

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)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии» на кафедре «Автоматика».

Научный кандидат технических наук, профессор
руководитель: Ефремов Владимир Васильевич

Официальные кандидат технических наук, доцент
оппоненты: Никитченко Инна Игоревна, заведующий кафедрой
информатики и информационных таможенных технологий
ГКОУ ВПО «Российская Таможенная Академия»

доктор технических наук, профессор
Жаворонков Александр Иванович, заместитель
генерального директора ООО «КАТЕ-Продакшн»

Ведущая Открытое акционерное общество «Центральный научно-
организация: исследовательский институт швейной промышленности»

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в _____ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.144.03 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии» по адресу 117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, ауд. 156.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии» и на сайте www.msta.ac.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук, профессор

Феоктистов Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

Освоение биологических и сырьевых ресурсов мирового океана получает всё более широкое распространение во всём мире и в России в частности. Так, 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) и по прогнозам специалистов на период до 2030 года, темпы добычи нефти и газа в Российской Федерации будут поддерживаться на стабильно высоком уровне.

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.

Большинство открытых месторождений нефти и газа в России находятся на замерзающих акваториях, а работа в условиях пониженных температур осложнена суровыми климатическими условиями и требует создания новых и совершенствования имеющихся технических средств и технологий для разработки арктического шельфа.

При этом стоит отметить, что в процессе разведки и добычи нефти и газа, широко используется труд водолазов: они работают на буровых платформах, строительно-монтажных судах, на эксплуатационных платформах морских нефтепромыслов. И, соответственно, в связи с заинтересованностью в водолазных погружениях, важной задачей, требующей решения, становится комплексное обеспечение безопасности работы человека под водой.

Одной из проблем, связанной с водолазными работами и требующей решения, является вероятность переохлаждения организма человека при длительной работе в экстремально холодных условиях.

Снижение теплопотерь от организма осуществляется использованием в одежде теплоизолирующих прокладок, нагревательных элементов и систем нагрева дыхательного газа.

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. Вследствие этого, специальная одежда водолазов состоит не только из нательного белья и утеплителей, но также и из «активных» источников тепла, то есть нагревательных элементов. Нагревательные элементы (НЭ) могут выполняться в виде как электрических нагревателей, так и «водяных» (использующих в качестве теплоносителя горячую воду). Температура данных НЭ регулируется с помощью автоматической системы.

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 диссертационной работе для достижения поставленной цели:

– 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;

– 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;

– 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.

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.

Практическая значимость 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 и недостатки 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.

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включённых в перечень ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе представлена информация о современных водолазных гидрокомбинезонах, в том числе и водообогреваемых, рассмотрены существующие типы водообогрева водолаза и области применения обогреваемого водолазного снаряжения.

Во второй главе с помощью метода «сеток» (метода конечных разностей) произведены расчёты, и построение графиков температурных полей. Полученные результаты позволили правильно выбрать места размещения датчиков температуры в слоях спецодежды. Также построение графиков температурных полей позволило оценить качество обогрева при использовании различных нагревательных элементов и для различных внешних условий.

Для нахождения температуры в слоях спецодежды рассматривалась двумерная задача теплопередачи с поверхности тела человека и нагревательного элемента через многослойный пакет одежды в окружающую среду. Считали, что пакет системы состоит из следующих слоёв: 1 – гидрокомбинезона; 2 – утеплителя; 3 – нагревательного элемента; 4 – нательного белья; 5 – нетермостатированного участка человеческого тела толщиной 4 мм.

В работе рассматривалось два типа нагревательных элементов, использующих в качестве теплоносителя тёплую воду: 1. Полимерные трубки; 2. Резиновые пластины с каналами, для прохождения по ним теплоносителя, выполненные в виде дополнительного слоя спецодежды.

Для решения задачи по методу конечных разностей, на имеющийся у нас пакет системы «человек-одежда-окружающая среда» наносилась сетка, а затем, составлялась система уравнений для всех точек сетки (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda_1}{\delta_1} \Theta_c + \frac{2\lambda_1}{0.003} \Theta_5 + \frac{\lambda_2}{\delta_2} \Theta_2 = \left(\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{2\lambda_1}{0.003} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} \right) \Theta_1; \\ \frac{\lambda_2}{\delta_2} \Theta_1 + \frac{2\lambda_2}{0.003} \Theta_6 + \frac{\lambda_{нагр}}{\delta_{нагр}} \Theta_n = \left(\frac{\lambda_2}{\delta_2} + \frac{2\lambda_2}{0.003} + \frac{\lambda_{нагр}}{\delta_{нагр}} \right) \Theta_2; \\ \dots \\ \frac{\lambda_4}{\delta_4} \Theta_{18} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} \Theta_{14} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} \Theta_{24} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \Theta_T = \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} + \frac{\lambda_5}{\delta_c} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \right) \Theta_{19}; \\ \dots \\ \frac{\lambda_4}{\delta_4} \Theta_{32} + \frac{2\lambda_5}{0.003} \Theta_{29} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \Theta_T = \left(\frac{\lambda_4}{\delta_4} + \frac{2\lambda_5}{0.003} + \frac{\lambda_5}{\delta_5} \right) \Theta_{33}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Где, Θ_n – температура в одной из точек сетки;

δ_n – толщина слоя спецодежды;

λ_n – теплопроводность слоя спецодежды.

