разделе рассмотрим пример расчёта необходимой мощности трубчатых нагревательных элементов.

Расчёты производятся по тому же принципу, что и в ранее представленных работах [11, 42], однако, в данном разделе приводятся графики, с учётом двух изменений:

– Расчёты приводятся для случая использования вспененного полиэтилена в качестве слоя утеплителя. Для проведения сравнительного анализа, также приводятся графики необходимой мощности для случая использования утеплителя АТИМ в качестве одного из слоёв обогреваемой спецодежды.

– Расположение нагревательных элементов на поверхности слоя нательного водолазного белья оказывает определённое влияние на потребляемую ими мощность для обогрева в силу изменения распределения температуры в слоях спецодежды.

Проведём необходимые расчёты и построение графиков.

Тепловая мощность Q , Вт, выделяемая телом человека, определяется по формуле (2.9):

$$Q = qF \quad (2.9)$$

где, q – удельный тепловой поток с поверхности теплообмена, Вт/м²;

F – площадь поверхности теплообмена, м².

Активная нагревающая поверхность обогреваемой одежды среднего размера составляет 1.07 м².

Ввиду неравномерного распределения температуры в слое, где размещается сеть нагревательных источников Θ_n в расчётах используется среднее значение Θ_n .

$$\Theta_n = \frac{1}{L} \int_L \Theta dL, \quad (2.10)$$

где L – интервал между двумя соседними нагревательными источниками.

Значение функции температуры в ряде точек на интервале L были найдены ранее (см. рисунки 2.5-2.6, табл. 2.1).

Для приближённого расчёта интеграла используют формулу Симпсона (2.11):

$$\int_L \Theta dL \approx \frac{s}{3} (\Theta_n + 4\Theta_7 + 2\Theta_{12} + 4\Theta_{17} + 2\Theta_{22} + 4\Theta_{27} + \Theta_n); \quad (2.11)$$

где s – шаг сетки; Θ_i – температура в указанных точках слоя.

Определив Θ_n можно рассчитать удельный тепловой поток от нагревательных элементов в окружающую среду (2.12):

$$q = \frac{\Delta\Theta}{\sum_{i=1}^n R} = \frac{\Theta_{ncp} - \Theta}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (2.12)$$

где Θ_{cp} – температура окружающей среды, °C; R – общее термическое сопротивление слоёв одежды, $(m^2 \cdot ^\circ C)/Wm$.

На рисунках 2.24 и 2.25 изображены графики необходимой мощности нагревательных элементов в виде трубок в зависимости от условий внешней среды, дыхательной смеси и используемого материала в качестве утеплителя.

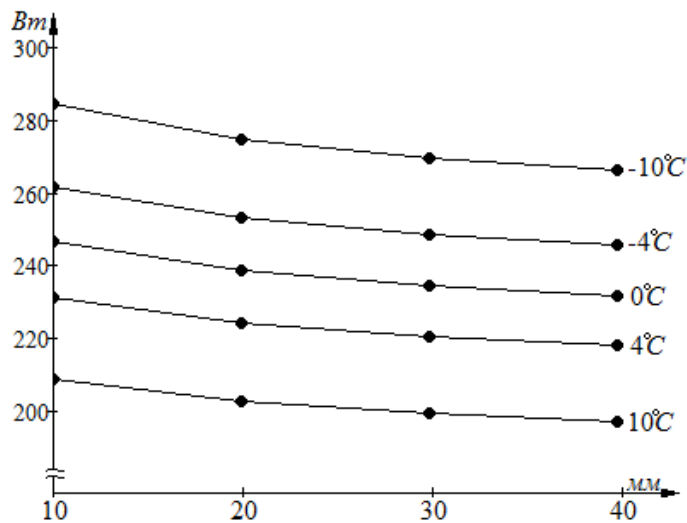


Рисунок 2.24 – Необходимая мощность нагревателей. Среда – воздух.

Утеплитель АТИМ

По оси абсцисс откладывается расстояние между трубками, по оси ординат – необходимая мощность нагревательных элементов.

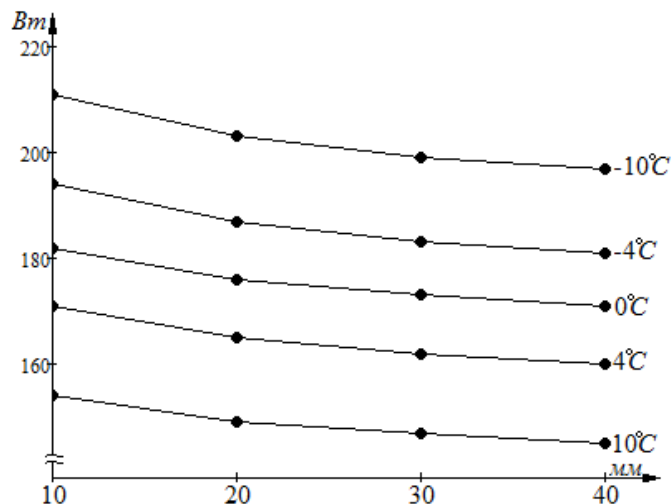
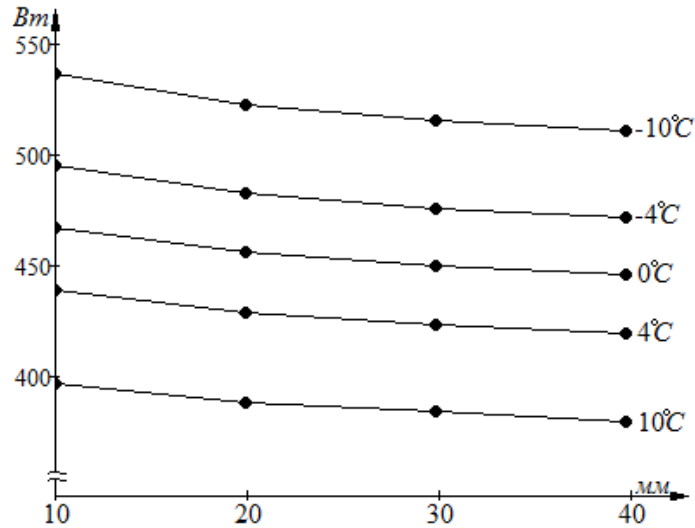


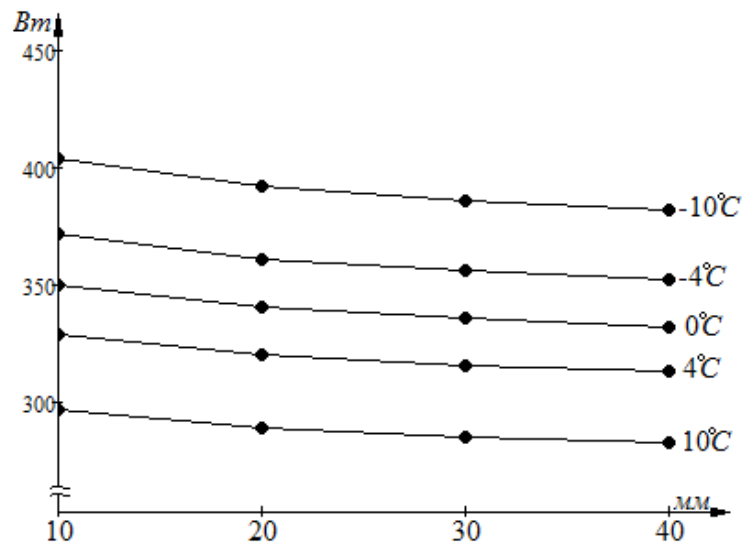
Рисунок 2.25 – Необходимая мощность нагревателей. Среда – воздух.

Утеплитель вспененный полиэтилен

Как видно из графиков 2.24 и 2.25 расчёты показали, что мощность, необходимая для создания условий теплового комфорта водолаза при использовании в качестве утеплителя вспененного полиэтилена ниже, чем при использовании АТИМ.



**Рисунок 2.26 – Необходимая мощность нагревателей. Среда – гелий.
Утеплитель АТИМ**



**Рисунок 2.27 – Необходимая мощность нагревателей. Среда – гелий.
Утеплитель вспененный полиэтилен**

Анализ графиков изображённых на рисунках 2.26 и 2.27 показывает, что при использовании гелия в качестве дыхательной смеси, возрастают и необходимые энергетические потери мощности. Связано это с уменьшением термического сопротивления и более высокой теплопроводностью гелия [11, 42].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

– Проведено построение графиков температурных полей и их дальнейшее исследование, что позволило получить наглядную картину распределения температуры в слоях обогреваемой спецодежды;

– Определены недостатки и достоинства используемых нагревательных элементов: – нагревательный элемент в виде полимерных трубок обеспечивает менее равномерный обогрев водолаза, чем резиновый водонагревательный элемент; – электрический нагревательный элемент обеспечивает равномерное распределение температуры по слоям одежды, однако наблюдается перепад в значениях температуры между крайней и средней точками; – из-за меньшего размера сечения проводников электрического нагревательного элемента, по сравнению с сечением каналов резинового водонагревательного элемента, температура на поверхности тела человека, при одинаковых внешних условиях, для электрического элемента распределяется более неравномерно, чем при использовании резинового элемента;

– Метод конечных разностей позволяет обоснованно выбрать место установки датчиков для дальнейшей разработки автоматической системы регулирования температуры в одежде водолаза (точка 13 на рисунке 2.4);

– Произведён пример расчёта требуемой мощности для трубчатых нагревательных элементов. И показано, что при расположении нагревательных элементов на поверхности слоя из нательного белья КПД обогрева возрастает, а потребляемая нагревательными элементами мощность, по сравнению с ранее производимыми исследованиями при расположении нагревательных элементов в толще утеплителя [11, 42], уменьшилась.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБОГРЕВАЕМОЙ СПЕЦОДЕЖДЫ С ПОМОЩЬЮ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

3.1. Электротепловая аналогия

Метод аналогии позволяет установить распределение температуры в исследуемом объекте по распределению другой, легко измеряемой величины в модели объекта, когда математическое описание распределения температуры и другой величины аналогичны, а в безразмерной форме тождественны [45].

Электротепловая аналогия — это метод расчета температурных полей, основанный на воспроизведении теплового процесса электрическим. Возможность воспроизведения вытекает из аналогии закономерностей тепло- и электропереноса. Сосредоточенности электрического сопротивления, соединяющие узлы цепи, воспроизводят сосредоточенные тепловые сопротивления, соединяющие узлы тепловой сетки (электротепловой аналог метода сеток) [62]. Используя данный метод можно смоделировать слои специальной одежды и получить экспериментальные данные распределения температуры. Электрическая модель системы «человек-одежда-окружающая среда» рассматривалась и ранее [11, 23], эксперименты в данной работе продолжают ранее проводимые исследования.

С помощью данного способа, есть возможность свести расчёт температурных полей пакета одежды водолаза к расчёту электрической схемы. Для этого тепловые величины заменяются их электрическими аналогами:

1. Перепад температур между двумя точками можно заменить падением напряжения между узлами электрической схемы;

2. Эквивалентом термического сопротивления является электрическое сопротивление.

Термическое сопротивление слоёв одежды можно узнать, зная теплопроводность и толщину каждого слоя.

Используя метод электротепловой аналогии можно провести исследование распределения температуры в слоях одежды с помощью компьютерного моделирования и опытного образца электрической схемы.

3.2. Компьютерное моделирование электротепловой аналогии пакета системы «человек-одежда-окружающая среда»

Компьютерное моделирование позволяет подобрать электрические сопротивления и напряжения, точно соответствующие их тепловым аналогам. Моделирование проводилось с помощью программы Simulink.

Исходя из метода электротепловой аналогии пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» можно представить в качестве электрической схемы (рисунок 3.1).

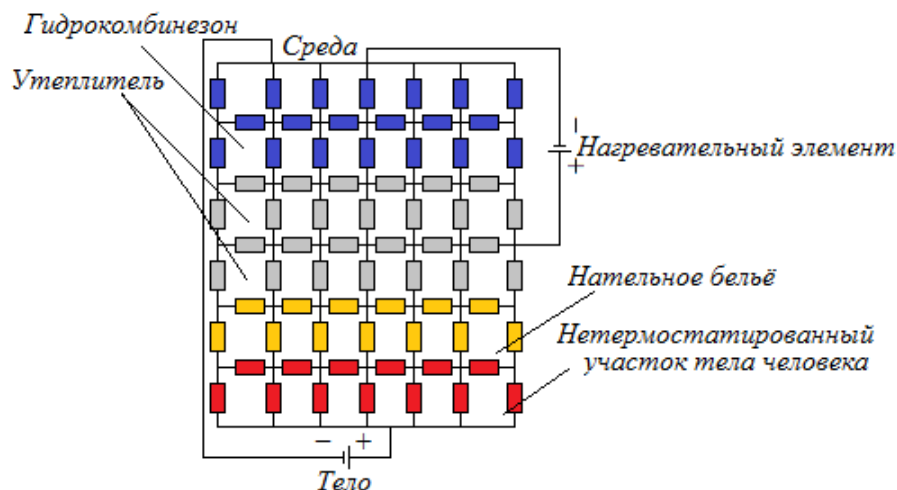


Рисунок 3.1 – Модель пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» в виде электрической схемы

В данной модели приняты следующие значения основных параметров:

- Температурному значению 1°C соответствует напряжение 1 В ;
- Тепловому сопротивлению участка слоя пакета одежды величиной $1\text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт}$ соответствует электрическое сопротивление 1 Ом .

Температура тела человека и нагревательные элементы заменяются источниками напряжения. Температура внешней среды заменяется общим электрическим потенциалом U .

Моделирование проводилось для случая, когда расстояние между трубками равно 10 мм и в качестве дыхательной смеси используется воздух. Значения температур в узлах сетки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» полученные при анализе компьютерной электротепловой модели

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	4.6	12	29.3	23	31.8
2	9.7	13	31.8	24	35
3	37.4	14	35	25	2.7
4	36.6	15	1.5	26	5.3
5	2.7	16	3	27	35.4
6	5.3	17	23.2	28	35.3
7	35.4	18	31.1	29	35.9
8	35.3	19	34.4	30	4.6
9	35.9	20	1.8	31	9.7
10	1.8	21	3.4	32	37.4
11	3.4	22	29.3	33	36.6

По значениям из таблицы 3.1 построен график температурного поля (рисунок 3.2):

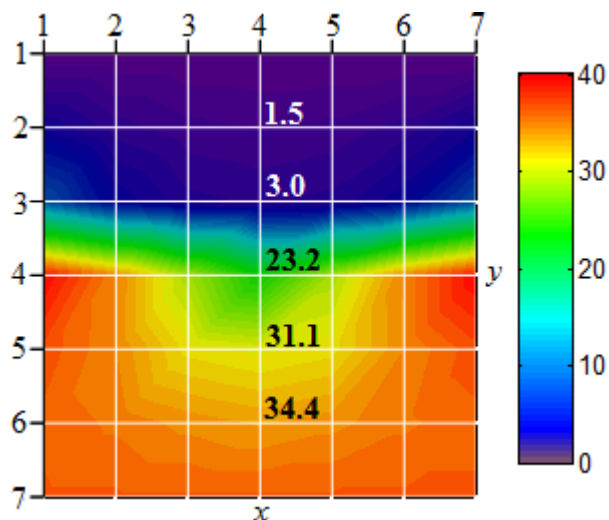


Рисунок 3.2 – Контурный график температурного поля для электротепловой компьютерной модели. Между нагревателями 10 мм

Для проведения корректного сравнения расчётных и экспериментальных данных по методу конечных разностей произвели расчёт и построение графика температурного поля для случая, когда температура внешней среды равна 0°C (рисунок 3.3).

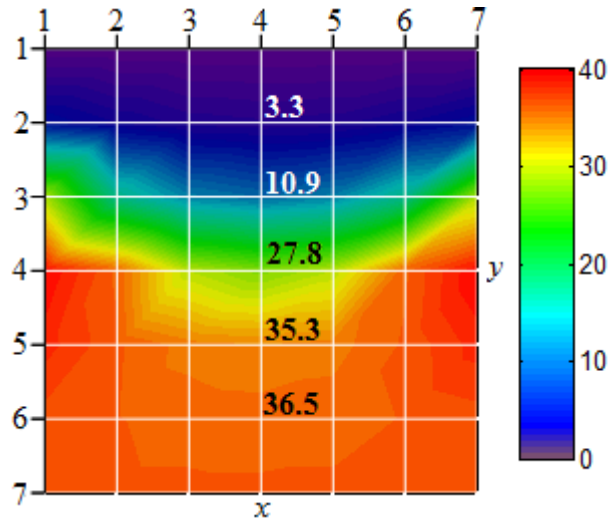


Рисунок 3.3 – Контурный график температурного поля в двухмерных координатах при расстоянии между трубками нагревательного элемента 10 мм для воздушной среды. Температура внешней среды 0°C

Анализируя графики на рисунках 3.2 и 3.3 можно сказать следующее:

- Результаты, полученные в результате расчётов, по сравнению с компьютерной моделью, дают более равномерную картину распределения температуры в слоях спецодежды;

- На поверхности тела человека температура для расчётного случая и случая компьютерного моделирования отличаются на 2°C . Наибольшее отличие в значениях температуры наблюдается во втором слое спецодежды (между точками 2 – 31) и составляет 8°C ;

- Разница в полученных значениях температуры в предполагаемой точке установки датчика (точка 13 на рисунке 2.4) составляет 4°C ;

В итоге можно сделать вывод, что компьютерное моделирование электротепловой аналогии даёт более неравномерную картину распределения температуры в слоях одежды. Погрешность в значениях температуры на поверхности тела человека можно учесть и считать, что разница в значениях

температуры (от 0.7°C до 2.1°C) находится в пределах 6%, однако в остальных слоях одежды ошибка накапливается.

Можно сказать, что данный метод подходит для приблизительной оценки значений температуры на поверхности тела человека. Установка датчика температуры на основе результатов, полученных при данном способе моделирования электротепловой аналогии, может привести к погрешности в работе автоматической системе регулирования.

Пример схемы компьютерной модели электротепловой аналогии представлен в приложении 2.

3.3. Создание и исследование физической электротепловой модели пакета системы «человек-одежда-окружающая среда»

Физическая модель, как и компьютерная, представляет собой параллельно-последовательное соединение сопротивлений с включёнными источниками напряжения, которые заменяют источники тепла: тело человека и нагревательный элемент. Как и в случае с компьютерным моделированием, среда является общим электрическим потенциалом (рисунок 3.1).

В данной модели сопротивления подобраны таким образом, чтобы их отношение с минимальной погрешностью соответствовало отношению тепловых сопротивлений одежды: $10 \text{ Ом} = 0.01 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт}$.

Источник напряжения, включённый в качестве нагревательного элемента $U_{\text{нагр}} = 4.38 \text{ В}$; источник напряжения, соответствующий температуре ядра человеческого тела $U_{\text{тела}} = 4.1 \text{ В}$. Соответственно, в модели принято следующее отношение $4.1 \text{ В} = 37^{\circ}\text{C}$ или $1^{\circ}\text{C} \approx 0.11 \text{ В}$.

Данная электрическая схема соответствует случаю, когда в качестве нагревательного элемента используется трубчатый элемент и расстояние между точками нагрева 10 мм .

В результате проведённого опыта были получены следующие значения (таблица 3.2):

Таблица 3.2 – Значения напряжений в узлах электрической принципиальной схемы

Номер точки	Напряжение, В	Номер точки	Напряжение, В	Номер точки	Напряжение, В
1	0.64	12	2.39	23	3.93
2	1.44	13	3.93	24	4
3	4.2	14	4	25	0.42
4	4.1	15	0.25	26	0.87
5	0.42	16	0.48	27	3.84
6	0.87	17	2.14	28	4.05
7	3.84	18	3.55	29	4.05
8	4.05	19	3.93	30	0.64
9	4.05	20	0.29	31	1.44
10	0.29	21	0.57	32	4.2
11	0.57	22	2.39	33	4.1

Т.к. в принятой модели $1 \text{ В} \approx 9.1^\circ\text{C}$ можно получить значения температуры в соответствующих точках (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Значения температуры в узлах системы, полученные из экспериментов на основе физической электротепловой модели

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	5.8	12	21.5	23	35.4
2	13	13	35.4	24	36
3	37.8	14	36	25	3.8
4	36.9	15	2.2	26	7.8
5	3.8	16	4.3	27	34.6
6	7.8	17	19.3	28	36.5
7	34.6	18	32	29	36.5
8	36.5	19	35.4	30	5.8
9	36.5	20	2.6	31	13
10	2.6	21	5.1	32	37.8
11	5.1	22	21.5	33	36.9

На основе результатов, приведённых в таблице 3.3, построим график температурного поля для физической модели электротепловой аналогии (рисунок 3.4).

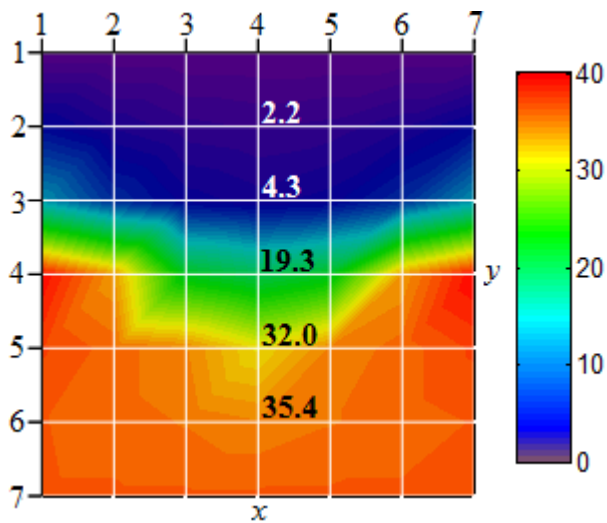


Рисунок 3.4 – Контурный график температурного поля для электротепловой физической модели. Между нагревателями 10 мм

Анализируя графики на рисунках 3.3 и 3.4 можно сделать следующие выводы:

- Значение температуры на поверхности тела человека, полученное из физической модели, составляет 35.4°C , тогда как при расчётах было получено значение равное 36.5°C . Погрешность составляет 1.1°C .

- Разница в полученных значениях температуры в предполагаемой точке установки датчика (точка 13 на рисунке 2.4) составляет 0.3°C .

- Наибольшая разница в значениях температур для расчётных данных, и данных, полученных из физической электротепловой модели пакета спецодежды, наблюдается во втором слое. Однако погрешность в данном слое одежды не имеет большого влияния на дальнейшие расчёты.

В итоге можно сделать вывод, что физическая модель подтверждает ранее полученные расчётные данные. Разницей между полученными значениями температур во втором слое можно пренебречь.

Данная методика позволяет дать объективную оценку распределения температуры на поверхности тела человека.

Погрешность в значениях температуры на поверхности человеческого тела для расчётов и экспериментальной модели находится в пределах 5% (максимальное различие в значении температуры на поверхности человеческого тела для расчётов и экспериментов составляет 1.1°C)

Также физическая модель позволяет определить требуемое значение температуры в месте установки датчика автоматической системы, что позволит произвести необходимые расчёты для разработки автоматической системы регулирования и её дальнейшей работы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

– Созданы компьютерная и физическая модели пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» основанные на методе электротепловой аналогии. По результатам проведённых экспериментов на основе данного метода были построены графики температурных полей, что позволило сравнить экспериментальные и расчётные данные;

– По итогам главы сделан вывод о том, что компьютерное моделирование электротепловой аналогии и дальнейшее построение графиков, на основе результатов, полученных при данном способе моделирования, дают большую погрешность (более 5%), по сравнению с расчётными данными и данными, получаемыми при анализе работы физической модели. Компьютерное моделирование может быть использовано для ориентировочной оценки распределения температуры на поверхности тела человека. В качестве способа, для определения места установки датчика и для получения объективной оценки распределения температуры по всем слоям спецодежды глубоководных водолазов данный метод не подходит;

– По итогам главы сделан вывод о том, что физическая модель подтвердила данные по распределению температуры в двух слоях: на поверхности человеческого тела и в слое нательного белья, которые были получены ранее с помощью проведения расчётов. Физическая модель позволяет не только получить

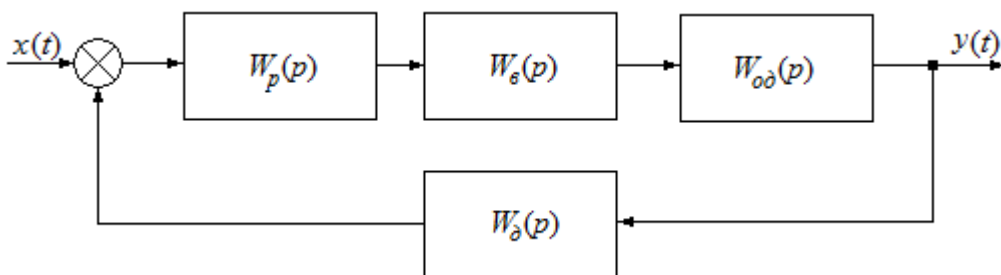
значения температуры на поверхности тела водолаза, но и также даёт возможность более точно установить значение температуры на месте установки датчика автоматической системы регулирования.

ГЛАВА 4. РАСЧЁТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДОБОГРЕВАЕМОЙ СПЕЦОДЕЖДЫ ГЛУБОКОВОДНЫХ ВОДОЛАЗОВ

4.1. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водобогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента

Создание автоматической системы регулирования (АСР) включает в себя анализ составных частей АСР, проведение необходимых расчётов по определению параметров звеньев автоматической системы, определение коэффициентов настроек регулятора.

Структурная схема автоматической системы регулирования температуры водобогреваемой спецодежды водолазов, без учёта возмущения от нагревателя газовой смеси, представлена на рисунке 4.1.



**Рисунок 4.1 – Структурная схема АСР температуры водобогреваемой
спецодежды водолазов**

Передаточная функция разомкнутой системы (4.1):

$$W_{раз}(p) = W_p(p)W_e(p)W_{od}(p). \quad (4.1)$$

где, $W_e(p) = \frac{K_e}{T_e p + 1}$ – передаточная функция трубок с водой;

$W_{od}(p) = \frac{K_{od}}{T_{od} p + 1}$ – передаточная функция одежды;

$W_p(p)$ – передаточная функция регулятора.

Передаточная функция замкнутой системы (4.2):

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)W_{\delta}(p)} \quad (4.2)$$

где, $W_{\delta}(p) = \frac{K_{\delta}}{T_{\delta}p + 1}$ – передаточная функция датчика.

Коэффициенты указанных выше передаточных функций определили по формулам, представленным ниже, расчёт представлен в приложении 3.

В одежде прокладываются трубки со следующими параметрами:

n_c – количество секций с трубками; l – длина одной трубки, м; d – внутренний диаметр трубки, м; D – внешний диаметр трубки, м; Q_6 – расход воды в трубках, м³/сек.

Коэффициент теплопередачи [29] от трубок вычислен по формуле (4.3):

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{1}{2\lambda} \ln\left(\frac{D}{d}\right)}; \quad (4.3)$$

Где λ – коэффициент теплопроводности материала трубок, Вт/(м·°C), α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке, Вт/(м²·°C).

Коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке определяется по соотношению (4.4):

$$\alpha_1 = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad (4.4)$$

Где $\lambda_{жс}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·°C); Nu – число Нуссельта.

$$Nu = f(Re, Pr);$$

Для определения числа Нуссельта определяем режим течения теплоносителя.

Для этого находим число Рейнольдса (4.5):

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}; \quad (4.5)$$

Где ν – коэффициент кинематической вязкости воды при температуре 40°C, м²/сек; V – скорость воды в одной трубке, м/с (4.6).

$$V = \frac{Q_6}{\pi r^2 n_c}; \quad (4.6)$$

где, r – внутренний радиус трубки, м:

$$r = \frac{1}{2}d;$$

В результате подстановки значений и последующих расчётов получили значение скорости воды в одной трубке $V = 1.8$ м/с и число Рейнольдса $Re = 8063$.

Так как $Re = 8063$, то режим течения теплоносителя турбулентный. Соответственно число Нуссельта находится по следующей формуле (4.7):

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr_{ж}^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0.25}; \quad (4.7)$$

Где Pr – число Прандтля, $Pr_{ж} = 4.31$, $Pr_c = 7.02$.

Индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства выбираются в соответствии со средней температурой, соответственно, жидкости теплоносителя и стенки канала, по которому перемещается теплоноситель.

В итоге, после подстановки значений в (4.3, 4.4, 4.7) и проведения расчётов получаем число Нуссельта $Nu = 46.5$, коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке $\alpha_1 = 9497$ Вт/(м²·°C), коэффициент теплопередачи от трубок $k_l = 1.2$ Вт/(м·°C).

Необходимо отметить, что влияние α_1 на k_l незначительно, то есть изменение расхода теплоносителя практически не сказывается на теплопередаче от трубок. Соответственно, регулирование температуры в подкомбинезонном пространстве осуществляется не за счёт производительности насоса, а за счёт смешения горячей и холодной воды.

Рассчитали передаточную функцию трубок с водой по формуле (4.8):

$$W_6(p) = \frac{K_6}{T_6 p + 1}; \quad (4.8)$$

Находим постоянную времени трубок с водой (4.9):

$$T_6 = \frac{m_T C_T + m_6 C_6}{k_l l + \frac{Q_6}{8} \rho_6 C_6}; \quad (4.9)$$

где, C_m – удельная теплоёмкость трубок, Дж/(кг·°C); $C_в$ – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C); l – длина одной трубки, м; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м³; k_l – коэффициент теплопередачи от трубок, Вт/(м·°C); $Q_в$ – расход воды в одной секции, м³/сек; $m_в$ – масса воды, кг; m_T – масса трубки, кг.

Формула для нахождения массы воды выглядит следующим образом (4.10):

$$m_в = \pi \cdot r^2 \cdot \rho_в \cdot l; \quad (4.10)$$

Масса трубки находится по формуле (4.11):

$$m_T = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) l \rho_T; \quad (4.11)$$

где, ρ_T – плотность материала трубок, кг/м³.

Передаточная функция одежды (4.12):

$$W_{од}(p) = \frac{K_{од}}{T_{од}p + 1}; \quad (4.12)$$

Постоянная времени одежды находится следующим образом (4.13):

$$T_{од} = \rho_m \cdot \delta_{од} \cdot C_{од} \cdot R; \quad (4.13)$$

где, ρ_m – плотность материала, кг/м³, $\delta_{од}$ – толщина пакета одежды, м, $C_{од}$ – удельная теплоёмкость одежды, Дж/(кг·°C), R – суммарное термическое сопротивление одежды, (м²·°C)/Вт.

Далее найдём значения коэффициентов передачи:

$$K_в = \frac{\Theta_k}{\Theta_n}; \quad (4.14)$$

Где Θ_k – температура теплоносителя на выходе из гидрокомбинезона, °C, Θ_n – температура теплоносителя на входе в гидрокомбинезон, °C. При подстановке значений, получили $K_в = 0.8$.

Коэффициент передачи для одежды определяется как отношение изменения температуры одежды под поверхностью нагревательного элемента к изменению температуры теплоносителя внутри трубки нагревательного элемента [11]. Соответственно, формула для расчёта $K_{од}$ выглядит следующим образом: (4.15):

$$K_{од} = \frac{\Delta\Theta_{од}}{\Delta\Theta_в}. \quad (4.15)$$

После подстановки значений и проведения расчётов, получили $K_{od} = 0.15$.

В качестве датчика температуры в данной АСР рассматривали медь-константановую термопару. Соответственно, постоянная времени $T_d = 0.002$ мин, коэффициент передачи $K_d = 1$.

После проведения всех необходимых расчётов, передаточная функция объекта АСР, с условием использования воздушной газовой смеси, примет вид (4.16):

$$W_o(p) = \frac{0.12}{(0.7p+1)(10.4p+1)}. \quad (4.16)$$

П-регулятор обладает ошибкой, которая может составлять 5-10°C. Поэтому для расчётов в данной системе рассматривается ПИ-регулятор с передаточной функцией (4.17):

$$W_p(p) = \frac{K_p(T_i p + 1)}{T_i p}. \quad (4.17)$$

где, K_p – коэффициент усиления регулятора, T_i – постоянная времени интегрирования (4.18).

$$T_i = \sqrt{T_{од} \cdot T_v} \quad (4.18)$$

Найдём коэффициент усиления регулятора с помощью построения и анализа логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы.

Передаточная функция разомкнутой системы (4.1):

$$W_{раз}(p) = W_o(p)W_p(p)$$

В результате расчётов, была получена ЛАФЧХ, показанная на рисунке 4.2.

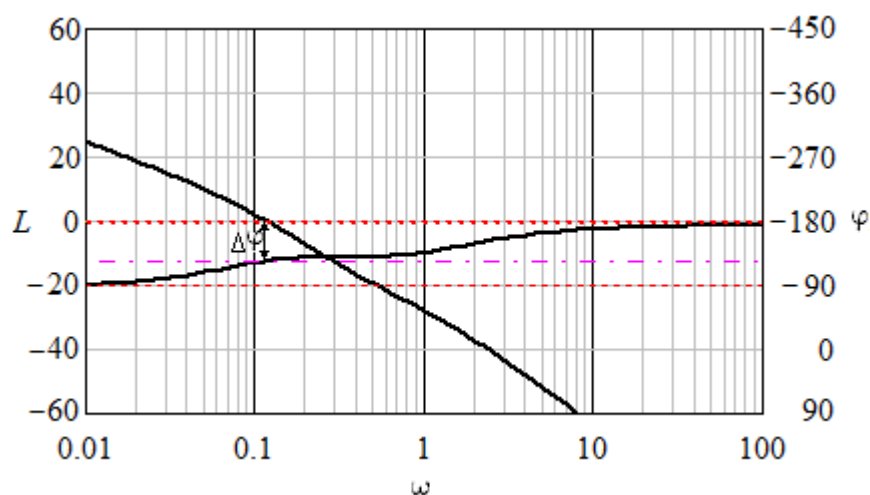


Рисунок 4.2 – логарифмическая амплитудная частотная и фазо-частотная характеристики разомкнутой системы при использовании трубчатого нагревательного элемента

Данная характеристика построена для системы, в которой коэффициент усиления регулятора $K_p = 4$. Анализируя характеристики, показанные на рисунке 4.2, можно сказать, что при выбранном коэффициенте усиления, запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \approx 50^\circ$.

Перерегулирование переходной характеристики системы σ не должно превышать $\approx 20\%$.

Относительное перерегулирование можно ориентировочно определить по положению годографа разомкнутой системы относительно показателя колебательности M .

Для получения ориентировочного значения перерегулирования системы, не превышающего примерного значения в 20% , годограф разомкнутой системы должен проходить между двумя окружностями, которые являются показателями колебательности со значениями $M = 1.1$ и $M = 1.2$. Годограф разомкнутой системы и окружности показателей колебательности показаны на рисунке 4.3.

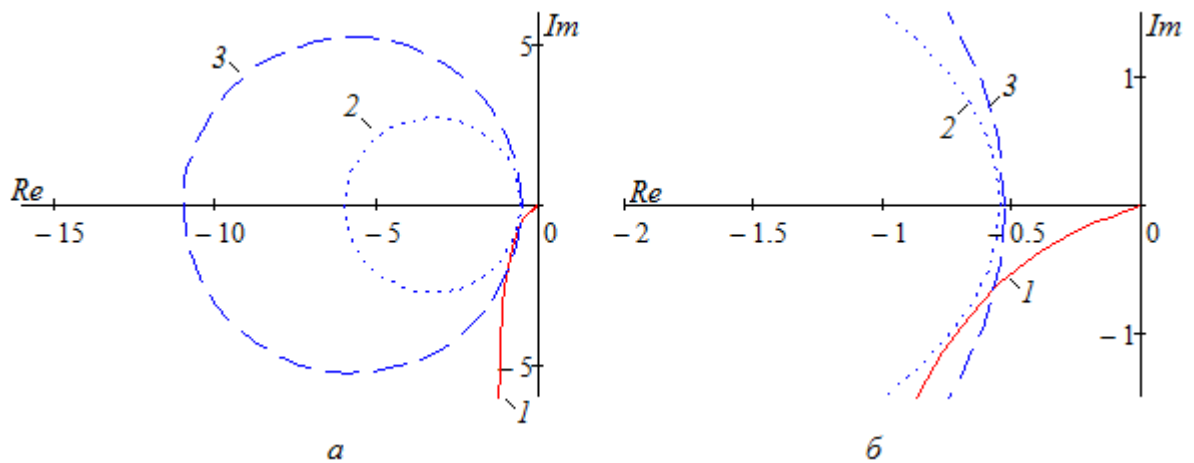


Рисунок 4.3 – Годограф разомкнутой системы (1), показатели колебательности со значениями $M = 1.2$ (2) и $M = 1.1$ (3)

На рисунке 4.3 представлен годограф разомкнутой системы и окружности показателей колебательности в двух масштабах. Рисунок 4.3б позволяет более точно оценить положение годографа разомкнутой системы. Как видно из графиков на рисунке 4.3, годограф разомкнутой системы, с полученным ранее коэффициентом усиления ПИ-регулятора, проходит между окружностями показателя колебательности со значениями 1.1 и 1.2, перерегулирование системы будет ориентировочно равно 20%. Далее построен график переходного процесса автоматической системы, рисунок 4.4.

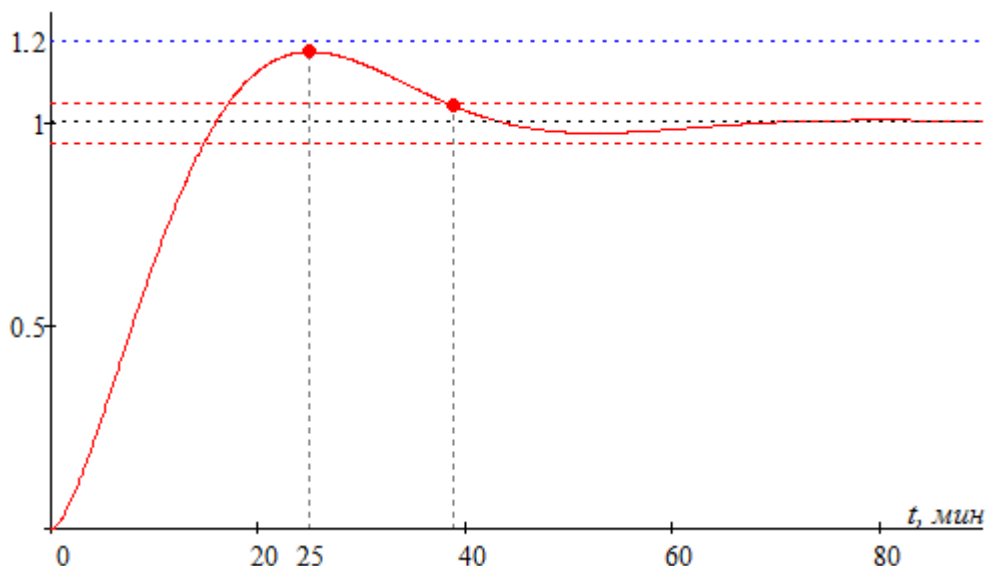


Рисунок 4.4 – Переходная характеристика автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента

Анализ графика на рисунке 4.4 показывает, что максимальное перерегулирование σ_{max} не превышает 20%. Время регулирования переходного процесса, при допустимом отклонении в 5% от установившегося значения, составило 39 мин.

Пример расчётов и построения ЛАФЧХ, годографа разомкнутой системы, относительных показателей колебательности и переходных характеристик с помощью ЭВМ приведён в приложении 4.

4.2. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием резинового нагревательного элемента

Структурная схема АСР для данного случая не отличается от структурной схемы, представленной на рисунке 4.1.

Коэффициенты передачи и постоянные времени для передаточных функций W_g и W_{od} для данного нагревательного элемента будут незначительно отличаться от предыдущего случая. Расчёт коэффициентов передаточной функции объекта регулирования для данного случая представлен в приложении 5.

Постоянная времени T_g находится следующим образом (4.19):

$$T_g = \frac{m_p C_p + m_g C_g}{k_l l + \frac{Q_g}{8} \rho_g C_g}, \quad (4.19)$$

где, l – суммарная длина каналов, м; Q_g – расход воды в одной секции, м³/сек; m_p – масса резинового элемента, кг; m_g – масса воды в каналах элемента, кг; ρ_g – плотность воды кг/м³; C_p – удельная теплоёмкость резины, Дж/(кг·°C); C_g – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C); k_l – коэффициент теплопередачи от элемента, Вт/(м²·°C).

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}; \quad (4.20)$$

Где λ_{1-3} - коэффициенты теплопроводности слоёв одежды, $Bm/(m \cdot ^\circ C)$; δ_{1-3} - толщина слоёв одежды, m ; α_1 - коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке элемента, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке определяется по формуле (4.21):

$$\alpha_1 = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d_{эк}}; \quad (4.21)$$

Где $\lambda_{жс}$ - коэффициент теплопроводности теплоносителя (воды), $Bm/(m \cdot ^\circ C)$, $d_{эк}$ - эквивалентный диаметр, m , Nu - число Нуссельта.

$$Nu = f(Re, Pr);$$

Находим число Рейнольдса (4.22):

$$Re = \frac{Vd_{эк}}{\nu}; \quad (4.22)$$

Где ν - кинематическая вязкость воды при температуре $40^\circ C$, $m^2/сек$, V - скорость воды в одном канале, $m/сек$, которая определяется по формуле (4.23).

$$V = \frac{Q_6}{Sn_c}; \quad (4.23)$$

где, S - площадь поперечного сечения канала, m^2 , n_c - количество секций в костюме.

В результате расчётов, получили следующие значения:

Число Рейнольдса $Re = 5189$ (принимая режим за турбулентный), число Нуссельта $Nu = 32.7$, коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке элемента $\alpha_1 = 4582 Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$, коэффициент теплоотдачи от элемента $k_l = 8.4 Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Далее находим массу резинового элемента, (4.24):

$$m_p = \rho_p V_{nl} = \rho_p (SH - V_k) = \rho_p (abc - V_k), \quad (4.24)$$

где, a - ширина, b - длина, c - толщина резинового нагревательного элемента, m , V_k - объём каналов, m^3 , ρ_p - плотность резины, $кг/м^3$.

$$V_k = a^2 n l_k, \quad (4.25)$$

где, a_k – длина стороны канала, m , n – количество каналов, l_k – длина канала, m ;

Масса воды в каналах элемента (4.26):

$$m_e = V_k \rho_e n_c, \quad (4.26)$$

где, ρ_e – плотность воды, $кг/м^3$.

В результате подстановки значений в (4.24) и проведения расчётов, получили постоянную времени передаточной функции воды $T_e \approx 1.4$ мин. Постоянная времени одежды рассчитывается по формуле (4.12), $T_{od} \approx 11.8$ мин. Коэффициент передачи воды не отличается от найденного ранее и, соответственно, $K_e = 0.8$. Коэффициент передачи для одежды найден по формуле (4.15), $K_{od} = 0.3$.

В результате, передаточная функция объекта управления примет следующий вид (4.27):

$$W_o(p) = \frac{0.24}{(1.4p+1)(11.8p+1)}. \quad (4.27)$$

В системе также используем ПИ-регулятор (4.17).

Находим коэффициент усиления регулятора с помощью построения и анализа логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы, которая показана на рисунке 4.5.

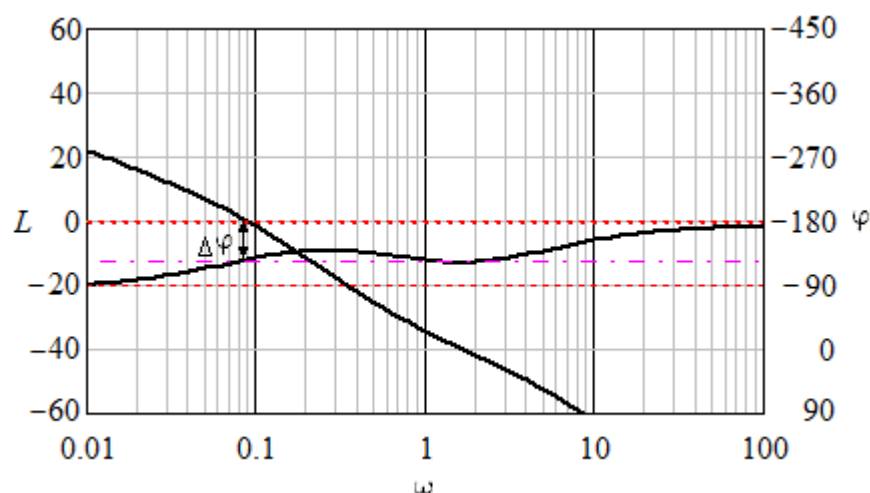


Рисунок 4.5 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы при использовании резинового нагревательного элемента

Данная характеристика построена для системы, в которой коэффициент усиления регулятора $K_p = 3$. Анализируя характеристики, показанные на рисунке 4.5, можно сказать, что при выбранном коэффициенте усиления, запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \approx 50^\circ$.

Проверим с помощью построения годографа разомкнутой системы и параметров колебательности относительное значение перерегулирования для данной системы с выбранным значением коэффициента усиления регулятора (рисунок 4.6).

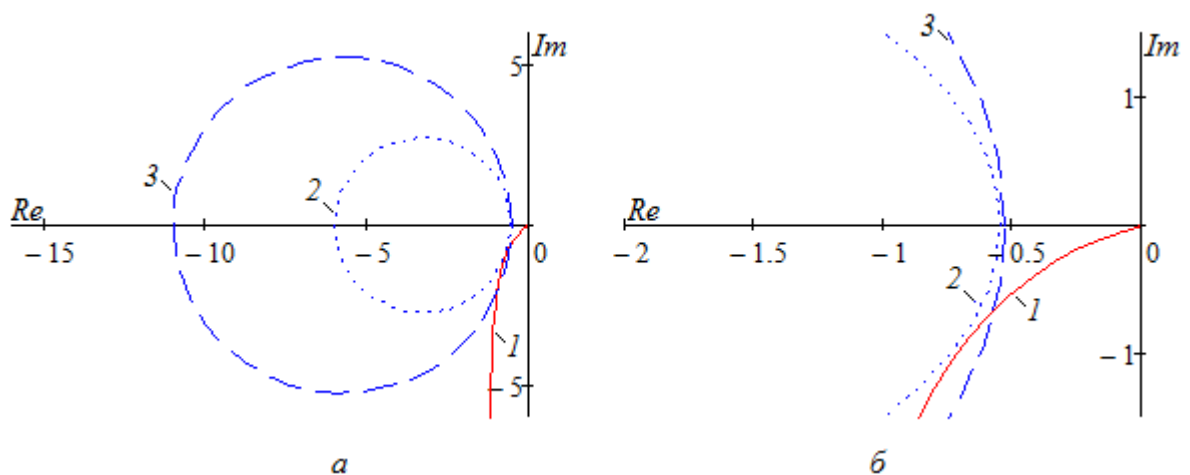


Рисунок 4.6 – Годограф разомкнутой системы (1) и показатели колебательности (2, 3)

Анализируя графики на рисунке 4.6 можно сказать, что перерегулирование переходной характеристики ориентировочно составит 20%.

Построим график переходного процесса автоматической системы регулирования температуры водогреваемой спецодежды водолазов при использовании резинового нагревательного элемента (рисунок 4.7).

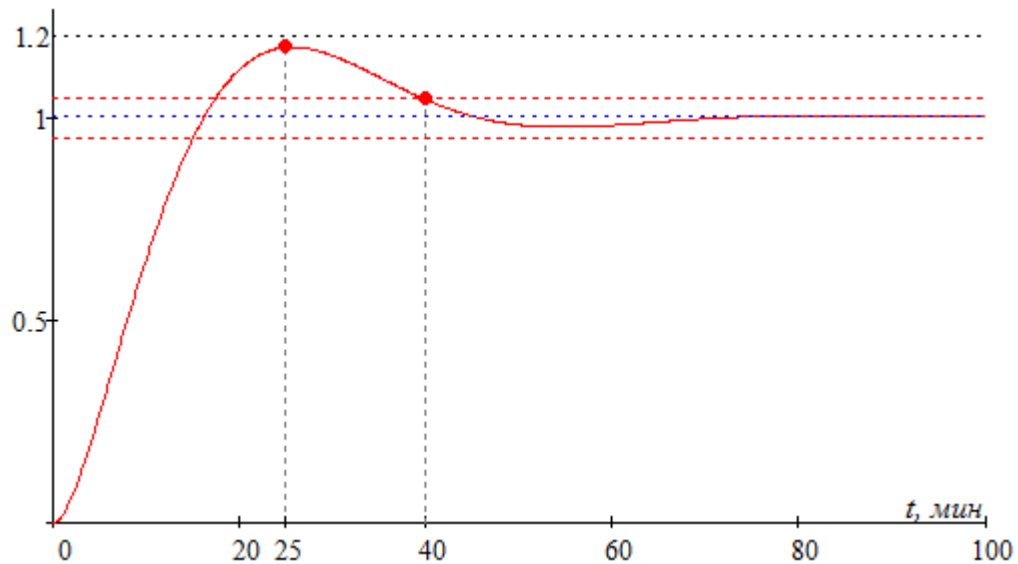


Рисунок 4.7 – Переходная характеристика автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием резинового водяного нагревательного элемента

Анализ графика на рисунке 4.7 показывает, что при выбранном значении коэффициента усиления регулятора максимальное перерегулирование σ_{max} не превышает 20%. Время переходного процесса для данного случая составляет 40 мин.

4.3. Робастное управление

Водолазные погружения связаны с влиянием многих факторов, которые необходимо учитывать как при создании спецодежды, так и при создании автоматической системы регулирования.

Учесть изменения коэффициентов АСР с течением времени можно с помощью робастного управления. Робастное управление – это раздел ТАУ, который и позволяет учитывать меняющиеся со временем параметры объекта регулирования или погрешности в расчётах коэффициентов системы.

Робастная устойчивость определяется следующим образом [25]:

Рассмотрим характеристический полином (4.28):

$$Q(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n \quad (4.28)$$

Полином называется устойчивым полиномом или полиномом Гурвица, если все его нули являются левыми.

Введём в рассмотрение $(n + 1)$ – вектор $a = (a_0, a_1, \dots, a_n)$. Пусть в $(n + 1)$ -мерном пространстве коэффициентов задано множество A ($A \subset \mathbb{R}^{n+1}$).

Полином (4.28) называется *робастно устойчивым*, если он является устойчивым при любых значениях коэффициентов a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) из множества A ($a \in A$).

Система называется робастно устойчивой или робастно устойчивой на множестве A , если её характеристический полином является робастно устойчивым полиномом в A .

Пусть множество A является (гипер)параллелепипедом (4.29):

$$A = \{a : \underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, i = 0, 1, \dots, n\}. \quad (4.29)$$

Здесь \underline{a}_i и \bar{a}_i – минимальное и максимальное значения коэффициента a_i ($i = 0, 1, \dots, n$).

Подставим в характеристический полином $p = j\omega$ и выделим вещественную и мнимую части (4.30):

$$\begin{aligned} Q(j\omega) &= a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n = u(\omega) + jv(\omega), \\ u(\omega) &= a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - a_{n-6}\omega^6 + \dots, \\ v(\omega) &= a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - a_{n-7}\omega^7 + \dots \end{aligned} \quad (4.30)$$

При фиксированном ω , когда вектор a пробегает все значения из множества (4.29), характеристический вектор описывает прямоугольник (рисунок 4.8).

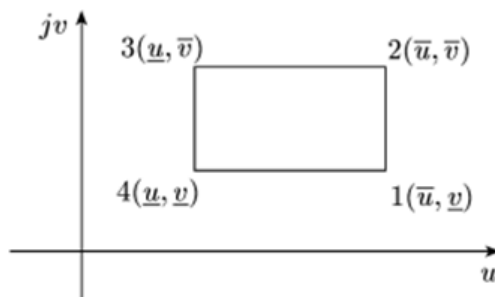


Рисунок 4.8 – К определению полиномов Харитонова

Очевидно, на вершинах прямоугольника $u(\omega)$ и $v(\omega)$ как функции от ω принимают минимальные или максимальные значения. Обозначим минимумы $u(\omega)$ и $v(\omega)$ через $\underline{u}(\omega)$ и $\underline{v}(\omega)$, максимумы через $\bar{u}(\omega)$ и $\bar{v}(\omega)$ и соответственно:

$$\begin{aligned}\underline{u} &= \underline{u}(\omega) = \min_{a \in A} u(\omega), \quad \underline{v} = \underline{v}(\omega) = \min_{a \in A} v(\omega), \\ \bar{u} &= \bar{u}(\omega) = \max_{a \in A} u(\omega), \quad \bar{v} = \bar{v}(\omega) = \max_{a \in A} v(\omega).\end{aligned}$$

Функции $u(\omega)$ и $v(\omega)$ примут минимальные значения, когда в (4.30) слагаемые с положительным знаком принимают минимальные значения, а слагаемые с отрицательным знаком – максимальные значения.

И наоборот, $u(\omega)$ и $v(\omega)$ примут максимальные значения, когда слагаемые с положительным знаком принимают максимальные значения, а слагаемые с отрицательным знаком – минимальные значения.

Поэтому из (4.30) имеем:

$$\begin{aligned}\underline{u}(\omega) &= \underline{a}_n - \bar{a}_{n-2}\omega^2 + \underline{a}_{n-4}\omega^4 - \bar{a}_{n-6}\omega^6 + \dots, \\ \underline{v}(\omega) &= \underline{a}_{n-1}\omega - \bar{a}_{n-3}\omega^3 + \underline{a}_{n-5}\omega^5 - \bar{a}_{n-7}\omega^7 + \dots, \\ \bar{u}(\omega) &= \bar{a}_n - \underline{a}_{n-2}\omega^2 + \bar{a}_{n-4}\omega^4 - \underline{a}_{n-6}\omega^6 + \dots, \\ \bar{v}(\omega) &= \bar{a}_{n-1}\omega - \underline{a}_{n-3}\omega^3 + \bar{a}_{n-5}\omega^5 - \underline{a}_{n-7}\omega^7 + \dots\end{aligned}\tag{4.31}$$

Как следует из рисунка 4.8, вершинам прямоугольника 1, 2, 3 и 4 соответствуют характеристические векторы:

$$\begin{aligned}Q_1(j\omega) &= \bar{u}(\omega) + j\underline{v}(\omega), \quad Q_2(j\omega) = \bar{u}(\omega) + j\bar{v}(\omega), \\ Q_3(j\omega) &= \underline{u}(\omega) + j\bar{v}(\omega), \quad Q_4(j\omega) = \underline{u}(\omega) + j\underline{v}(\omega).\end{aligned}$$

Подставив в формулу для $Q_1(j\omega)$ выражения для $\bar{u}(\omega)$ и для $\underline{v}(\omega)$ из (4.31), получим:

$$\begin{aligned}Q_1(j\omega) &= \bar{a}_n - \underline{a}_{n-2}\omega^2 + \bar{a}_{n-4}\omega^4 - \dots \\ &\dots + j(\underline{a}_{n-1}\omega - \bar{a}_{n-3}\omega^3 + \underline{a}_{n-5}\omega^5 - \dots) = \bar{a}_n + \underline{a}_{n-1}(j\omega) + \\ &\quad + \underline{a}_{n-2}(j\omega)^2 + \bar{a}_{n-3}(j\omega)^3 + \bar{a}_{n-4}(j\omega)^4 + \underline{a}_{n-5}(j\omega)^5 + \dots\end{aligned}$$

Отсюда, положив $j\omega = p$, получим характеристический полином $Q_1(p)$. Аналогично можно получить характеристические полиномы, соответствующие остальным вершинам прямоугольника.

Выпишем коэффициенты при p в порядке возрастания степени всех четырёх полиномов:

$$\begin{aligned}
Q_1(p) &: \bar{a}_n, \bar{a}_{n-1}, \bar{a}_{n-2}, \bar{a}_{n-3}, \bar{a}_{n-4}, \dots; \\
Q_2(p) &: \bar{a}_n, \bar{a}_{n-1}, \bar{a}_{n-2}, \bar{a}_{n-3}, \bar{a}_{n-4}, \bar{a}_{n-5}, \dots; \\
Q_3(p) &: \bar{a}_n, \bar{a}_{n-1}, \bar{a}_{n-2}, \bar{a}_{n-3}, \bar{a}_{n-4}, \bar{a}_{n-5}, \dots; \\
Q_4(p) &: \bar{a}_n, \bar{a}_{n-1}, \bar{a}_{n-2}, \bar{a}_{n-3}, \bar{a}_{n-4}, \bar{a}_{n-5}, \dots
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Полиномы $Q_1(p)$, $Q_2(p)$, $Q_3(p)$ и $Q_4(p)$ называются полиномами Харитонова.

Необходимое условие робастной устойчивости: требуется, чтобы при $\underline{a}_0 > 0$ выполнялось условие:

$$\underline{a}_0 > 0, \underline{a}_1 > 0, \dots, \underline{a}_n > 0. \tag{4.33}$$

Теорема Харитонова: Для того, чтобы система с характеристическим полиномом $Q(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$, при выполнении условия (4.33), была робастно устойчива параллелепипеде $A = \{a : \underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, i = 0, 1, \dots, n\}$, необходимо и достаточно, чтобы были устойчивы следующие полиномы Харитонова:

- а) в случае $n = 3$ полином Харитонова $Q_1(p)$;
- б) в случае $n = 4$ полиномы Харитонова $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$;
- в) в случае $n = 5$ полиномы Харитонова $Q_1(p)$, $Q_2(p)$ и $Q_3(p)$.

4.3.1. Расчёт робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды глубоководных водолазов с использованием трубчатого нагревательного элемента

При погружении под воду водолазу для дыхания может подаваться как воздушная дыхательная смесь, так и гелиевая.

Передаточная функция объекта регулирования, при использовании воздуха для дыхания водолаза, была найдена ранее и выглядит следующим образом (4.16):

$$W_o = \frac{0.12}{(0.7p+1)(10.4p+1)}.$$

В гелиевой среде коэффициент усиления для обогреваемой одежды ниже и равен $K_{od} = 0.1$.

Так же в гелиевой среде, при таких же значениях влажности и давления, что и при использовании воздуха, в 1.5 – 2 раза уменьшается термическое сопротивление одежды, что приведёт к уменьшению постоянной времени T_{od} [11].

В итоге передаточная функция объекта для гелиевой среды примет вид:

$$W_o = \frac{0.08}{(0.7p+1)(5.2p+1)}. \quad (4.34)$$

В качестве регулятора АСР оставляем ПИ-регулятор (4.17).

Передаточная функция разомкнутой системы (4.1), при подстановке коэффициентов передаточных функций, выглядит следующим образом:

$$W_{раз}(p) = \frac{K_p K_\epsilon K_{od} T_u p + K_p K_\epsilon K_{od}}{T_u T_\epsilon T_{od} p^3 + T_u T_\epsilon p^2 + T_u T_{od} p^2 + T_u p}$$

Передаточная функция замкнутой системы (4.2):

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)W_o(p)}$$

Следовательно, характеристический полином замкнутой системы имеет вид (4.35):

$$Q(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 \quad (4.35)$$

где, $a_0 = T_\epsilon T_{od} T_\delta T_u$; $a_1 = T_\epsilon T_\delta T_u + T_{od} T_\delta T_u + T_\epsilon T_{od} T_u$; $a_2 = T_\delta T_u + T_\epsilon T_u + T_{od} T_u$; $a_3 = T_u + K_{od} K_\epsilon K_p T_u$; $a_4 = K_p K_\epsilon K_{od}$.

Коэффициенты, которые меняются в зависимости от условий и течения времени (4.36):

$$\begin{aligned} 0.08 &\leq K_o \leq 0.12 \\ 5.2 &\leq T_{od} \leq 10.4 \\ 1.9 &\leq T_u \leq 2.7 \end{aligned} \quad (4.36)$$

Обязательное условие устойчивости по теореме Харитонова выполняется, так как все минимальные члены характеристического полинома больше нуля [25].

Так же, для того чтобы указанный выше характеристический полином был робастно устойчив, согласно теореме Харитонова, необходимо и достаточно, чтобы были устойчивы следующие полиномы (4.37):

$$\begin{cases} Q_1(p) = \bar{a}_0 p^4 + \bar{a}_1 p^3 + \underline{a}_2 p^2 + \underline{a}_3 p + \bar{a}_4 \\ Q_2(p) = \bar{a}_0 p^4 + \underline{a}_1 p^3 + \underline{a}_2 p^2 + \bar{a}_3 p + \bar{a}_4 \end{cases} \quad (4.37)$$

Проведя необходимые расчёты, основанные на программном вычислении устойчивости АСР по методу Рауса-Гурвица (приложение б), получили значение коэффициента усиления регулятора $K_p \leq 33$, при котором данные полиномы устойчивы и, соответственно, робастно устойчива автоматическая система регулирования.

Коэффициент усиления регулятора, при котором перерегулирование системы с максимальными коэффициентами ориентировочно равно 20%, соответствует ранее найденному коэффициенту усиления регулятора (рисунок 4.3) и равен $K_p = 4$.

На рисунке 4.9 представлены графики переходных характеристик для максимально возможных – 1, средних – 2 и минимальных значений – 3 коэффициентов рассматриваемой автоматической системы при одинаковом коэффициенте усиления ПИ-регулятора $K_p = 4$.

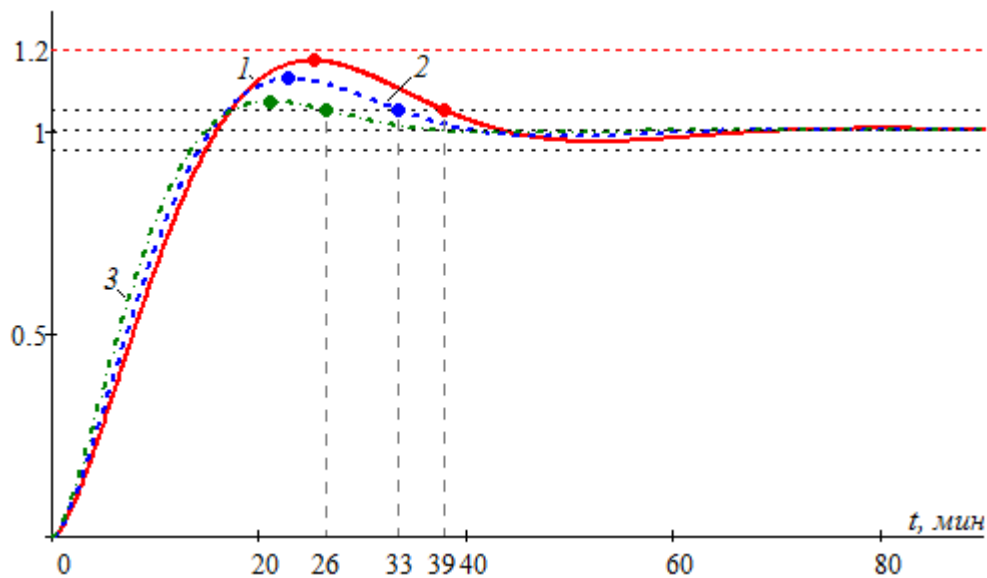


Рисунок 4.9 – Переходные характеристики автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолаза с учётом робастного управления

Анализ графиков на рисунке 4.9 показывает, что максимальное перегуливание $\sigma_{max} \approx 20\%$, а полученная система робастно-устойчива с выбранным значением K_p .

4.3.2. Расчёт робастной устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды с учётом возможной 5% погрешности в расчётах и измерениях

Робастное управление позволяет учитывать различного рода погрешности. Например, погрешность при изготовлении деталей, ошибки измерительных приборов, износ деталей в процессе эксплуатации, что приводит к неопределённостям в значениях параметров линейных звеньев системы. Другими словами, значения таких параметров, как постоянные времени T , коэффициенты передачи K или коэффициенты демпфирования, оказываются известными неточно [7]. То есть с помощью расчёта робастной устойчивости можно учесть указанные выше параметры с учётом 2-5% погрешности измерения и подобрать необходимый коэффициент усиления [7, 25].

Коэффициенты уравнения для $\Delta\%$ погрешности находятся по следующим формулам (4.38):

$$\begin{aligned} \underline{a} &= \left(1 - \frac{\Delta\%}{100}\right)a; \\ \bar{a} &= \left(1 + \frac{\Delta\%}{100}\right)a. \end{aligned} \tag{4.38}$$

где, \bar{a} – верхнее (с учётом погрешности) значение коэффициента, \underline{a} – нижнее значение коэффициента.

Для рассмотрения возьмём передаточную функцию объекта регулирования:

$$W_o = \frac{K_e K_{od}}{(T_e p + 1)(T_{od} p + 1)}.$$

Рассчитаем коэффициент передачи K_e и постоянную времени T_e с учётом 5% погрешности:

$$\underline{K}_e = 0.76; \bar{K}_e = 0.84;$$

$$\underline{T}_e = 0.66; \bar{T}_e = 0.73.$$

Также, как и ранее, считаем, что с течением времени меняются: коэффициент передачи одежды – $0.1 \leq K_{od} \leq 0.15$; и постоянная времени одежды – $5.2 \leq T_{od} \leq 10.4$.

Следовательно, будем рассматривать изменение следующих коэффициентов:

$$0.1 \leq K_{od} \leq 0.15$$

$$0.76 \leq K_e \leq 0.84$$

$$5.2 \leq T_{od} \leq 10.4$$

$$0.66 \leq T_e \leq 0.73$$

$$1.85 \leq T_u \leq 2.75$$

Степень характеристического полинома осталась прежней – $n = 4$, следовательно, необходимо, чтобы были устойчивы полиномы $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$ [25].

С помощью расчётов устойчивости методом Рауса-Гурвица (приложение б), получили коэффициент усиления $K_p \leq 17$ при котором характеристические полиномы $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$ устойчивы.

Коэффициент усиления ПИ-регулятора K_p при котором относительное перерегулирование системы не превышает 20%, найдём с помощью построения параметров колебательности и годографа разомкнутой системы с максимальными параметрами, рисунок 4.10.

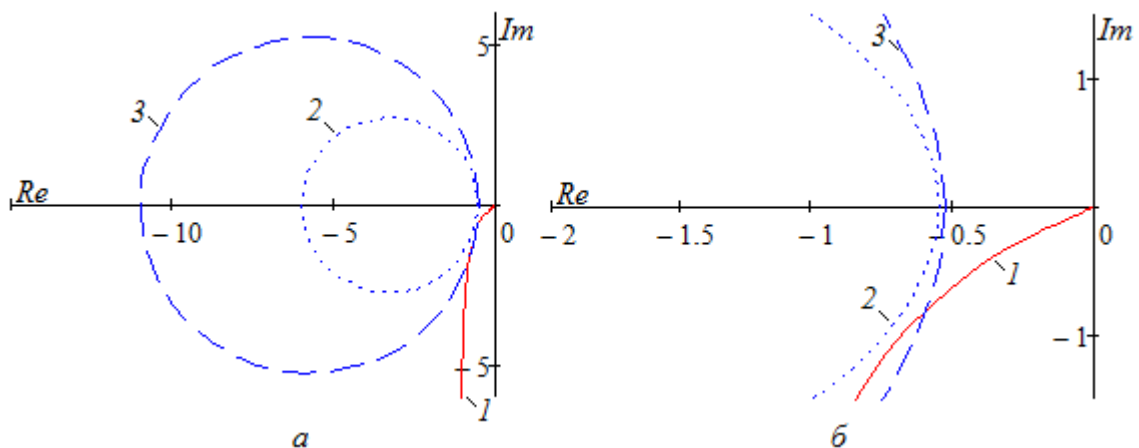


Рисунок 4.10 – Годограф разомкнутой системы (1) и показатели колебательности с заданным радиусом $M = 1.2$ (2), $M = 1.1$ (3).

Годограф, представленный на рисунке 4.10, построен для системы, в которой коэффициент усиления регулятора $K_p = 3.5$. Как видно из анализа графиков, показанных на рисунке 4.10, относительное перерегулирование системы с максимальными коэффициентами передаточных функций будет ориентировочно равно 20%. Построим графики переходных процессов (рисунок 4.11) для передаточных функций автоматической системы с максимально возможными – 1, средними – 2 и минимально возможными – 3 значениями параметров звеньев при одинаковом коэффициенте ПИ-регулятора.

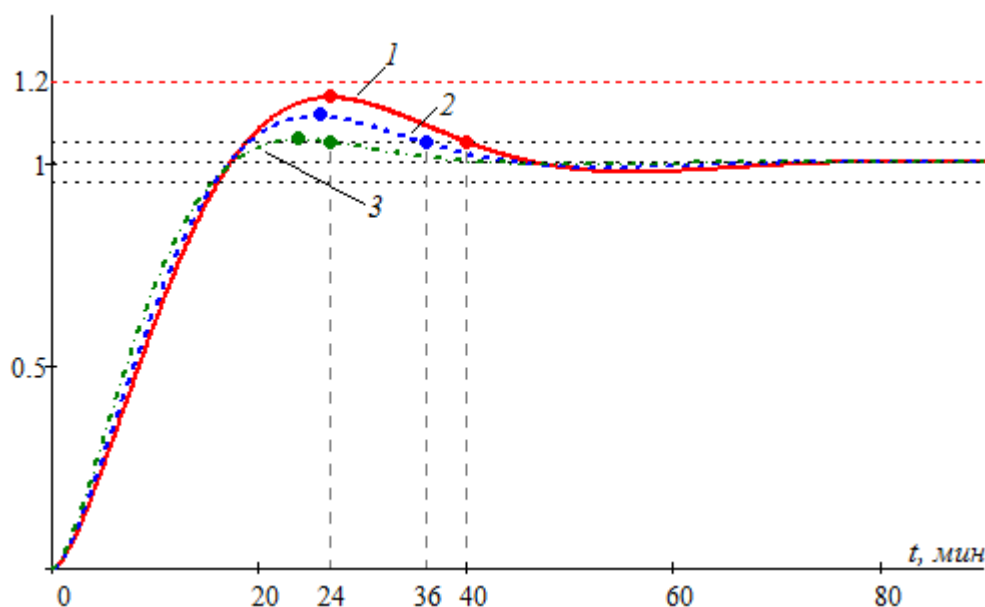


Рисунок 4.11 – Переходные характеристики АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолаза с учётом робастного управления при возможной 5% погрешности в расчётах и измерениях

Анализ графиков на рисунке 4.11 показывает, что максимальное перерегулирование $\sigma_{max} \approx 20\%$, а полученная система робастно-устойчива с выбранным значением K_p .

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

– Составленная структурная схема и проведённые расчёты позволили получить передаточные функции объекта регулирования для двух случаев: использование трубчатого и резинового водонагревательных элементов;

– С помощью построения и анализа логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик были получены коэффициенты усиления ПИ-регулятора АСР температуры водообогреваемой спецодежды;

– Проведённые расчёты позволили получить устойчивую автоматическую систему регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов для резинового и трубчатого нагревательных элементов;

– Приведено теоретическое обоснование в необходимости расчётов робастной устойчивости;

– Проведены расчёты, необходимые для создания математической модели робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов для двух случаев: использование гелиевой или воздушной смесей; с учётом 5% погрешности в расчётах и измерениях коэффициентов передаточных функций АСР.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОГРЕВАЕМОЙ СПЕЦОДЕЖДЫ ВОДОЛАЗОВ

После построения графиков температурных полей и определения места установки датчика температуры, важным этапом при проектировании водообогреваемой спецодежды и автоматической системы регулирования температуры данной спецодежды, является этап экспериментального моделирования работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды глубоководных водолазов. Для получения общей картины работы нагревательных элементов в составе АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов, в лабораторных условиях можно использовать электрический нагревательный элемент (рисунок 2.17). Использование данного элемента обуславливается бóльшей простотой в реализации модели пакета одежды и АСР температуры для лабораторных испытаний.

Целью данных экспериментов является постановка и решение следующих задач:

1. Создание модели пакета спецодежды водолазов как элемента автоматической системы регулирования с учётом тепловых свойств внешней среды и нетермостатированного участка тела человека.

2. Построение динамической характеристики нагревательного элемента и её аппроксимация.

3. Моделирование работы АСР температуры спецодежды с релейным, П и ПИ-регуляторами.

4. Исследование работы релейного регулятора с микроконтроллером;

5. Исследование температуры нагревательного элемента с размещением датчиков на внутренней поверхности (обращённой к человеческому телу) нагревательных элементов и на поверхности кожи. Сравнение полученных результатов с результатами расчётов, полученных с помощью метода сеток.

5.1. Динамическая характеристика нагревательного элемента в спецодежде водолаза

На рисунке 5.1 показана модель системы «человек-одежда-окружающая среда», где 1 – ёмкость с водой; 2 – гидрокombineзон; 3 – датчик температуры; 4 – утеплитель (из вспененного полиэтилена); 5 – проволочный нагревательный элемент; 6 – х/б нательное бельё; 7 – нетермостатированный участок человеческого тела; 8 – ёмкость с горячей водой, заменяющая ядро человека.

Указанные составляющие модели системы «человек-одежда-окружающая среда» помещаются в короб для уменьшения теплопотерь в воздушную среду [11].

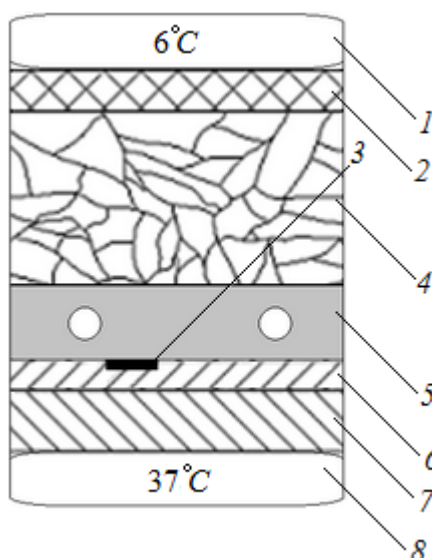


Рисунок 5.1 – Модель системы «человек-одежда-окружающая среда»

На основании технического задания на разработку электрообогреваемой спецодежды, ток, передаваемый по кабелю питания, не должен превышать 15 А. В качестве напряжения питания спецодежды необходимо использовать источники напряжения, со значением не превышающим 24 ± 2 В [11, 30]. Мощность нагревательного элемента 40 Вт.

В качестве первого этапа исследований производился анализ динамической характеристики нагревательного элемента.

Произведём аппроксимацию полученного графика с целью определения постоянной времени нагревательного элемента переходной характеристикой аperiodического звена I порядка с запаздыванием, рисунок 5.2.

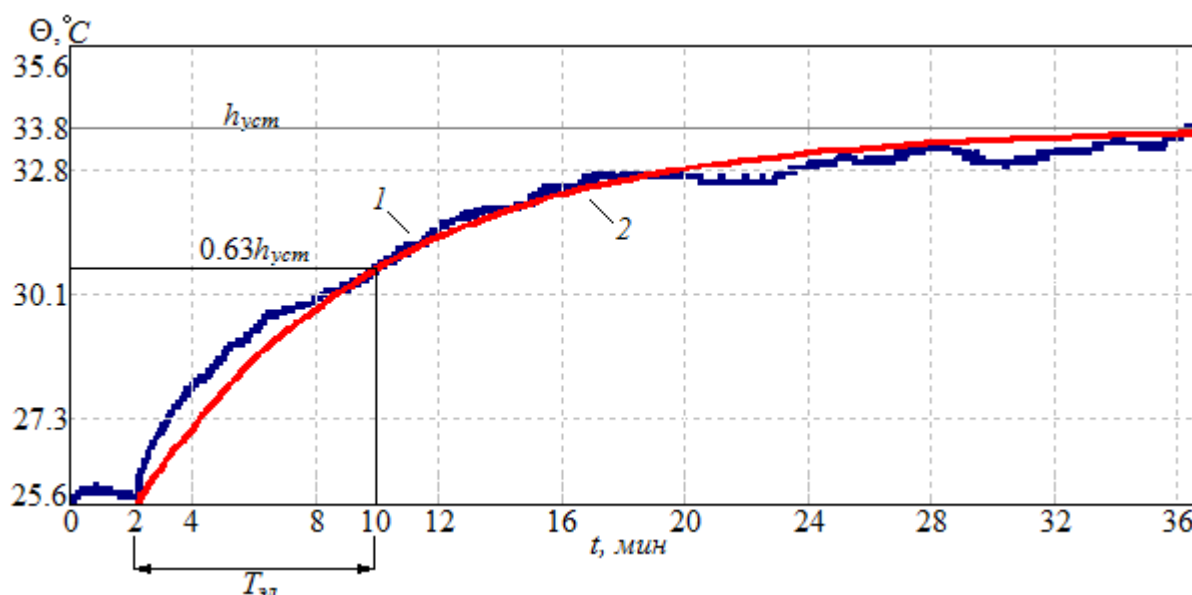


Рисунок 5.2 – Аппроксимация динамической переходной характеристики нагревательного элемента. 1 – экспериментальный, 2 – теоретический графики переходной характеристики нагревательного элемента

1. Участок запаздывания τ от 0 до 2 мин.

2. Откладываем на оси ординат значение $0.63h_{уст}(t)$. Опускаем перпендикуляр от точки пересечения $0.63h_{уст}(t)$ на ось абсцисс для получения времени t .

3. Находим постоянную времени $T_{эл} = t - \tau = 8$ мин.

4. Коэффициент передачи нагревательного элемента K_n нашли следующим образом [11]: $K_n = \frac{\Delta\Theta S_{эл}}{Q_{эл}}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$. Площадь нагревательного элемента

$S_{эл} = 0.0875 \text{ м}^2$, мощность элемента $Q_{эл} = 40 \text{ Вт}$. $\Delta\Theta = 8.2 \text{ °C}$, следовательно коэффициент передачи $K_n \approx 0.02 (\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$.

Коэффициент передачи K_n является величиной теплового сопротивления двух параллельных участков спецодежды: 1. От нагревательного элемента до окружающей среды; 2. От нагревательного элемента до термостатированного участка человеческого тела [11].

В результате полученных значений коэффициентов передаточной функции нагревательного элемента, и построив теоретический график переходной характеристики, можно сказать, что ошибка аппроксимации находится в пределах 5%.

В результате получаем передаточную функцию нагревательного элемента (5.1):

$$W_n(p) = \frac{0.02e^{-2p}}{8p + 1} \quad (5.1)$$

Далее произведём компьютерное моделирование работы автоматической системы регулирования температуры с релейным, П и ПИ-регуляторами.

5.2. Компьютерное моделирование работы автоматической системы регулирования температуры спецодежды с релейным, П и ПИ-регуляторами

Рассматриваемая структурная схема автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды представлена на рисунке 5.3.

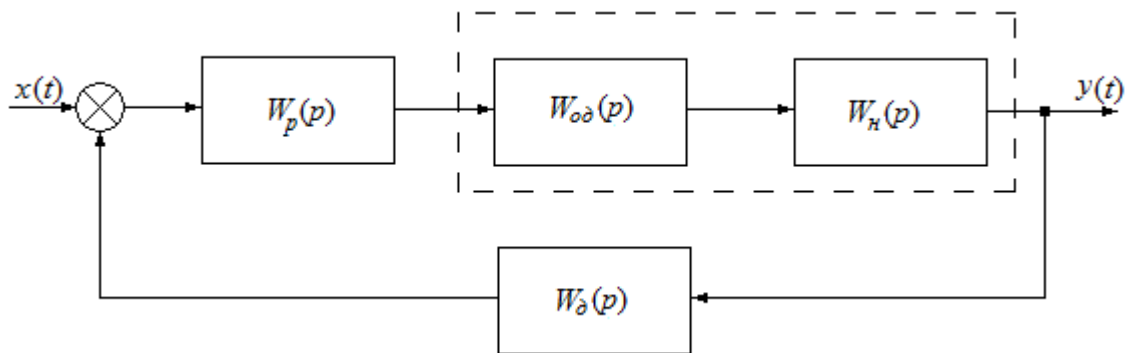


Рисунок 5.3 – Структурная схема автоматической системы регулирования

$W_p(p)$ – передаточная функция регулятора, $W_n(p)$ – передаточная функция нагревательного элемента, $W_{od}(p)$ – передаточная функция одежды, $W_d(p)$ – передаточная функция датчика

Передаточная функция замкнутой АСР представленной на рисунке 5.3 имеет вид:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_p(p)W_n(p)W_{од}(p)}{1 + W_p(p)W_n(p)W_{од}(p)W_{д}(p)}.$$

Передаточная функция одежды имеет вид:

$$W_{од}(p) = \frac{K_{од}}{T_{од}p + 1}.$$

Постоянная времени $T_{од}$ получена по формуле (4.13) и равна 9.7 мин.

$K_{од}$ нашли следующим образом [11]:

$$K_{од} = \frac{\Delta Q}{S_{эл} \Delta \Theta} \approx 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}). \quad (5.2)$$

5.2.1. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с релейным регулятором

Зона неоднозначности b рассматриваемого двухпозиционного релейного регулятора равна $\pm 1^\circ\text{C}$.

На рисунках 5.4 и 5.5 представлены графики переходной характеристики автоматической системы регулирования температуры спецодежды с релейным регулятором, построенным с помощью компьютерного моделирования.

Как и в лабораторных испытаниях, при компьютерном моделировании работы АСР температуры обогреваемой спецодежды с релейным регулятором на вход системы подаётся напряжение питания $U_{пит} = 24 \pm 2\text{В}$. Мощность нагревательного элемента 40 Вт. Это позволило наглядно сравнить графики, полученные с помощью компьютерного моделирования, с результатами лабораторных экспериментов.

Датчик температуры автоматической системы регулирования, расположенный в слоях одежды, в зависимости от внешних условий, в начальный момент времени может показывать температуру, равную 22-30°C. Поэтому графики переходных характеристик, построенных с помощью компьютерного

моделирования при релейном регулировании, рассматриваются со значения температуры $\Theta_0 \approx 25^\circ\text{C}$.

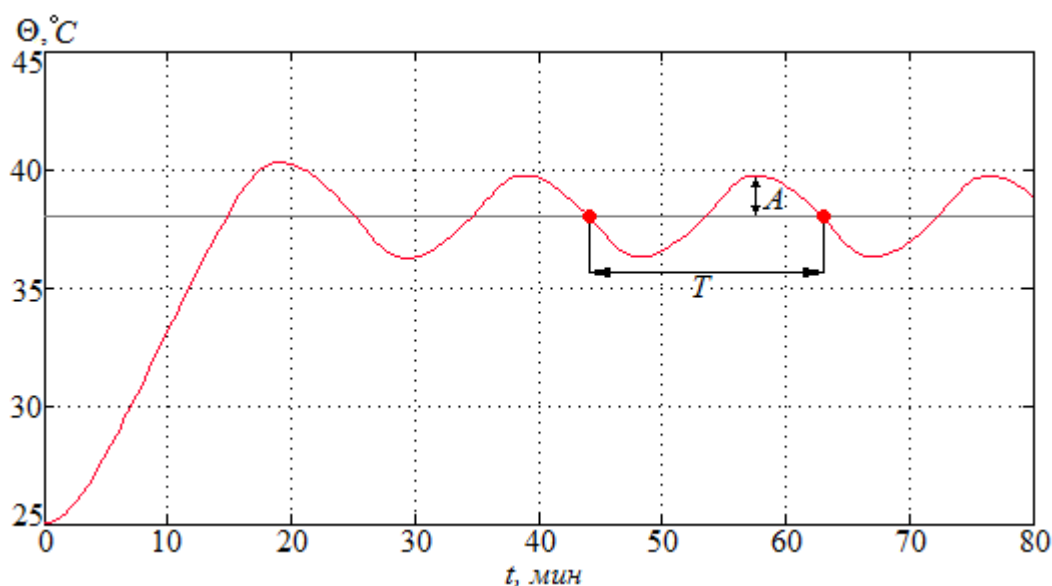


Рисунок 5.4 – Переходная характеристика компьютерной модели АСР температуры спецодежды водолаза с релейным регулятором

Анализ графиков на рисунках 5.4 и 5.5 показывает, что период колебаний $T \approx 18 \text{ мин}$, амплитуда колебаний $A = 1.7^\circ\text{C}$.

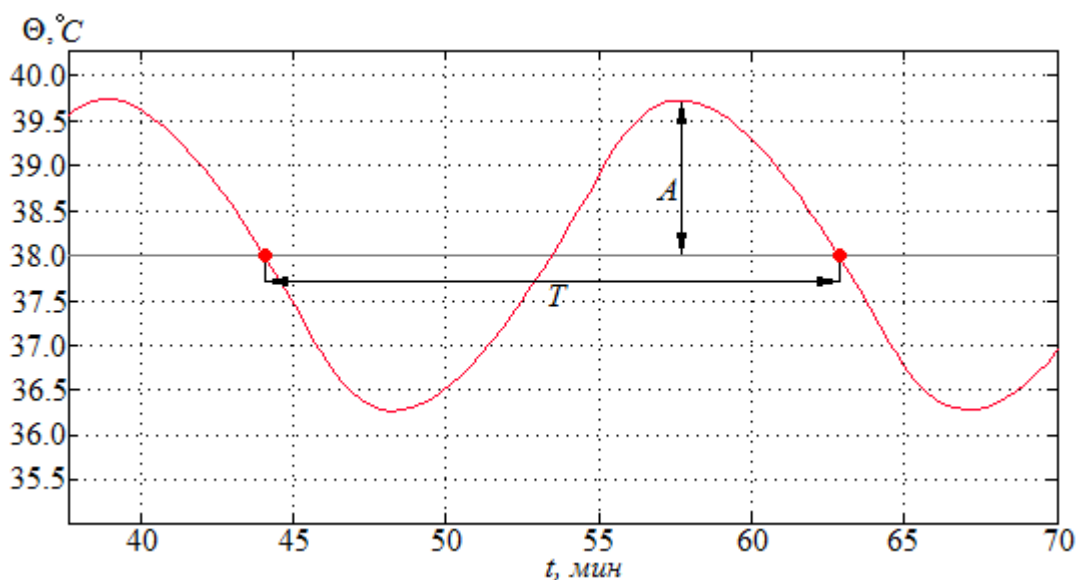


Рисунок 5.5 – Переходная характеристика компьютерной модели АСР температуры обогреваемой одежды с релейным регулятором

Релейное регулирование приводит к появлению автоколебаний, что, в свою очередь, может влиять на тепловые ощущения водолаза. Большие значения амплитуды автоколебаний могут вызывать ощущения дискомфорта.

Для использования релейного регулятора необходимо уменьшать зону неоднозначности до $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Иначе необходимо использовать линейные регуляторы.

5.2.2. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с П-регулятором

Передаточная функция П-регулятора имеет вид:

$$W_p(p) = K_p.$$

Структурная схема рассматриваемой АСР температуры спецодежды представлена на рисунке 5.3.

Коэффициент усиления регулятора найдём с помощью построения и анализа логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик, рисунок 5.6.

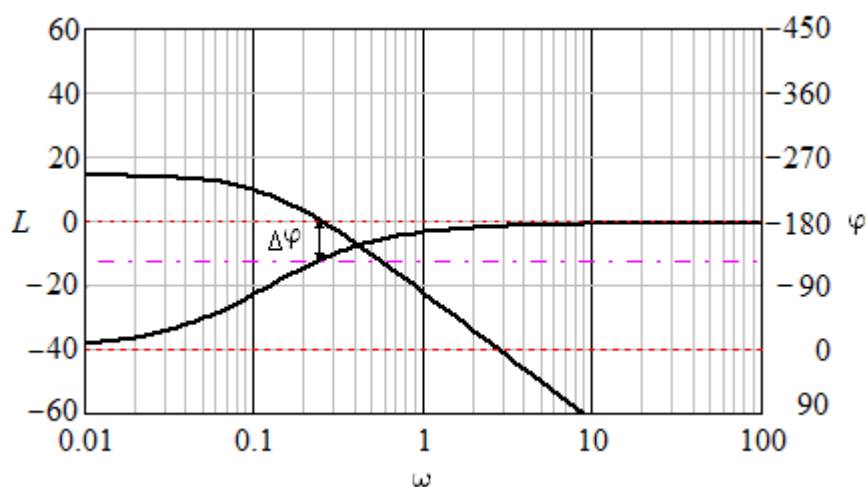


Рисунок 5.6 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы с использованием П-регулятора

Данная ЛАФЧХ построена для системы с П-регулятором, коэффициент усиления которого $K_p = 3.9$. Как видно из рисунка 5.6, запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \approx 55^\circ$ – система устойчива. Рассмотрим реакцию системы на единичный входной сигнал и построим график переходной характеристики с найденным коэффициентом усиления, рисунок 5.7.

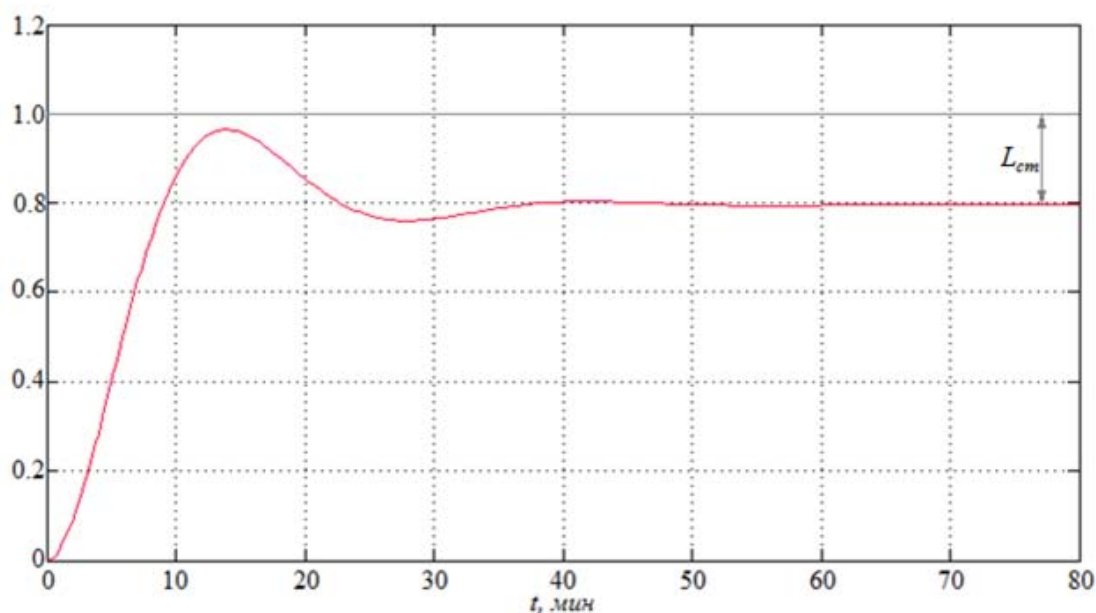


Рисунок 5.7 – Переходная характеристика компьютерной модели АСР температуры обогреваемой одежды с П-регулятором

Анализ графика, представленного на рисунке 5.7 показывает, что с выбранным коэффициентом усиления П-регулятора переходная характеристика системы имеет статическую ошибку $L_{ст} \approx 20\%$ ($\sim 8^\circ\text{C}$). Данная ошибка в некоторых случаях может достигать 10°C , и не может быть сделана как угодно малой путем увеличения коэффициента усиления регулятора K_p , поскольку с ростом K_p сначала падает запас устойчивости по фазе, а в последствии возникают периодические колебания (система теряет устойчивость) [66]. Помимо этого мощность обогрева ограничена силой тока кабелей питания. В некоторых случаях для повышения качества регулирования можно применить метод компенсации потерь [60, 66], однако в нашем случае целесообразнее рассмотреть использование ПИ-регулятора.

5.2.3. Компьютерное моделирование работы АСР температуры спецодежды с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_p(T_i p + 1)}{T_i p}.$$

Коэффициент усиления регулятора K_p найдём, как и при рассмотрении П-регулятора, с помощью построения и анализа логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики, рисунок 5.8.

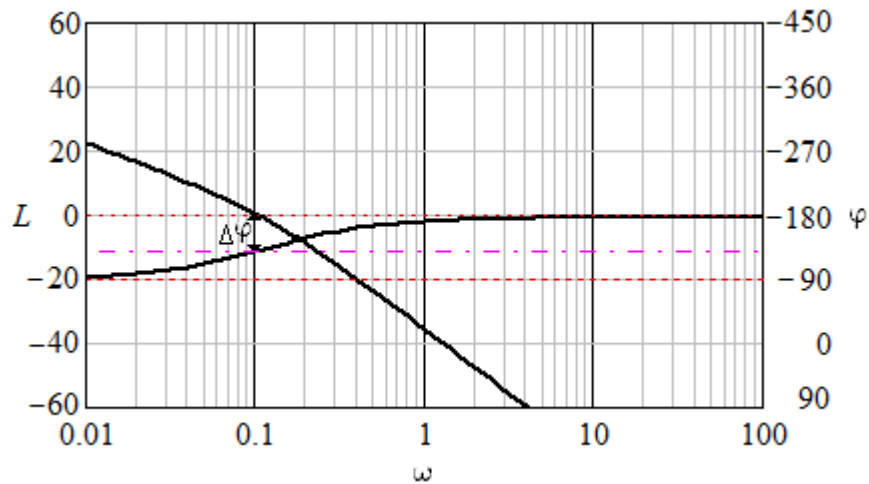


Рисунок 5.8 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы с использованием ПИ-регулятора

ЛАФЧХ на рисунке 5.8 построена для системы с ПИ-регулятором, коэффициент усиления которого $K_p = 1.1$, а постоянная времени интегрирования $T_i = \sqrt{T_{од} \cdot T_{эл}} = 8.8$ мин.

Анализируя ЛАФЧХ на рисунке 5.8, можно сказать, что запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \approx 50^\circ$ – система устойчива с выбранным значением коэффициента усиления K_p .

Далее рассмотрим реакцию системы на единичный входной сигнал и построим график переходной характеристики АСР температуры обогреваемой спецодежды с ПИ-регулятором, рисунок 5.9.

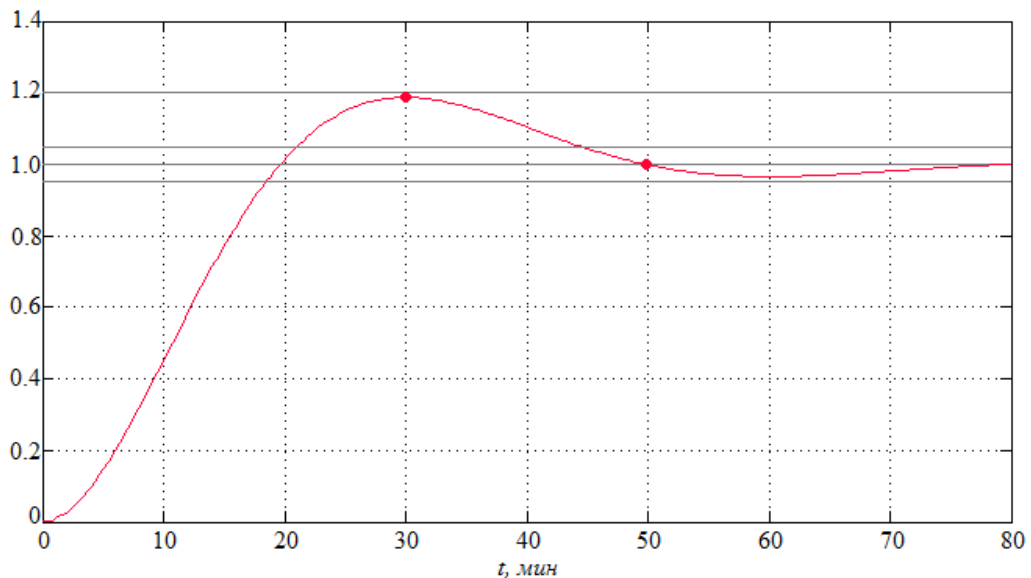


Рисунок 5.9 – Переходная характеристика компьютерной модели АСР температуры обогреваемой одежды с ПИ-регулятором

Анализ графика на рисунке 5.9 показывает, что перерегулирование системы σ с выбранным значением коэффициента усиления системы $K_p = 1.1$ ориентировочно равно 20%, время переходного процесса составляет ~ 50 мин.

В результате можно сказать, что по сравнению с П-регулятором, ПИ-регулятор обеспечивает наибольшую точность регулирования и его использование предпочтительнее.

В случаях, когда погружения водолаза производятся в наихудших для человека условиях, и значение регулируемой температуры не должно отклоняться от заданных значений, использование ПИ-регулятора возможно при условии точного определения коэффициентов регулятора K_p и T_u , которые меняют своё значение в зависимости от глубины погружения. Также важно учитывать и ограничения по току питания. То есть использование ПИ-регулятора возможно только в случае создания робастно-устойчивой системы. Как говорилось выше, использование релейного регулятора также возможно, однако зона неоднозначности в таком случае должна быть минимально возможной. Использование релейного регулятора в некоторых случаях может оказаться проще и экономичнее. Рассмотрим использование релейных регуляторов в

составе автоматической системы регулирования температуры обогреваемой одежды в лабораторных условиях.

5.3. Лабораторное исследование работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой одежды с релейным регулятором

Лабораторные эксперименты проводились неоднократно, с целью получения статистических данных о переходных процессах при релейном регулировании температуры нагревательного элемента, и дальнейшего анализа полученных данных. Целью данного раздела является сопоставление графиков переходных процессов АСР температуры обогреваемой одежды, полученных при использовании двух регуляторов: на основе МК ATtiny45 и промышленного регулятора МИНИТЕРМ-400 МЗТА. Так же полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами, полученными с помощью компьютерного моделирования работы АСР температуры обогреваемой спецодежды, и с результатами расчётов по методу «сеток».

При исследовании АСР температуры обогреваемой спецодежды водолаза с регулятором МИНИТЕРМ-400 в качестве датчика использовалась медь-константановая термопара. При рассмотрении работы АСР температуры обогреваемой спецодежды с МК ATtiny45 использовался датчик типа DS18B20 (рисунок 5.10).

Датчик DS18B20 фирмы Dallas Semiconductor - цифровой термометр с программируемым разрешением от 9 до 12 бит, которое может сохраняться в EEPROM памяти прибора. Диапазон измерений температуры от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Время оцифровки температуры для 12 разрядов около 750 мсек [49].

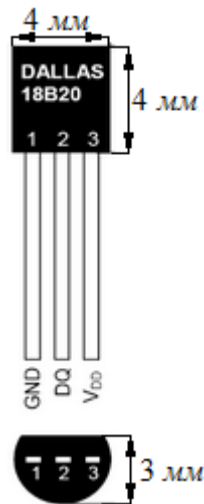


Рисунок 5.10. Датчик температуры DS18B20

Во время проведения экспериментов по исследованию работы релейного регулятора температуры обогреваемой одежды водолаза, датчики размещались на внутренней поверхности нагревательного элемента (обращённой к человеческому телу).

Нагревательный элемент, использовавшийся для лабораторных экспериментов, представляет собой проволочный нагревательный элемент (рисунок 2.17)

Далее приведены результаты лабораторных экспериментов с указанными регуляторами АСР температуры обогреваемой спецодежды.

5.3.1. Исследование работы АСР температуры обогреваемой спецодежды водолаза с использованием регулятора МИНИТЕРМ-400

На рисунке 5.11 показан график переходной характеристики в одном из проведённых экспериментов с регулятором МИНИТЕРМ-400. Напряжение питания $U_{пит} = 24 \pm 2 В$, электрическая мощность $Q = 40 Вт$, поверхностная плотность теплового потока $457 Вт/м^2$. Зона неоднозначности регулятора в данном случае составляла $\pm 1^\circ C$.

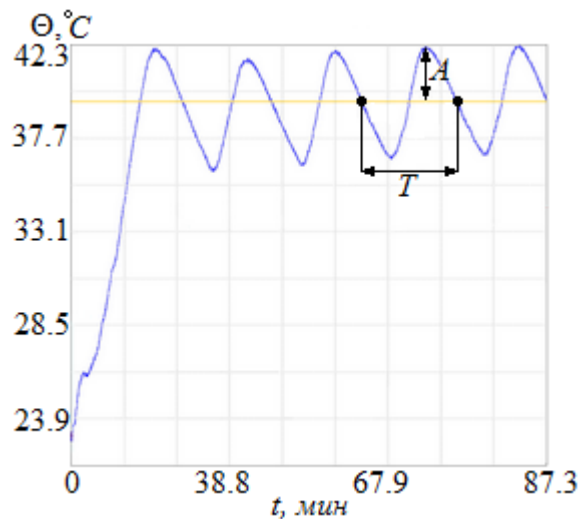


Рисунок 5.11 – График переходного процесса АСР температуры обогреваемой спедежды с включённым регулятором МИНИТЕРМ-400

Анализируя график на рисунке 5.11. можно определить амплитуду и период автоколебаний: $A \approx 2.6^{\circ}\text{C}$, $T \approx 17.7$ мин; средняя температура нагревательного элемента 39.6°C .

Датчик температуры и его расположение имеет определённое влияние на графики переходных процессов температуры АСР. Расположение датчиков температуры может привести к необъективной картине распределения температуры в слоях спецодежды и, как следствие, будет возникать ошибка в регулировании температуры нагревательного элемента/теплоносителя. Инерционность датчиков определяет характер пиков автоколебаний, что также оказывает влияние на характер переходного процесса.

Сравнивая полученные результаты компьютерного моделирования (рисунки 5.4 и 5.5) и результаты эксперимента работы АСР температуры с регулятором МИНИТЕРМ-400 (рисунок 5.11) можно сказать, что значение амплитуды для компьютерного моделирования меньше на 0.9°C , а значение периода больше на ~ 1 мин.

Рассмотрим переходные характеристики, полученные в результате эксперимента с использованием релейного регулятора, сделанного на основе микроконтроллера AVR ATtiny45.

5.3.2. Исследование работы АСР температуры обогреваемой спецодежды водолаза, с использованием регулятора на основе МК ATtiny45

Рассмотрение работы регулятора на основе микроконтроллера ATtiny45 в составе АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов обусловлено актуальной проблемой, связанной с минимизацией размеров и веса используемых для этих целей регуляторов.

Данная проблема обусловлена тем фактом, что одежда состоит из секций, которые обогревают определённые части тела человека. Температура различных участков тела человека имеет своё оптимальное значение [11], отклонение от которого может привести к ощущениям дискомфорта водолаза. Наиболее актуально решение данной задачи для электрических нагревательных элементов, используемых в обогреваемой одежде. Для нагревательных элементов, использующих в качестве теплоносителя горячую воду данная проблема актуальна в меньшей степени.

Для решения задачи по регулированию температуры отдельных секций обогреваемой спецодежды, можно воспользоваться следующими вариантами:

- Размещением одного датчика в районе наиболее оптимальной для регулирования секции. В работе [11] в качестве такого места предлагается поясничная область, как геометрически центральная часть тела человека, которая при вращении водолаза в вертикальной плоскости, имеет наименьшие усредненные разбросы температуры в различных участках одежды при воздействии случайных факторов;

- Размещением датчиков на каждой из секций и управлением расположенных в них температурой нагревательных элементов одним регулятором. Данный способ также рассматривался профессором кафедры «Автоматика» Московского государственного университета дизайна и технологии, к.т.н. Ефремовым В.В.

Однако наиболее универсальным является как раз возможность размещения регуляторов в каждой из секций обогрева спецодежды. Данное решение позволит производить мониторинг и быстрое регулирование температуры конкретных участков человеческого тела; а также позволит настроить робастное управление конкретной секции, что предотвратит возможное обжигание или переохлаждение водолаза в определённых случаях: изменение гидростатического давления при смене положения водолаза с образованием складок и вздутий в одежде, при опускании и подъёме рук выше груди, при котором свободный газ в одежде заполняет перчатки и, как следствие, увеличивается толщина изоляционного слоя [11]. Как видно, вариант с размещением нескольких регуляторов в слоях спецодежды является наиболее универсальным и в тоже время наиболее сложным в реализации.

И как говорилось ранее, для решения поставленной задачи необходимо создание регулятора с минимальными значениями размера и веса.

Лабораторные эксперименты по исследованию работы АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов с регулятором MP707R, на основе МК ATtiny45 [69], проводились с целью получения переходных характеристик и оценки качества регулирования регулятора на основе МК семейства AVR. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейших исследований регуляторов на основе многофункциональных микроконтроллеров семейства AVR в составе АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов.

О микроконтроллерах AVR можно сказать следующее: преимуществами данных МК является низкое энергопотребление и высокая степень интеграции. За счёт этого они уже нашли широкое применение в производстве и в быту, а также и для лабораторных исследований в других областях науки [60]. Данные МК, в случае необходимости, позволяют реализовать не только релейный закон регулирования, но также и П-закон с компенсацией статической ошибки, и ПИ-закон [60]. Программирование данных микроконтроллеров может производиться на языках «Assembler» и «С», а также для программирования данных устройств на

рынке представлено большое количество различных программных продуктов, что позволяет подобрать наиболее подходящий инструментарий для разработок на основе МК AVR.

Регулятор на основе микроконтроллера ATtiny45, рассматриваемый в данной работе, конструктивно выполнен на двусторонней печатной плате из фольгированного стеклотекстолита, рисунок 5.12.

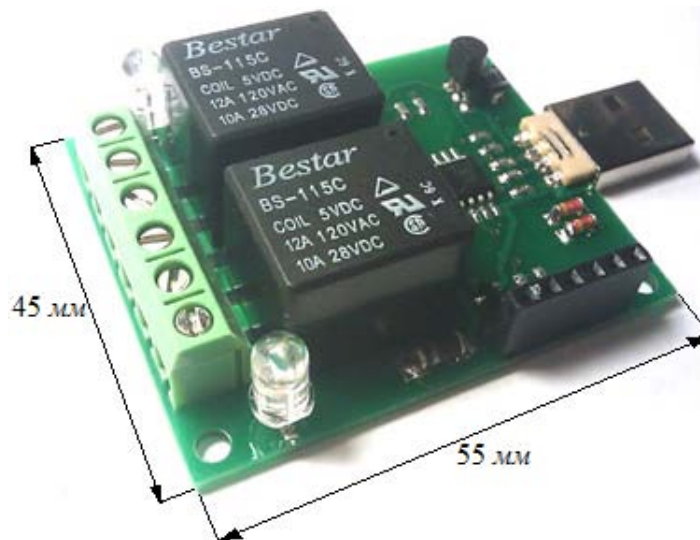


Рисунок 5.12. Плата MP707R с микроконтроллером AVR ATtiny45

Через USB-разъём устройство подключается к портативному компьютеру, что позволяет сразу же анализировать экспериментальные данные. В качестве исполнительного устройства на данной плате используется реле, что позволяет включать и выключать нагрузки при изменении температуры [69]. На рисунке 5.13 представлена электрическая принципиальная схема платы, на которой и выполнен регулятор.

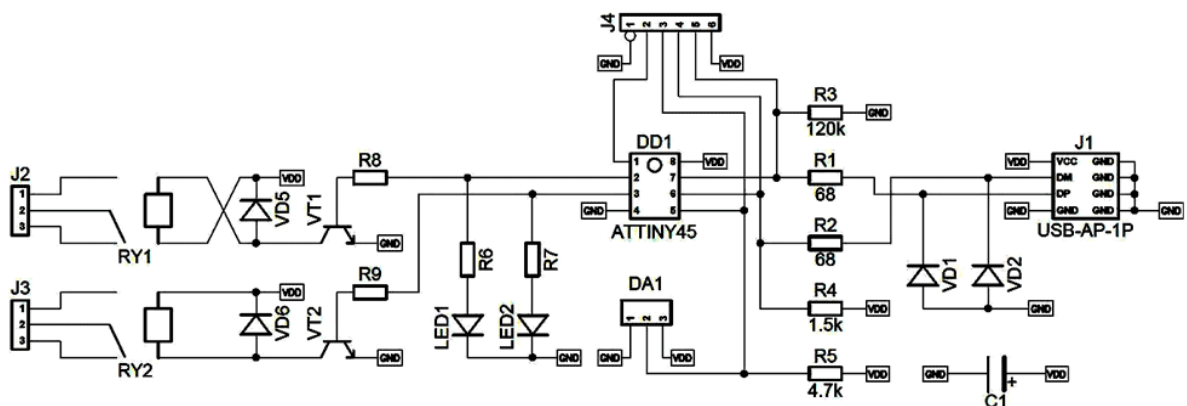


Рисунок 5.13 – Электрическая принципиальная схема платы MP707R

Полученный график переходной характеристики для одного из экспериментов с регулятором на основе МК ATtiny45 представлен на рисунке 5.14. Зона неоднозначности релейного регулятора для данного случая, как и для предыдущего, $b = \pm 1^\circ\text{C}$.

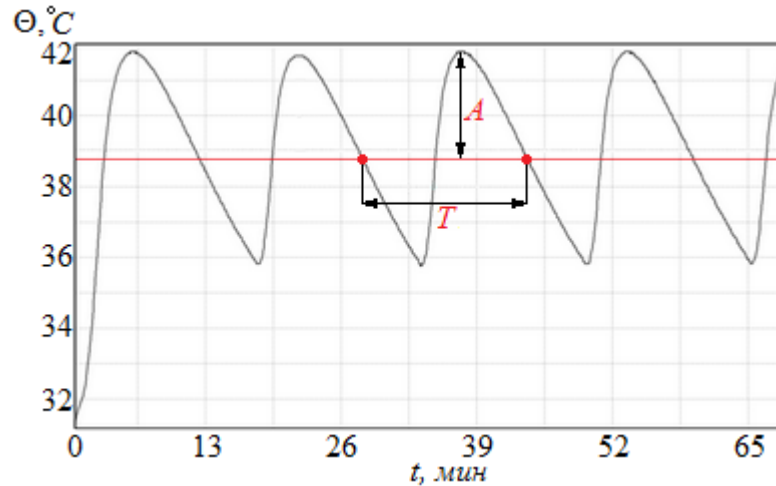


Рисунок 5.14 – График переходного процесса АСР с регулятором на основе МК ATtiny45

Анализ графика на рисунке 5.14 показывает, что амплитуда автоколебаний данного переходного процесса $A \approx 2.8^\circ\text{C}$, а период автоколебаний $T \approx 15 \text{ мин}$.

В итоге можно сказать, что переходная характеристика, показанная на рисунке 5.14, полученная в результате экспериментов с релейным регулятором, сделанном на основе МК, имеет незначительные отличия от переходной характеристики, представленной на рисунке 5.11, которая была получена во время одного из экспериментов с промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400.

Сравнивая переходную характеристику на рисунке 5.14 и результаты, полученные в с помощью компьютерного моделирования (рисунки 5.4 и 5.5), можно сказать, что значение амплитуды для компьютерного моделирования меньше на 1.1°C , а значение периода T больше на $\sim 3 \text{ мин}$.

Подводя промежуточные выводы, можно сказать, что графики переходных характеристик АСР с регулятором, основанном на микроконтроллере ATtiny45, имеют незначительные отличия от графиков переходных характеристик АСР с промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400 (период автоколебаний температуры нагревательного элемента отличается на 2.7 мин , а амплитуда

автоколебаний отличается на $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). То есть можно сделать вывод о том, что при меньшем весе и объёме регулятора с МК, качество его работы аналогично промышленному регулятору. Основываясь на результатах исследований, можно сделать вывод о том, что регулятор на основе микроконтроллера ATtiny45 обеспечивает необходимую работу нагревательного элемента в лабораторных условиях.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейших разработок по созданию компактного регулятора на основе МК AVR, и позволяют также развивать начатые исследования и на основе представленного регулятора.

Анализируя полученные результаты, представленные на рисунках 5.4, 5.5, 5.11 и 5.14 можно сказать, что компьютерное моделирование позволяет получить данные, которые возможно использовать при проектировании и создании АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов.

Как говорилось ранее, для повышения точности регулирования и снижения амплитуды колебаний температуры на поверхности человеческого тела, которая может вызывать чувства дискомфорта у водолаза, можно использовать релейный регулятор с уменьшенной зоной неоднозначности.

Для того чтобы технологически не изменять рассмотренные регуляторы, построим с помощью компьютерного моделирования переходную характеристику АСР температуры обогреваемой спецодежды с релейным регулятором и уменьшенной зоной неоднозначности $b = \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 5.15).

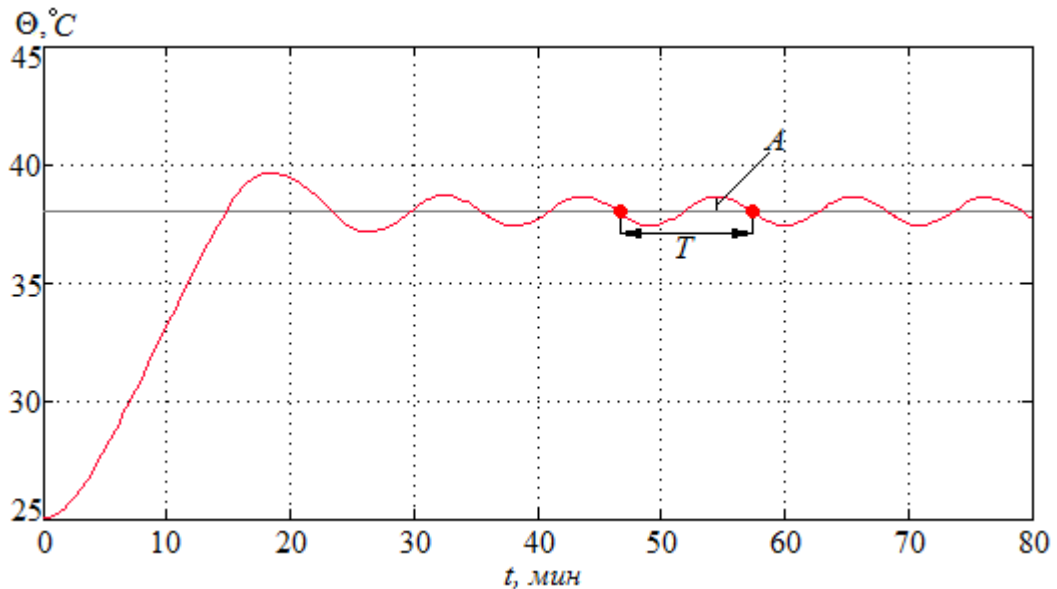


Рисунок 5.15 – Переходная характеристика компьютерной модели АСР температуры обогреваемой одежды с релейным регулятором и уменьшенной зоной неоднозначности $b = \pm 0.2^\circ\text{C}$

Из графика на рисунке 5.15 видно, что амплитуда колебаний A с уменьшенной зоной неоднозначности для компьютерной модели составляет 0.6°C , период колебаний $T = 10$ мин.

В итоге можно сказать, что с уменьшением зоны неоднозначности уменьшается и размах автоколебаний температуры нагревательного элемента, что гарантирует обогрев тела водолаза в диапазоне необходимых значений.

5.3.3. Построение переходных характеристик температуры нагревательного элемента и температуры на поверхности человеческого тела

Далее был проведён эксперимент, во время которого был использован ещё один датчик температуры, который располагался на поверхности «человеческого тела» в исследуемой модели пакета системы «человек-одежда-окружающая среда». Полученные результаты сравнивались с данными, получаемыми с помощью расчётов по методу «сеток».

На рисунке 5.16 представлены графики переходного процесса нагревательного элемента (а) и температуры на поверхности «человеческого тела» (б) при использовании регулятора на основе микроконтроллера AVR.

Из графиков на рисунке 5.16 видно, что амплитуда автоколебаний нагревательного элемента $A_1 \approx 2.6^\circ\text{C}$. Средняя температура нагревательного элемента 36.8°C ; амплитуда автоколебаний на поверхности человеческого тела $A_2 \approx 1.2^\circ\text{C}$, период автоколебаний $T_2 \approx 12 \text{ мин}$. Средняя температура на поверхности человеческого тела 35.6°C . Уменьшение среднего значения температуры на «поверхности человеческого тела» в конце эксперимента связано с остыванием горячей воды в ёмкости, которая имитировала ядро человеческого тела в модели пакета одежды «человек-одежда-окружающая среда».

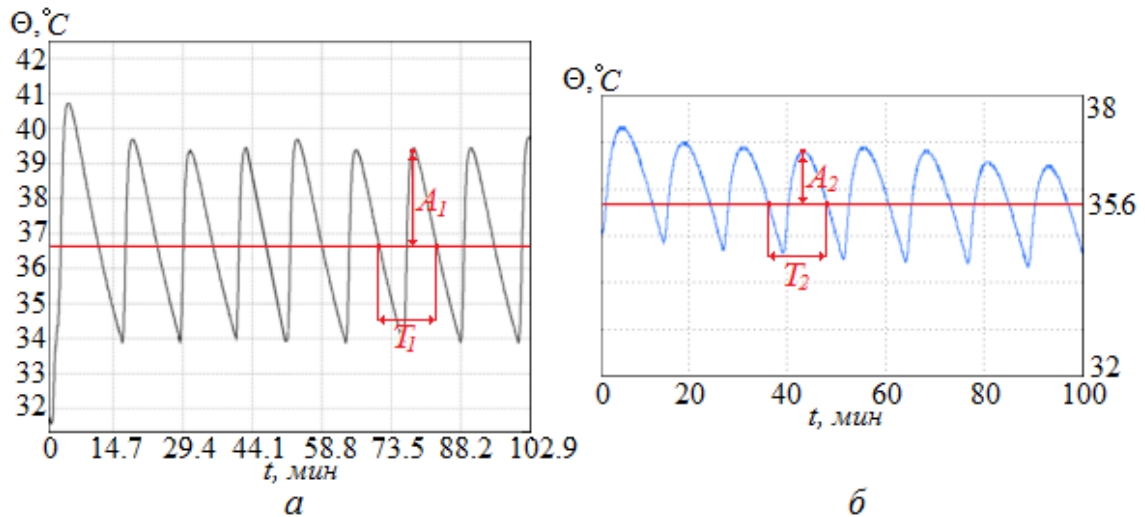


Рисунок 5.16 – Графики переходного процесса для нагревательного элемента (а) и температуры на поверхности человеческого тела (б)

Построим график температурного поля для данного случая и сравним расчётные результаты с результатами проведённого эксперимента. Во время эксперимента датчик, располагаемый на поверхности человеческого тела, фиксировался между точками 4, 9, 14 рисунок 2.19.

Температура электрического нагревательного элемента 37°C , температура внешней среды 6°C , среда – воздух. Результаты, полученные в ходе расчётов для данных условий приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения температуры в узлах пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» с электрическим нагревательным элементом

Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C	Номер точки	Температура, °C
1	8.8	12	33.5	23	34.0
2	17.6	13	34.0	24	34.5
3	36.1	14	34.5	25	8.8
4	36.7	15	8.7	26	17.3
5	8.8	16	17.0	27	34.3
6	17.3	17	33.2	28	34.8
7	34.3	18	33.8	29	35.2
8	34.8	19	34.3	30	8.8
9	35.2	20	8.8	31	17.6
10	8.8	21	17.1	32	36.1
11	17.1	22	33.5	33	36.7

По данным из таблицы 5.1 построен график температурного поля, который представлен на рисунке 5.17.

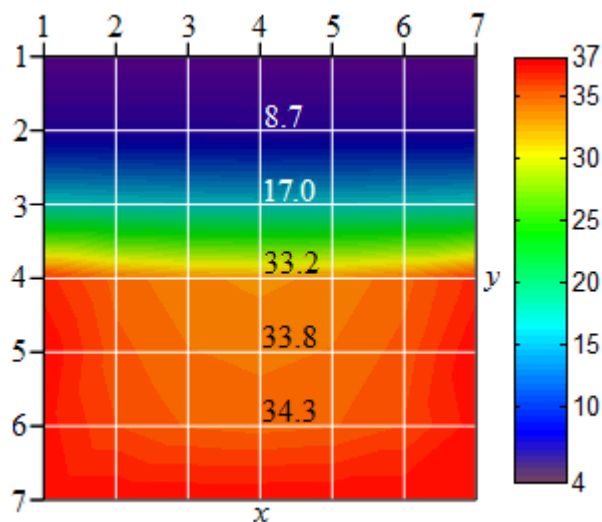


Рисунок 5.17 – Контурные графики температурного поля в двухмерных координатах при использовании электрического нагревательного элемента

Анализ данных из таблицы 5.1 и графиков на рисунках 5.16 и 5.17 показывает, что результаты, полученные в ходе экспериментов, с 5% погрешностью подтверждают результаты, полученные с помощью расчётов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

– Для исследований и проведенных экспериментов была создана модель пакета системы «человек-одежда-окружающая среда», которая позволила провести исследования двух регуляторов: МИНИТЕРМ-400 и платы MP707R с микроконтроллером ATtiny45;

– С помощью построения динамической характеристики нагревательного элемента и её последующей аппроксимации апериодическим звеном I порядка была получена передаточная функция нагревательного элемента и было проведено компьютерное моделирование и построение переходных характеристик для релейного, П- и ПИ-регуляторов автоматической системы регулирования температуры обогреваемой одежды;

– Проведённое компьютерное моделирование показало недостатки и достоинства рассмотренных регуляторов при использовании их в составе АСР температуры обогреваемой спецодежды. Однако компьютерное моделирование обладает погрешностью в диапазоне от 5 до 30% по сравнению с получаемыми экспериментальными результатами. Погрешность связана с тем, что компьютерное моделирование проводится для идеальных условий и не учитывает влияния внешней среды и специфику определённых моделей регуляторов. Данную погрешность необходимо учитывать при проведении компьютерного моделирования и анализа получаемых графиков переходных характеристик;

– Проведённые эксперименты показали, что регуляторы, основанные на микроконтроллерах семейства AVR, при одинаковом характере регулирования, имеют преимущество перед промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400 за счёт своих малых размеров. Микроконтроллеры AVR также позволяют реализовать различные законы регулирования, в зависимости от предъявляемых требований, что позволяет изготавливать многофункциональные устройства;

– В результате экспериментов по созданию АСР с релейным регулятором, и полученное в ходе данных экспериментов среднее значение температуры на

поверхности слоя нетермостатированного участка человеческого тела в установившемся режиме, с 5% погрешностью подтвердило расчётные данные, полученные с помощью метода сеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным предметом данной диссертационной работы является цель связанная с совершенствованием методов проектирования и способов реализации автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов.

Для достижения поставленной цели были проведены следующие исследования, эксперименты и компьютерное моделирование:

1. Проведён анализ графиков температурных полей для различных условий:

1.1. Тип используемого нагревательного элемента в составе пакета системы «человек-одежда-окружающая среда»;

1.2. Тип используемой дыхательной газовой смеси;

1.3. Тип используемого утеплителя в качестве одного из слоёв спецодежды;

1.4. Случай повышения влажности в слоях спецодежды водолаза.

В результате были получены данные, которые позволяют оценить температурный режим в слоях спецодежды водолаза. По итогам работы можно сказать, что метод «сеток», использованный в работе для расчёта и дальнейшего построения графиков температурных полей в обогреваемой спецодежде водолаза, является эффективным и простым в реализации с помощью современного программного обеспечения на ЭВМ;

2. С целью подтверждения результатов, полученных с помощью расчётов по методу «сеток», были проведены исследования, основанные на принципе электротепловой аналогии. Для данных исследований были созданы компьютерная и физическая модели. В результате можно сказать, что физическая модель с погрешностью в пределах 5% (для значений температуры на поверхности человеческого тела) подтверждает данные, полученные с помощью расчётов;

3. Итогом построения графиков температурных полей является обоснование места для установки датчика температуры в слоях спецодежды, а также определение значения температуры уставки регулятора;

4. После анализа и сопоставления графиков температурных полей можно сделать вывод о схожем характере распределения температуры в слоях спецодежды для электрического и водообогреваемых элементов. Это позволило провести лабораторные исследования работы электрического нагревательного элемента и получить примерную картину обогрева и водообогреваемых элементов;

5. Впервые были проведены необходимые расчёты для создания математической модели робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов. Результатом данных исследований является модель АСР температуры обогреваемой спецодежды, которая обеспечивает регулирование температуры теплоносителя в необходимых пределах для двух случаев: с учётом возможной 5% погрешности в расчётах коэффициентов передаточных функций; с учётом фактора «старения». Полученная модель АСР сохраняет необходимую работоспособность при небольшой ошибке в расчётах или в случае, когда в ходе работы, водолаз вынужден погружаться на бóльшую глубину;

6. Проведено компьютерное моделирование и анализ работы автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды с релейным двухпозиционным, П- и ПИ- регуляторами. Результатом данного моделирования является вывод о целесообразности использования в тех или иных случаях каждого из указанных регуляторов;

7. Создана лабораторная модель автоматической системы регулирования температуры обогреваемой спецодежды водолазов. Проведены исследования работы данной АСР с релейным регулятором на основе микроконтроллера ATtiny45 семейства AVR. В результате проведённых экспериментов можно сказать, что регуляторы, выполненные на основе данных микроконтроллеров, обеспечивают необходимое качество работы АСР. Микроконтроллеры AVR могут

использоваться для дальнейших исследований и создания компактного регулятора АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов. Также в результате данных исследований были подтверждены результаты, полученные в ходе расчётов по методу «сеток».

Библиографический список

1. Анисимов А.А. Исследование температурных полей в спецодежде водолаза /А.А. Анисимов, А.Г. Шелудько, В.В. Ефремов //Молодые учёные – XXI веку: тезисы докл. научн. конф. (Москва, 10-12 апреля, 2012). – Москва. – 2012. – С. 115.
2. Анисимов А.А. Экспериментальное исследование температурных полей в водообогреваемой спецодежде водолазов /А.А. Анисимов, В.В. Ефремов //ФГБОУ ВПО «МГУДТ»: сб. науч. тр. асп. – М. – 2013. – Вып.19. – С. 189-194.
3. Власенко О.М. К расчету нагревателя дыхательной смеси в составе АСР теплового режима в спецодежде глубоководного водолаза /О.М. Власенко, В.В. Ефремов, Э.М. Ромаш //Молодые ученые - развитию текстильной и легкой промышленности: сб. материалов междунар. конф. – Иваново /ИГТА. – 2003. – С. 229-230.
4. Власенко О.М. Оценка влияния возмущающих воздействий на АСР температуры дыхательной смеси в спецодежде глубоководных водолазов /О.М. Власенко, В.В. Ефремов, Э.М. Ромаш //Аспирант и соискатель. – 2003. №6 (19). – С.192-195.
5. Власенко О.М. Разработка автоматической системы регулирования температуры дыхательной смеси для обогреваемой спецодежды глубоководных водолазов: дис. ... канд. техн. наук. –М.: МГУДТ, 2009.
6. Власенко О.М. Экспериментальное исследование водонагревателя дыхательной смеси в спецодежде глубоководных водолазов /О.М. Власенко, В.В. Ефремов //Дизайн и технологии. – 2009. – 11. – С. 109-114.
7. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления: учеб. для вузов /А.Р. Гайдук. – М.: Высшая школа, 2010. – 415 с.
8. Галюк В.Х. Водолазные работы при обследовании и ремонте подводных нефтепроводов /В.Х. Галюк, К.А. Забела, Э.Р. Гольдин. – М.: ВНИИОЭНГ. – 1978. – 56 с.

9. Гривина И.В. Моделирование системы «человек – среда» при проектировании обогревательной одежды с автоматическим регулированием температуры: дис. ... канд. техн. наук. –М.: МТИЛП, 1982.

10. Динамические свойства одежды с электрообогревом как объекта автоматического регулирования /Ефремов В.В. и др. //Автоматизация технологических процессов легкой промышленности /МГАЛП. – М., 1993. –С. 127-131.

11. Ефремов В.В. Автоматическое регулирование температуры в спецодеждах водолазов: Монография /В.В.Ефремов. – М.: РИО МГУДТ, 2012. – 346 с.

12. Ефремов В.В. Исследование динамики переходных процессов в одежде при двухпозиционном регулировании температуры /В.В. Ефремов, А.Г. Шелудько, В.А. Суханов //Автоматизация технологических процессов легкой промышленности /МГАЛП. – М., 1993. – С. 131-135.

13. Ефремов В.В. Исследование качества регулирования температуры в электрообогреваемой одежде водолаза /В.В. Ефремов, В.В. Лебедева, И.И. Никитченко //Дизайн и технологии. – 2011. №21(63). – С. 70-74.

14. Ефремов В.В. Исследование нагревателя газового потока для специального снаряжения /В.В. Ефремов, А.Г. Шелудько, В.А. Суханов //Автоматизация технологических процессов легкой промышленности /МГАЛП. – М., 1993. – С. 139-143.

15. Ефремов В.В. Исследование робастно-устойчивой автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов /В.В. Ефремов, А.Г. Шелудько, А.А. Анисимов //Актуальные вопросы развития науки: сб. статей материалов междунар. научно-практ. конф. (Уфа, 14 февраля, 2014). – Уфа. – 2014. – С.50-53.

16. Ефремов В.В. Исследование температурных полей в обогреваемой спецодежде глубоководных водолазов /В.В. Ефремов, А.А. Анисимов //Дизайн,

технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности: сб. материалов междунар. конф. – Москва/ ФГБОУ ВПО «МГУДТ». – 2013. – С. 159-160.

17. Ефремов В.В. Исследование температурных полей в спецодежде с точечными водонагревательными элементами /В.В. Ефремов, А.А. Анисимов //Дизайн и технологии. – 2012. – №27(69). – С. 62-68.

18. Ефремов В.В. Расчёт автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов при использовании трубчатого нагревательного элемента /В.В. Ефремов, А.Г. Шелудько, А.А. Анисимов //Вопросы технических наук: сб. статей материалов междунар. научно-практ. конф. – М.: Международный центр науки и образования, 2014. – №1-2(15). – С. 30-34.

19. Ефремов В.В. Расчёт робастно-устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолаза /В.В. Ефремов, А.Г. Шелудько, А.А. Анисимов //Дизайн и технологии. – 2013. – №34(76). – С. 75-79.

20. Ефремов В.В. Сравнение температурных полей в водообогреваемой спецодежде водолазов для двух типов нагревательных элементов /В.В. Ефремов, А.А. Анисимов //Дизайн и технологии. – 2012. – №32(74). – С. 97-102.

21. Ефремов В.В., Шелудько А.Г., Шестаков А.И. Исследование и разработка системы автоматического регулирования температуры электрообогреваемой одежды для спец. условий: отчёт по х/теме 8102, №81035549. – М.: МТИЛП. 1982.

22. Ефремов В.В., Шелудько А.Г., Шестаков А.И. Электрообогревательная система глубоководного водолазного снаряжения лёгкого типа. Технический проект. Архив МТИЛП. 1970.

23. Жаворонков А.И. Теоретические основы и методы проектирования обогревательной специальной одежды: дис. ... д-ра. техн. наук. – М.: МТИЛП, 1984.

24. Использование подводных методов при комплексном изучении гидробионтов Каспийского моря /А.М. Камакин и др. //Морские прибрежные экосистемы. Водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки: тезисы

докладов 3 междунар. науч. практ. конф. (Владивосток, 8-10 сент., 2008). – Владивосток: – 2008. – С. 75-76.

25. Ким Д. П. Теория автоматического управления. В 2-х т. Т. 1: Линейные системы /Д.П. Ким. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

26. Кутуева Ю.С. Цельнотканые технологии в производстве одежды специального назначения /Ю.С. Кутуева, Е.В. Лаврис, Е.Г. Андреева //Естеств. и техн. науки. – 2008. – №3. – С. 377-381.

27. Меренов И.В. Водолазное дело /И.В. Меренов, А.И. Смирнов, В.В. Смолин //Терминологический словарь – Л.: Судостроение, 1989. – 224 с. – Техника освоения океана.

28. Меренов И.В. Справочник водолаза: Вопросы и ответы /И.В. Меренов, В.В. Смолин. – Л.: Судостроение, 1985. – 210 с.

29. Михеев М.А. Основы теплопередачи: учеб. для вузов /М.А. Михеев. – 2-е изд. перераб. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1949. – 396 с.

30. Никитченко И.И. Исследование температурных параметров подкомбинезонного пространства глубоководного водолаза как объекта системы автоматического регулирования температуры искусственной среды обитания: дис ... канд. техн. наук: 05.13.06. / Никитченко Инна Игоревна. –М.: –МГУДТ, 2003.

31. Основные типы технологических объектов управления в автоматической системе регулирования температуры дыхательной смеси в водолазной спецодежде /М.А. Синицин и др. //Естеств. и техн. науки. – 2004. – №1. – С. 105-108.

32. Особенности воздействия среды с повышенной теплопроводностью на работу АСР температуры в обогреваемой одежде /В.В. Ефремов и др. //Автоматизация технологических процессов легкой промышленности /МГАЛП. – М., 1993. – С. 135-149.

33. Павлов Б.Н. Краткая история развития гипербарической физиологии и водолазной медицины /Б.Н. Павлов, В.В. Смолин, Г.М. Соколов. – М.: Слово. – 1999. – 67 с.

34. Пармузина М.С. Снаряжение и оборудование для проведения подводных работ в условиях низких температур /М.С. Пармузина //01 Единая служба спасения. – 2006. –№4. – С. 44-45.

35. Пат 2072939 Российская Федерация, МПК В 63 С 11/28, Н 05 В 3/36. Электрообогреваемый водолазный костюм /А.И. Смирнов, В.А. Сухих, А.Г. Шелудько – 93030206/11; заявл. 01.06.93; опубл. 10.02.97.

36. Пат 2182096 Российская Федерация, МПК В 63 С 11/28. Индивидуальная система активной теплозащиты человека на море /А.И. Демидов, М.Ш. Денисова, Ю.М. Длугоборский, В.А. Фриск, В.К. Доманский – 2000113131/28; заявл. 25.05.00; опубл. 10.05.02.

37. Подводная технология /В.А. Коробков и др. – Л.: Судостроение, 1981. – 240 с.

38. Подводные исследования на Каспии, их развитие и перспективы /А.М. Камакин и др. //Современное состояние и пути совершенствования научных исследований в Каспийском бассейне: сб. материалов междунар. конф. (Астрахань, 16-18 мая, 2006). – Астрахань: 2006. – С. 119-128.

39. Прогноз развития МСБ углеводородов и добычи нефти в РФ до 2030 года /А. Варламов и др. «Нефтегазовая вертикаль». – 2011. – №23-24. – С. 38-44.

40. Прогнозирование зависимости теплозащитных свойств композиционной системы пакета материалов от вида газонаполнителя и условий эксплуатации /Е.В. Винюкова и др. //Повышение эффективности технологических процессов и оборудования в текстильной промышленности. –М., –1993. – С. 70-72.

41. Смолин В.В. Глубоководные водолазные спуски и их медицинское обеспечение. В 3-х т. /В.В. Смолин, Г.М. Соколов, Б.Н. Павлов. – М.: Фирма "Слово". – 2003-2005.

42. Суханов В.А. Проектирование специальной одежды с электрическим и водяным обогревом: дис. ... канд. техн. наук. –М.: –МТИЛП, 1988.

43. Тагиев Р.М. Научно-методические основы безопасности разработки морских нефтегазовых месторождений Арктического шельфа: дис ... канд. техн. наук. –М.: РГУНГ, 1999.

44. Электрический ленточный нагреватель дыхательного газа для спецодежды водолаза /В.В. Ефремов и др. //Дизайн и технологии. – 2011. №22(64). – С. 82-85.
45. Юдаев Б.Н. Теплопередача: учебник для вузов. –М.: Высшая школа, 1981. – 360 с.
46. Aomidzu N. Методы и оборудование для осуществления подводных работ: Суйсан синко. – 1992. – 26. – №2. – р. 1-42.
47. Arctic underwater operations. Medical and Operational Aspects of Diving activities in Arctic Conditions. Edited by Louis Rey. Graham & Trotman. London. 1985.
48. Beheizte Taucheranzuge. Schiffahrt Int. – 1991. – 42, – №11. – р. 434 .
49. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer // Datasheet. Dallas Semiconductor. – 2009.
50. Gildhoff J. Atemgasversorgung in groSSen Tauchtiefen. Hanza. – 1990. – 127. – №22, р. 1558-1561.
51. Hancock R. Diving welders keep cool heads in hot water. Weld. J. – 2003. – 82. – №9. – р. 48-49.
52. Holmer I. Body cooling with ice for warm-water diving operations. Undersea biomedical research. – v.16. – i. 6, 1989. – р. 471-479.
53. Luther G. Bemannte Unterwasserarbeiten in kalten Gewässern. GKSS [Rept.]. – 1990. – NE56. p. 1-24.
54. Minoru Y. Водолазные костюмы. Сэн'и гаккайси. Fiber. – 1989. – 45. – №7, – р. 315-382.
55. Ontwikkelingen binnen de duikindustrie. Otar. – 1992. – 77. – №9. pp. 285, 287, 289, 291-292.
56. Ryszard K. Podzial aparatow nurkowych do prac podwodnych. Ergonomia. – 1995. – 18. – №1, – р. 75-79.
57. Zinkowski N. B. Commercial oil-field diving. Cornell Maritime Press, Inc. Cambridge, Maryland, 1978.

58. Вспененный полиэтилен (пенополиэтилен) // Stroimit: [Электронный ресурс]. URL: <http://stroimit.ru/stroimaterialy/drugie-stroimaterialy/penopolietilen>

59. Кулигин А.М. Классификация водолазного снаряжения. Средства обеспечения водолазных спусков /А.М. Кулигин, Е.Г. Белянкин, И.Е. Головкин // Подводный флот России. Podlodka.info: [Электронный ресурс]. © «Podlodka.info», 2005-2014. URL: <http://podlodka.info/education/20-struggle-for-survival/689-classification-of-diving-equipment-means-of-dives.html>

60. Кухтецкий С. AVR-USB-MEGA16: Измеряем и контролируем температуру /С. Кухтецкий //microsin.ru, 2009: [Электронный ресурс]. microsin ©. URL: <http://microsin.ru/content/view/803/44/>

61. Мамонтов Д. Панцирь для гидрокосмоса: от гнева Нептуна /Д. Мамонтов //Популярная механика. 2005: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.popmech.ru/article/834-pantsir-dlya-gidrokosmosa/>

62. Метод электротепловой аналогии // Инженерная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <http://engineeringsystems.ru/m/metod-elektroteplovoy-analogii.php>

63. Научно-производственное предприятие «Респиратор»: [Электронный ресурс]. ОАО НПП Респиратор. URL: <http://www.respiro-oz.ru/>

64. ОАО «Тетис Про»: [Электронный ресурс]. Тетис Про © Группа компаний Тетис. URL: www.tetis-pro.ru

65. Человек под водой // Водолазные спуски и подводная медицина, основы дайвинга, плавание с аквалангом, подводная охота: [Электронный ресурс]. URL: www.vodo-laz.ru

66. Энциклопедия АСУ ТП: [Электронный ресурс]. © RLDA Ltd. URL: <http://bookasutp.ru/>

67. BP: Потребление газа в Европе в 2011 году снизилось на 9.9% // Вокруг газа. 2012: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.trubagaz.ru/issue-of-the-day/bp-potreblenie-gaza-v-evrope-v-2011-godu-snizilos-na-99/>

68. Divex Global: [Электронный ресурс]. Divex Ltd. URL: <http://www.divexglobal.com/>

69. MP707R – Термометр Цифровой USB термометр/термостат // МАСТЕР КИТ: [Электронный ресурс]. © 2001 – 2014 «МАСТЕР КИТ». URL: http://www.masterkit.ru/main/set.php?code_id=661411

70. Northern Diver: [Электронный ресурс]. Northern Diver commercial equipment website. URL: <http://www.ndiver-commercial.com/>

71. Trelleborg: [Электронный ресурс]. © Trelleborg AB. URL: www.trelleborg.com

Пример расчёта распределения температуры с помощью метода «сеток» на ЭВМ

Расчёт по методу «сеток» производился с помощью программы MathCAD и приводится для случая, когда в слоях спецодежды используется трубчатый нагревательный элемент, а водолазу для дыхания подаётся воздушная смесь.

Исходные данные:

Теплопроводность и толщина материалов, используемых в пакете одежды:

$$\lambda_1 := 0.1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_1 := 0.0015 \text{ м};$$

$$\lambda_2 := 0.05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_2 := 0.002 \text{ м};$$

$$\lambda_3 := 0.05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_3 := 0.006 \text{ м};$$

$$\lambda_4 := 0.042 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_4 := 0.001 \text{ м};$$

$$\lambda_5 := 0.2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_5 := 0.004 \text{ м}.$$

Теплопроводность и толщина стенок нагревательных элементов (полимерных трубок): $\lambda_n := 0.14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \delta_n := 0.0015 \text{ м}.$

Расстояние между трубками нагревательного элемента: $\delta_{\text{тоch}} := 0.01 \text{ м}.$

Температура внешней среды: $x_{\text{ср}} := 4 \text{ °C};$

Температура ядра человеческого тела: $x_t := 37 \text{ °C};$

Температура теплоносителя (воды): $x_n := 40 \text{ °C};$

Расчёты:

Наносим сетку на пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» и производим вспомогательные расчёты:

$$\delta_c := \frac{\delta_{\text{тоch}}}{4}, \quad a := \frac{\lambda_1}{\delta_1}, \quad b := \frac{\lambda_2}{\delta_2}, \quad c := \frac{\lambda_3}{\delta_3}, \quad d := \frac{\lambda_4}{\delta_4}, \quad e := \frac{\lambda_5}{\delta_5}, \quad n := \frac{\lambda_n}{\delta_n}.$$

$$x_1 := 0 \quad x_6 := 0 \quad x_{11} := 0 \quad x_{16} := 0 \quad x_{21} := 0 \quad x_{26} := 0$$

$$x_2 := 0 \quad x_7 := 0 \quad x_{12} := 0 \quad x_{17} := 0 \quad x_{22} := 0 \quad x_{27} := 0$$

$$x_3 := 0 \quad x_8 := 0 \quad x_{13} := 0 \quad x_{18} := 0 \quad x_{23} := 0 \quad x_{28} := 0 \quad x_{31} := 0$$

$$x_4 := 0 \quad x_9 := 0 \quad x_{14} := 0 \quad x_{19} := 0 \quad x_{24} := 0 \quad x_{29} := 0 \quad x_{32} := 0$$

$$x_5 := 0 \quad x_{10} := 0 \quad x_{15} := 0 \quad x_{20} := 0 \quad x_{25} := 0 \quad x_{30} := 0 \quad x_{33} := 0$$

Далее составляем и решаем систему уравнений.

1. Точки с 1 по 4:

Given

$$a \cdot x_{cp} + \frac{2\lambda_1}{0.003} \cdot x_5 + b \cdot x_2 = \left(a + b + \frac{2 \cdot \lambda_1}{0.003} \right) \cdot x_1$$

$$b \cdot x_1 + \frac{2\lambda_2}{0.003} \cdot x_6 + x_n \cdot n = \left(b + n + \frac{2 \cdot \lambda_2}{0.003} \right) \cdot x_2$$

$$x_n \cdot n + \frac{2 \cdot \lambda_4}{0.003} \cdot x_8 + d \cdot x_4 = \left(n + d + \frac{2 \cdot \lambda_4}{0.003} \right) \cdot x_3$$

$$d \cdot x_3 + \frac{2 \cdot \lambda_5}{0.003} \cdot x_9 + e \cdot x_t = \left(e + d + \frac{2 \cdot \lambda_5}{0.003} \right) \cdot x_4$$

2. Точки с 5 по 9:

$$a \cdot x_{cp} + \frac{\lambda_1}{0.003} \cdot x_1 + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{10} + b \cdot x_6 = \left(a + b + \frac{\lambda_1}{0.003} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \right) \cdot x_5$$

$$b \cdot x_5 + \frac{\lambda_2}{0.003} \cdot x_2 + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{11} + c \cdot x_7 = \left(b + c + \frac{\lambda_2}{0.003} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \right) \cdot x_6$$

$$c \cdot x_6 + x_n \cdot n + c \cdot x_8 + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{12} = \left(c + c + n + \frac{\lambda_3}{\delta c} \right) \cdot x_7$$

$$c \cdot x_7 + \frac{\lambda_4}{0.003} \cdot x_3 + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{13} + d \cdot x_9 = \left(c + d + \frac{\lambda_4}{0.003} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \right) \cdot x_8$$

$$d \cdot x_8 + \frac{\lambda_5}{0.003} \cdot x_4 + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{14} + e \cdot x_t = \left(d + e + \frac{\lambda_5}{0.003} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \right) \cdot x_9$$

3. Точки с 10 по 14:

$$a \cdot x_{cp} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_5 + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{15} + b \cdot x_{11} = \left(a + b + \frac{2 \cdot \lambda_1}{\delta c} \right) \cdot x_{10}$$

$$b \cdot x_{10} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_6 + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{16} + c \cdot x_{12} = \left(b + c + \frac{2 \cdot \lambda_2}{\delta c} \right) \cdot x_{11}$$

$$c \cdot x_{11} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_7 + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{17} + c \cdot x_{13} = \left(c + c + \frac{2 \cdot \lambda_3}{\delta c} \right) \cdot x_{12}$$

$$c \cdot x_{12} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_8 + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{18} + d \cdot x_{14} = \left(c + d + \frac{2 \cdot \lambda_4}{\delta c} \right) \cdot x_{13}$$

$$d \cdot x_{13} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_9 + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{19} + e \cdot x_t = \left(d + e + \frac{2 \cdot \lambda_5}{\delta c} \right) \cdot x_{14}$$

4. Точки с 15 по 19:

$$\begin{aligned}
 a \cdot x_{cp} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{10} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{20} + b \cdot x_{16} &= \left(a + b + \frac{2 \cdot \lambda_1}{\delta c} \right) \cdot x_{15} \\
 b \cdot x_{15} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{11} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{21} + c \cdot x_{17} &= \left(b + c + \frac{2 \cdot \lambda_2}{\delta c} \right) \cdot x_{16} \\
 c \cdot x_{16} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{12} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{22} + c \cdot x_{18} &= \left(c + c + \frac{2 \cdot \lambda_3}{\delta c} \right) \cdot x_{17} \\
 c \cdot x_{17} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{13} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{23} + d \cdot x_{19} &= \left(c + d + \frac{2 \cdot \lambda_4}{\delta c} \right) \cdot x_{18} \\
 d \cdot x_{18} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{14} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{24} + e \cdot x_t &= \left(d + e + \frac{2 \cdot \lambda_5}{\delta c} \right) \cdot x_{19}
 \end{aligned}$$

5. Точки с 20 по 24:

$$\begin{aligned}
 a \cdot x_{cp} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{15} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{25} + b \cdot x_{21} &= \left(a + b + \frac{2 \cdot \lambda_1}{\delta c} \right) \cdot x_{20} \\
 b \cdot x_{20} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{16} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{26} + c \cdot x_{22} &= \left(b + c + \frac{2 \cdot \lambda_2}{\delta c} \right) \cdot x_{21} \\
 c \cdot x_{21} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{17} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{27} + c \cdot x_{23} &= \left(c + c + \frac{2 \cdot \lambda_3}{\delta c} \right) \cdot x_{22} \\
 c \cdot x_{22} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{18} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{28} + d \cdot x_{24} &= \left(c + d + \frac{2 \cdot \lambda_4}{\delta c} \right) \cdot x_{23} \\
 d \cdot x_{23} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{19} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{29} + e \cdot x_t &= \left(d + e + \frac{2 \cdot \lambda_5}{\delta c} \right) \cdot x_{24}
 \end{aligned}$$

6. Точки с 25 по 29:

$$\begin{aligned}
 a \cdot x_{cp} + \frac{\lambda_1}{0.003} \cdot x_{30} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \cdot x_{20} + b \cdot x_{26} &= \left(a + b + \frac{\lambda_1}{0.003} + \frac{\lambda_1}{\delta c} \right) \cdot x_{25} \\
 b \cdot x_{25} + \frac{\lambda_2}{0.003} \cdot x_{31} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \cdot x_{21} + c \cdot x_{27} &= \left(b + c + \frac{\lambda_2}{0.003} + \frac{\lambda_2}{\delta c} \right) \cdot x_{26} \\
 c \cdot x_{26} + x_n \cdot n + c \cdot x_{28} + \frac{\lambda_3}{\delta c} \cdot x_{22} &= \left(c + c + n + \frac{\lambda_3}{\delta c} \right) \cdot x_{27} \\
 c \cdot x_{27} + \frac{\lambda_4}{0.003} \cdot x_{32} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \cdot x_{23} + d \cdot x_{29} &= \left(c + d + \frac{\lambda_4}{0.003} + \frac{\lambda_4}{\delta c} \right) \cdot x_{28} \\
 d \cdot x_{28} + \frac{\lambda_5}{0.003} \cdot x_{33} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \cdot x_{24} + e \cdot x_t &= \left(d + e + \frac{\lambda_5}{0.003} + \frac{\lambda_5}{\delta c} \right) \cdot x_{29}
 \end{aligned}$$

7. Точки с 30 по 33:

$$\begin{aligned}
 a \cdot x_{cp} + \frac{2\lambda_1}{0.003} \cdot x_{25} + b \cdot x_{31} &= \left(a + b + \frac{2 \cdot \lambda_1}{0.003} \right) \cdot x_{30} \\
 b \cdot x_{30} + \frac{2\lambda_2}{0.003} \cdot x_{26} + x_n \cdot n &= \left(b + n + \frac{2 \cdot \lambda_2}{0.003} \right) \cdot x_{31} \\
 x_n \cdot n + \frac{2 \cdot \lambda_4}{0.003} \cdot x_{28} + d \cdot x_{33} &= \left(n + d + \frac{2 \cdot \lambda_4}{0.003} \right) \cdot x_{32} \\
 d \cdot x_{32} + \frac{2 \cdot \lambda_5}{0.003} \cdot x_{29} + e \cdot x_t &= \left(e + d + \frac{2 \cdot \lambda_5}{0.003} \right) \cdot x_{33}
 \end{aligned}$$

В результате вычислений получаем значения температуры для всех точек системы:

Find(x1 ,x2 ,x3 ,x4 ,x5 ,x6 ,x7 ,x8 ,
 x9 ,x10 ,x11 ,x12 ,x13 ,x14 ,x15 ,x16 ,
 x17 ,x18 ,x19 ,x20 ,x21 ,x22 ,x23 ,x24 ,
 x25 ,x26 ,x27 ,x28 ,x29 ,x30 ,x31 ,x32 ,x33)

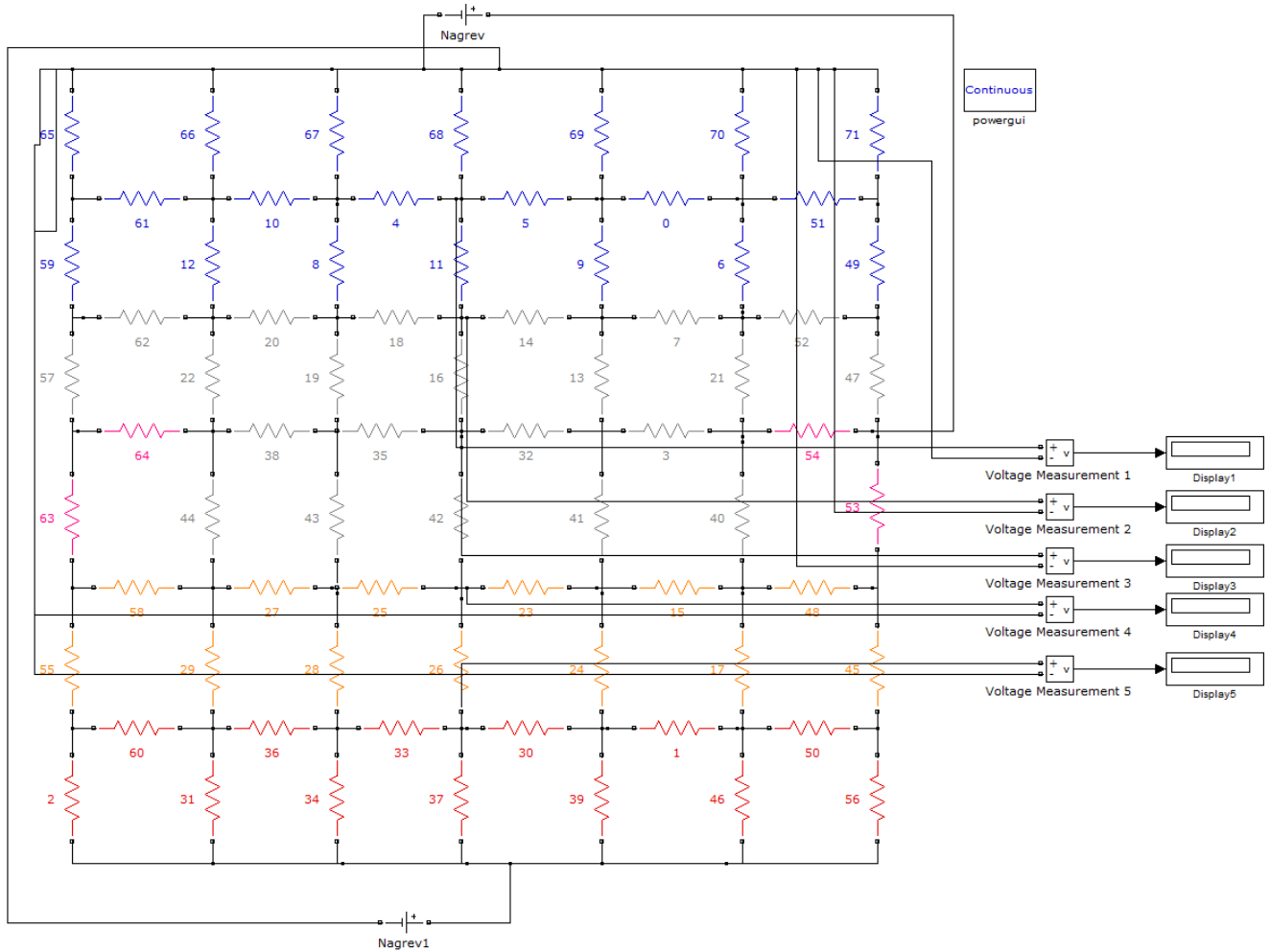
	1
1	9.953
2	30.395
3	38.823
4	37.349
5	8.239
6	18.835
7	37.039
8	37.113
9	37.016
10	7.254
11	14.861
12	30.775
13	35.967
14	36.696
15	6.939
16	...

После этого из найденных значений создаётся матрица, по которой в дальнейшем можно произвести построение контурного графика температурного поля:

$$pv_1 := \begin{pmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 9.9 & 8.2 & 7.2 & 6.9 & 7.2 & 8.2 & 9.9 \\ 30.4 & 18.8 & 14.9 & 13.8 & 14.9 & 18.8 & 30.4 \\ 40 & 37 & 30.8 & 29 & 30.8 & 37 & 40 \\ 38.8 & 37.1 & 36 & 35.6 & 36 & 37.1 & 38.8 \\ 37.3 & 37 & 36.7 & 36.6 & 36.7 & 37 & 37.3 \\ 37 & 37 & 37 & 37 & 37 & 37 & 37 \end{pmatrix}$$

Схема компьютерной модели электротепловой аналогии

Данная модель электрической схемы реализована с помощью программы Simulink.



**Расчёт коэффициентов передаточной функции объекта АСР температуры
водообогреваемой спецодежды водолазов с трубчатым нагревательным
элементом**

Исходные данные:

Расход воды $Q = 6 \text{ л/мин} = 0.0001 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Внутренний диаметр трубки $d = 0.003 \text{ м.}$

Внешний диаметр трубки $D = 0.006 \text{ м.}$

Количество секций $n_c = 8.$

Длина трубки $l = 15 \text{ м.}$

C_m – удельная теплоёмкость трубок = $1.38 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

C_v – удельная теплоёмкость воды = $4.174 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

ρ_v – плотность воды = $1000 \text{ кг}/\text{м}^3.$

ρ_T – плотность материала трубок = $1.6 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3.$

ρ_m – плотность материала одежды = $330 \text{ кг}/\text{м}^3.$

δ_{od} – толщина пакета одежды = 0.0095 м.

C_{od} – удельная теплоёмкость одежды = $1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

R – суммарное термическое сопротивление одежды = $0.2 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт.}$

ν – кинематическая вязкость воды при температуре $40^\circ\text{C} = 0.658 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек.}$

Θ_k – температура теплоносителя на выходе из гидрокомбинезона принималась $\approx 32^\circ\text{C}.$

Θ_n – температура теплоносителя на входе в гидрокомбинезон, = $40^\circ\text{C}.$

Нахождение нужных коэффициентов:

Внутренний радиус трубки: $r = \frac{1}{2}d.$ Следовательно, $r = 0.0015 \text{ м.}$

Скорость воды в одной трубке: $V_m = \frac{Q}{\pi r^2 n_c} = \frac{0.001}{3.14 \cdot (0.0015)^2 \cdot 8} = 1.8 \text{ / } .$

Число Рейнольдса: $Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{1.8 \cdot 0.003}{0.658 \cdot 10^{-6}} = 8063.$

Так как $Re = 8063$, то режим течения теплоносителя турбулентный. Соответственно число Нуссельта находится по следующей формуле:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr_{жс}^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0.25};$$

Где Pr – число Прандтля, $Pr_{жс} = 4.31$, $Pr_c = 7.02$.

$$Nu = 0.021 \cdot 8063^{0.8} \cdot 4.31^{0.43} \cdot \left(\frac{4.31}{7.02}\right)^{0.25} = 46.5$$

Коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке определяется по соотношению: $\alpha_1 = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d} = 46.5 \cdot \frac{0.613}{0.003} = 9497 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Коэффициент теплопередачи от трубок вычислен по формуле:

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{1}{2\lambda} \ln\left(\frac{D}{d}\right)} = \frac{3.14}{\frac{1}{9497 \cdot 0.003} + \frac{1}{2 \cdot 0.14} \ln\left(\frac{0.006}{0.003}\right)} = 1.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}).$$

Формула для нахождения массы воды:

$$m_в = \pi \cdot r^2 \cdot \rho_в \cdot l = 3.14 \cdot (0.0015)^2 \cdot 1000 \cdot 15 = 0.106 \text{ кг}.$$

Масса трубок:

$$m_T = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) l \rho_T = \frac{3.14}{4} (0.006^2 - 0.003^2) 15 \cdot 1600 = 0.509 \text{ кг}.$$

Находим постоянную времени трубок с водой:

$$T_в = \frac{m_T C_T + m_в C_в}{k_l l + \frac{Q_в}{8} \rho_в C_в} = \frac{0.509 \cdot 1380 + 0.106 \cdot 4174}{1.2 \cdot 15 + 1.25 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4174} = 45.3 \text{ сек} = 0.7 \text{ мин}.$$

Постоянная времени одежды:

$$T_{од} = \rho_m \cdot \delta_{од} \cdot C_{од} \cdot R = 330 \cdot 0.0095 \cdot 1000 \cdot 0.2 = 623.3 \text{ сек} = 10.4 \text{ мин}.$$

Коэффициент передачи для воды:

$$K_в = \frac{\Theta_{\kappa}}{\Theta_{\text{н}}} = \frac{32}{40} = 0.8$$

Коэффициент передачи для одежды:

$$K_{од} = \frac{\Delta \Theta_{од}}{\Delta \Theta_в} = \frac{6}{40} = 0.15$$

В итоге, передаточная функция объекта АСР, с условием использования воздушной газовой смеси, примет вид:

$$W_o(p) = \frac{0.12}{(0.7p+1)(10.4p+1)}.$$

Пример расчёта и построения ЛАФЧХ и переходных характеристик АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с помощью ЭВМ

Ниже приведён пример необходимых расчётов и построение ЛАФЧХ, годографов, относительных показателей колебательности и переходных характеристик АСР температуры водообогреваемой спецодежды для случая, когда в системе в качестве нагревательных элементов используются полимерные трубки и водолазу для дыхания подаётся воздушная смесь. Расчёты и построение графиков и характеристик проводились с помощью программы MathCAD.

Исходные данные и необходимые расчёты:

$$W_o(p) := \frac{0.12}{(10.4 \cdot p + 1) \cdot (0.7 \cdot p + 1)}$$

$$k_p := 4 \quad T_u := \sqrt{10.4 \cdot 0.7} \quad I := \frac{k_p}{T_u} \quad W_p(p) := k_p + I \cdot \frac{1}{p}$$

$$W_{raz}(p) := W_p(p) \cdot W_o(p)$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$A(\omega) := |W_{raz}(j \cdot \omega)|$$

$$L(\omega) := 20 \cdot \log(A(\omega))$$

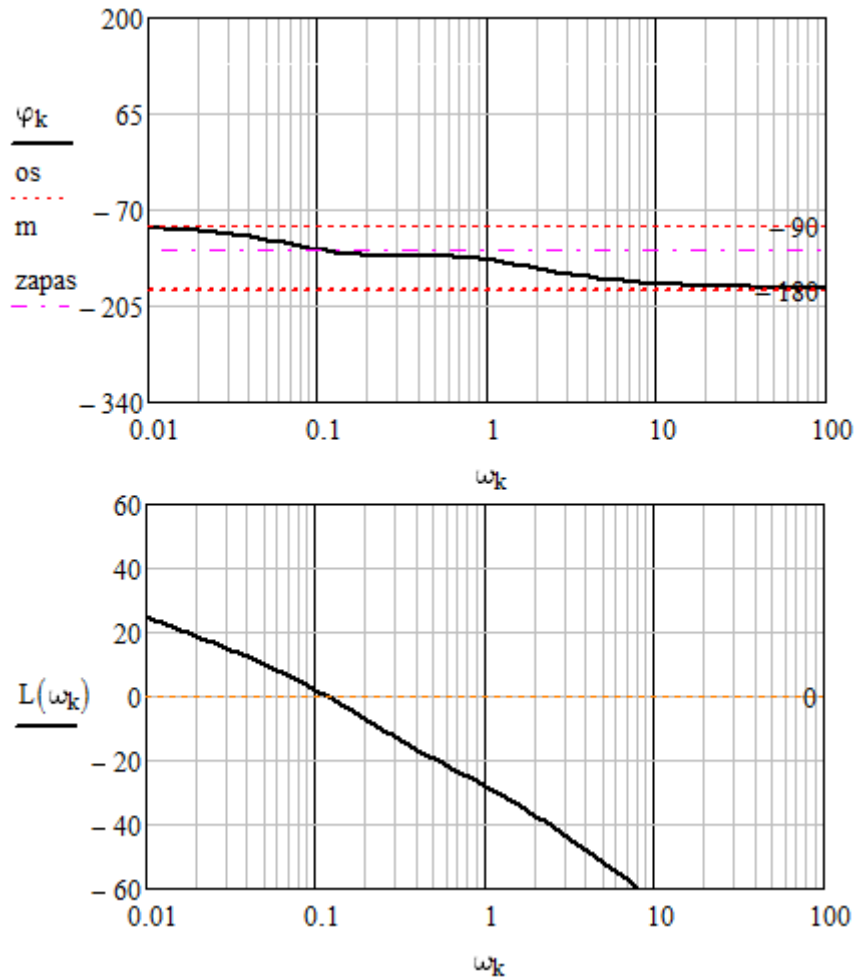
$$n := 100 \quad k := 1..n \quad \omega_{\min} := 0.001 \quad \omega_{\max} := 100 \quad \omega_0 := \omega_{\min}$$

$$h := \frac{\log\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)}{n} \quad \omega_k := \omega_{k-1} \cdot 10^h$$

$$\varphi_0 := \arg(W_{raz}(j \cdot \omega_0)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \varphi_k := \varphi_{k-1} + \arg\left(\frac{W_{raz}(j \cdot \omega_k)}{W_{raz}(j \cdot \omega_{k-1})}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$os := -180 \quad zapas := -180 + 55$$

$$m := 135$$

Построение ЛАФЧХ:Построение годографа разомкнутой системы и показателей колебательности:

$$M := 1.2$$

$$M1 := 1.1$$

$$R0 := \frac{M^2}{M^2 - 1}$$

$$R2 := \frac{M1^2}{M1^2 - 1}$$

$$R0 = 3.273$$

$$R2 = 5.762$$

$$r := \frac{M}{M^2 - 1}$$

$$r2 := \frac{M1}{M1^2 - 1}$$

$$r = 2.727$$

$$r2 = 5.238$$

$$\alpha := 0, 0.1.. 6.3$$

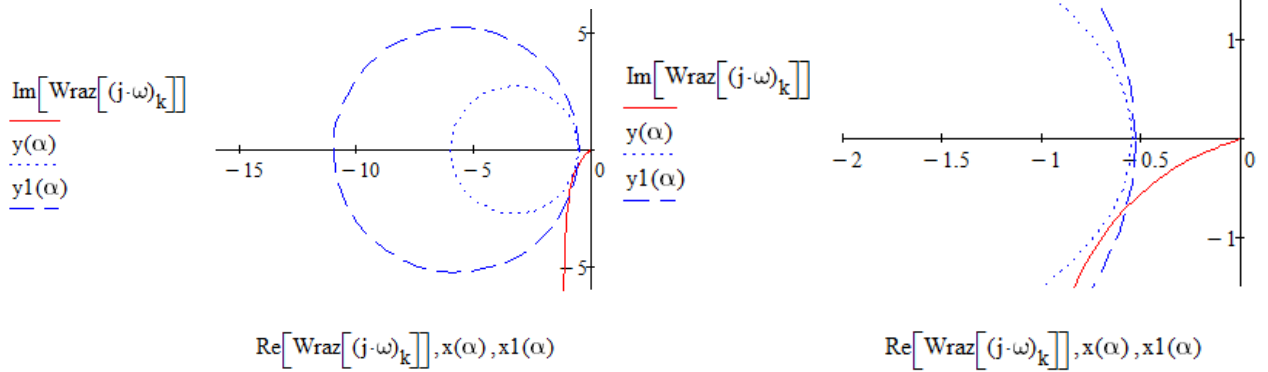
$$\alpha := 0, 0.1.. 6.3$$

$$x(\alpha) := r \cdot \cos(\alpha) - R0$$

$$x1(\alpha) := r2 \cdot \cos(\alpha) - R2$$

$$y(\alpha) := r \cdot \sin(\alpha)$$

$$y1(\alpha) := r2 \cdot \sin(\alpha)$$

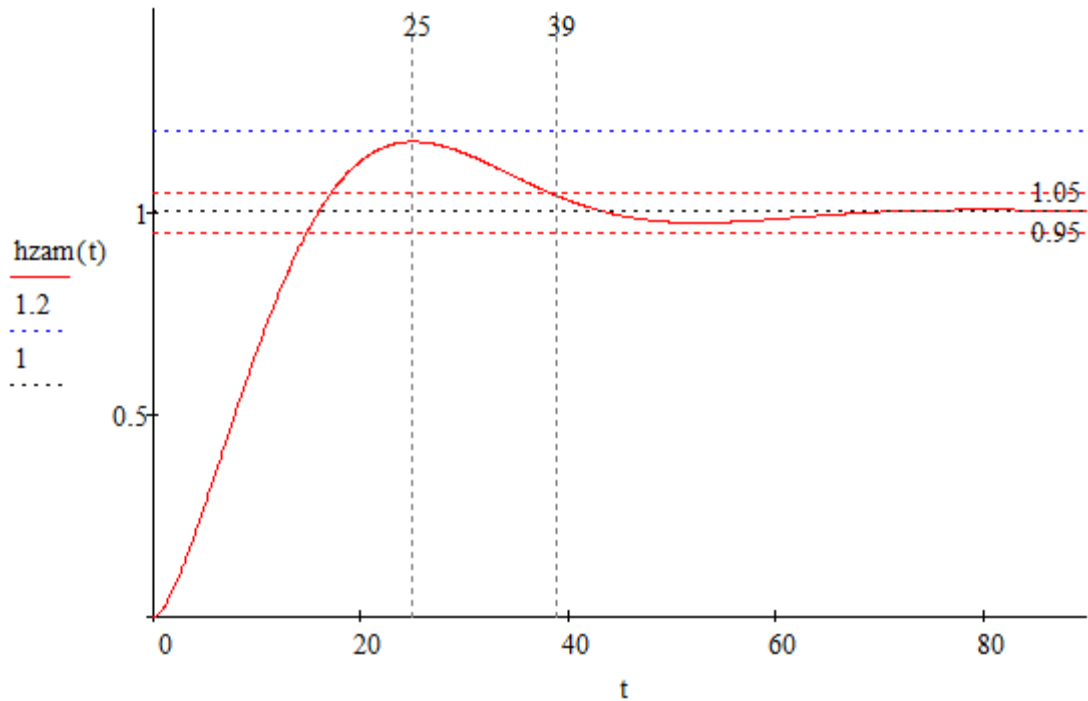


Построение переходной характеристики АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолаза:

$$W_{\text{д}}(p) := \frac{1}{(0.002 \cdot p + 1)}$$

$$W_{\text{зам}}(p) := \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p) \cdot W_{\text{д}}(p)}$$

$$\text{hzam}(t) := W_{\text{зам}}(p) \frac{1}{p} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace}, p \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow 0.0273714057 \cdot e^{-1.391116 \cdot t} + 1.994285712 \cdot e^{-1.428571 \cdot t} + 1.599692308 \cdot e^{-0.09615384 \cdot t} \dots$$



**Расчёт коэффициентов передаточной функции объекта АСР температуры
водообогреваемой спецодежды водолазов с резиновым нагревательным
элементом**

Исходные данные:

Расход воды $Q = 6 \text{ л/мин} = 0.0001 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Количество секций $n_c = 8.$

Длина элемента $a = 0.3 \text{ м.}$

Ширина элемента $b = 0.11 \text{ м.}$

Толщина элемента $c = 0.005 \text{ м.}$

Высота канала элемента $a_k = 0.004 \text{ м.}$

Ширина канала элемента $b_k = 0.004 \text{ м.}$

$d_{эк}$ – эквивалентный диаметр = $0.0044, \text{ м,}$

C_m – удельная теплоёмкость резинового элемента = $1.42 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

C_v – удельная теплоёмкость воды = $4.174 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

ρ_v – плотность воды = $1000 \text{ кг}/\text{м}^3.$

ρ_p – плотность резины = $1.2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3.$

ρ_m – плотность материала одежды = $330 \text{ кг}/\text{м}^3.$

$\delta_{од}$ – толщина пакета одежды = 0.0125 м.

$C_{од}$ – удельная теплоёмкость одежды = $1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$

R – суммарное термическое сопротивление одежды = $0.2 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт.}$

ν – кинематическая вязкость воды при температуре $40^\circ\text{C} = 0.658 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек.}$

n – количество каналов в элементе = 12.

Θ_k – температура теплоносителя на выходе из гидрокомбинезона принималась $\approx 32^\circ\text{C}.$

Θ_n – температура теплоносителя на входе в гидрокомбинезон, = $40^\circ\text{C}.$

Нахождение нужных коэффициентов:

Скорость воды в одном канале: $V_m = \frac{Q_v}{S n_c} = \frac{0.001}{(0.004)^2 \cdot 8} = 0.8 \quad / \quad .$

$$\text{Число Рейнольдса: } Re = \frac{V \cdot d_{\text{эк}}}{\nu} = \frac{0.8 \cdot 0.0044}{0.658 \cdot 10^{-6}} = 5189.$$

Так как $Re = 5189$, то режим течения теплоносителя турбулентный. Соответственно число Нуссельта находится по следующей формуле:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr_{\text{жс}}^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c}\right)^{0.25};$$

Где Pr – число Прандтля, $Pr_{\text{жс}} = 4.31$, $Pr_c = 7.02$.

$$Nu = 0.021 \cdot 5189^{0.8} \cdot 4.31^{0.43} \cdot \left(\frac{4.31}{7.02}\right)^{0.25} = 32.7$$

Коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке определяется по соотношению: $\alpha_1 = Nu \frac{\lambda_{\text{жс}}}{d_{\text{эк}}} = 32.7 \cdot \frac{0.613}{0.0044} = 4582 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Коэффициент теплопередачи от элемента вычислен по формуле:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_n \frac{\delta}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{4582} + \frac{0.0005}{0.15} + \frac{0.005}{0.05} + \frac{0.0015}{0.1}} = 8.4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}).$$

Объём каналов в элементе:

$$V_{\kappa} = a_{\kappa}^2 n l_{\kappa} = 0.004^2 \cdot 0.3 \cdot 12 = 5.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Далее находим массу резинового элемента:

$$m_p = \rho_p V_{nl} = \rho_p (abc - V_{\kappa}) = 1.2 \cdot 10^{-3} (0.3 \cdot 0.11 \cdot 0.005 - 5.8 \cdot 10^{-5}) = 0.12 \text{ кг}.$$

Масса воды в каналах элемента:

$$m_{\text{в}} = V_{\kappa} \rho_{\text{в}} n_c = 5.8 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 8 = 0.5 \text{ кг}.$$

Находим постоянную времени резинового элемента:

$$T_{\text{в}} = \frac{m_p C_p + m_{\text{в}} C_{\text{в}}}{k_l l + \frac{Q_{\text{в}}}{8} \rho_{\text{в}} C_{\text{в}}} = \frac{0.12 \cdot 1420 + 0.5 \cdot 4174}{8.4 \cdot 2.4 + 1.25 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4174} = 81.9 \text{ сек} = 1.4 \text{ мин}.$$

Постоянная времени одежды:

$$T_{od} = \rho_m \cdot \delta_{od} \cdot C_{od} \cdot R = 330 \cdot 0.0125 \cdot 1000 \cdot 0.2 = 710.1 \text{ сек} = 11.8 \text{ мин}.$$

Коэффициент передачи для воды:

$$K_{\text{в}} = \frac{\Theta_{\kappa}}{\Theta_{\text{н}}} = \frac{32}{40} = 0.8$$

Коэффициент передачи для одежды:

$$K_{od} = \frac{\Delta\Theta_{od}}{\Delta\Theta_g} = \frac{12}{40} = 0.3$$

В итоге, передаточная функция объекта АСР, с условием использования воздушной газовой смеси, примет вид:

$$W_o(p) = \frac{0.24}{(1.4p+1)(11.8p+1)}.$$

Определение устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолазов с помощью метода Рауса-Гурвица на ЭВМ

Ниже приведены примеры листинга программы для определения устойчивости по методу Рауса-Гурвица в программе Matlab.

Пример 1. Полином Q1. Фактор «старения».

%Задание начальных значений

Kp=4;

Tv=0.7;

Td=0.002;

KOmin=0.08;

KOmax=0.12;

TODmin=5.2;

TODmax=10.4;

%Расчёт Ти

Tumin=sqrt(TODmin*Tv);

Tumax=sqrt(TODmax*Tv);

%Расчёт коэффициентов

a0min=Tv*TODmin*Tumin*Td;

a0max=Tv*TODmax*Tumax*Td;

%-----

a1min=TODmin*Tv*Tumin+Tv*Td*Tumin+TODmin*Td*Tumin;

a1max=TODmax*Tv*Tumax+Tv*Td*Tumax+TODmax*Td*Tumax;

%-----

a2min=Tv*Tumin+TODmin*Tumin+Td*Tumin;

a2max=Tv*Tumax+TODmax*Tumax+Td*Tumax;

```

%-----
a3min=Tumin+Kp*KOmin*Tumin;
a3max=Tumax+Kp*KOmax*Tumax;
%-----
a4min=Kp*KOmin;
a4max=Kp*KOmax;
%-----
%Получение коэффициентов характеристического полинома
lm = [a0max, a1max, a2min, a3min, a4max]
%Определение размерности
[L, N] = size(lm);
%Заполнение матрицы нулевыми значениями
g = zeros(N, N);
%Заполнение нечетных строк матрицы Гурвица
s = 0;
for i = 1:2:N
j = 1;
j = j+s;
r = 0;
for r = 2:2:N
g(i, j) = lm(r);
j = j+1;
end
s = s+1;
end
%Заполнение четных строк матрицы Гурвица
s = 0;
for i = 2:2:N
j = 1;
j = j+s;

```

```

r = 0;
for r = 1:2:N
g(i, j) = lm(r);
j = j+1;
end
s = s+1;
end
g = g(1:N-1, 1:N-1);
%Вычисление главных миноров
minor = 1;
for i = 1:N-1
dd = det(g(1:i, 1:i));
if dd<0
minor = 0;
end
end
%Вывод результатов
if minor==0
disp('СИСТЕМА НЕ УСТОЙЧИВА');
else
disp('СИСТЕМА УСТОЙЧИВА');
end
end

```

Пример 2. Полином Q2. Случай возможной 5% погрешности в расчётах и измерениях.

```

%Задание начальных значений
Kp=17;
Tv=0.7;
Td=0.002;
Kv=0.8;

```

```

Kodmin=0.1;
Kodmax=0.15;
TODmin=5.2;
TODmax=10.4;
%Расчёт погрешности
delt = 5;
TvMIN=(1-(delt/100))*Tv;
TvMAX=(1+(delt/100))*Tv;
KvMIN=(1-(delt/100))*Kv;
KvMAX=(1+(delt/100))*Kv;
%Расчёт Ko
Komin=KvMIN*Kodmin;
Komax=KvMAX*Kodmax;
%Расчёт Ти
Tumin=sqrt(TODmin*TvMIN);
Tumax=sqrt(TODmax*TvMAX);
%Расчёт коэффициентов
a0min=TvMIN*TODmin*Tumin*Td;
a0max=TvMAX*TODmax*Td*Tumax;
a1min=TODmin*TvMIN*Tumin+TvMIN*Td*Tumin+TODmin*Td*Tumin;
a1max=TODmax*TvMAX*Tumax+TvMAX*Td*Tumax+TODmax*Td*Tumax;
a2min=TvMIN*Tumin+TODmin*Tumin+Td*Tumin;
a2max=TvMAX*Tumax+TODmax*Tumax+Td*Tumax;
a3min=Tumin+Kp*Komin*Tumin;
a3max=Tumax+Kp*Komax*Tumax;
a4min=Kp*Komin;
a4max=Kp*Komax;
%получение коэффициентов характеристического полинома
lm=[a0max,a1min,a2min,a3max,a4max]
%Определение размерности

```

```
[L, N] = size(lm);  
%Заполнение матрицы нулевыми значениями  
g = zeros(N, N);  
%Заполнение нечетных строк матрицы Гурвица  
s = 0;  
for i = 1:2:N  
    j = 1;  
    j = j+s;  
    r = 0;  
    for r = 2:2:N  
        g(i, j) = lm(r);  
        j = j+1;  
    end  
    s = s+1;  
end  
%Заполнение четных строк матрицы Гурвица  
s = 0;  
for i = 2:2:N  
    j = 1;  
    j = j+s;  
    r = 0;  
    for r = 1:2:N  
        g(i, j) = lm(r);  
        j = j+1;  
    end  
    s = s+1;  
end  
g = g(1:N-1, 1:N-1);  
%Вычисление главных миноров  
minor = 1;
```



```
for i = 1:N-1
    dd = det(g(1:i, 1:i));
    if dd<0
        minor = 0;
    end
end
% Вывод результатов
if minor==0
    disp('СИСТЕМА НЕ УСТОЙЧИВА');
else
    disp('СИСТЕМА УСТОЙЧИВА');
end
```