По значениям температуры, найденным из решения системы (1) производилось построение графиков температурных полей в трёх- (рис. 1) и двумерном виде:

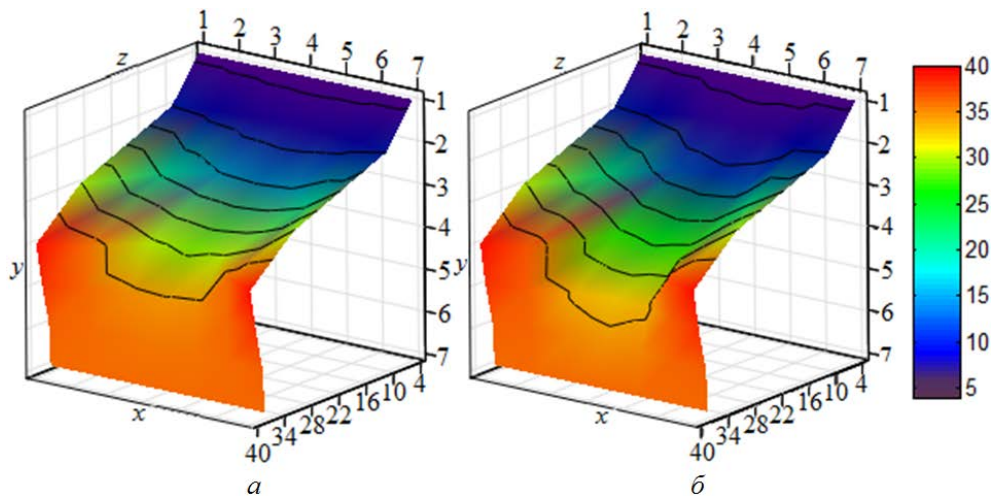


Рис. 1 – Графики температурного поля в трёхмерных координатах

На графиках температурных полей, представленных на рис. 1, по оси x откладывается расстояние между нагревательными элементами, по оси y откладывается расстояние между слоями пакета системы «человек-одежда-окружающая среда», где 1 – это внешняя среда, а 7 – ядро человеческого тела, по оси z – откладывается температура, °C.

В результате расчётов и построения графиков температурных полей для ряда различных условий: используемая для дыхания газовая смесь (гелиевая или воздушная); повышение влажности с течением времени в подкомбинезонном пространстве; используемый материал в качестве утеплителя – были проанализированы нагревательные элементы в виде трубок и резиновой пластины. Сделан вывод о том, что данные элементы обеспечивают необходимые значения температуры на поверхности человеческого тела.

Также производилось построение графиков температурных полей для электрического нагревательного элемента и полученные результаты сравнивались с результатами для элементов, использующих в качестве теплоносителя тёплую воду. В результате сравнения сделан вывод о схожем характере распределения температуры в слоях одежды для рассматриваемых элементов.

На основании полученных результатов был произведён выбор места установки датчика температуры АСР, произведён расчёт необходимой мощности нагревательных элементов и определена температура уставки регулятора автоматической системы.

В третьей главе с целью подтверждения результатов, полученных с помощью расчётов по методу конечных разностей, представлена электрическая модель пакета системы «человек-одежда-окружающая среда». Данная модель выполнена на основе электротепловой аналогии — методе расчёта температурных полей, основанном на воспроизведении теплового процесса электрическим. С помощью данного способа есть возможность свести расчёт температурных полей пакета одежды водолаза к расчёту электрической схемы. Для этого тепловые величины заменялись их электрическими аналогами: перепад температур между двумя точками заменялся падением напряжения между узлами электрической схемы; термическое сопротивление заменялось электрическим сопротивлением.

На основе метода электротепловой аналогии были созданы компьютерная и физическая модели пакета системы «человек-одежда-окружающая среда» и получены данные, которые подтвердили результаты расчётов по методу «сеток».

В четвёртой главе представлены все необходимые расчёты, в результате которых была получена математическая модель устойчивой АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов для двух типов нагревательных элементов: полимерных трубок и резиновой пластины.

Также в данной главе, с помощью теоремы и полиномов Харитонова, произведён расчёт робастной устойчивости АСР температуры водообогреваемой спецодежды водолазов при использовании трубчатого нагревательного элемента. Робастное управление позволило учесть изменения коэффициентов АСР с течением времени – при погружении под воду, водолазу для дыхания, в зависимости от глубины, может подаваться как воздушная дыхательная смесь, так и гелиевая, что приводит к изменению коэффициентов передаточных функций системы: в гелиевой среде уменьшается коэффициент передачи для обогреваемой одежды и термическое сопротивление одежды, что приводит к уменьшению постоянной времени $T_{од}$.

Также с помощью робастного управления, в пределах 5%, были учтены возможные ошибки и погрешности в расчётах и измерениях.

В результате, как показали проведённые исследования, робастное управление позволило повысить качество работы автоматической системы.

В пятой главе проводится изучение графиков переходных характеристик АСР температуры обогреваемой спецодежды водолазов, полученных с помощью компьютерного моделирования и в результате экспериментов.

Особое внимание уделяется сопоставлению графиков переходных процессов АСР температуры обогреваемой одежды, полученных в результате

экспериментов, при использовании двух регуляторов: на основе МК ATtiny45 и промышленного регулятора МИНИТЕРМ-400 МЗТА.

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, 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 оценки качества работы регуляторов с МК AVR производилось сравнение переходных характеристик, полученных для работы АСР температуры обогреваемой спецодежды с регулятором с МК ATtiny45 и промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400.

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

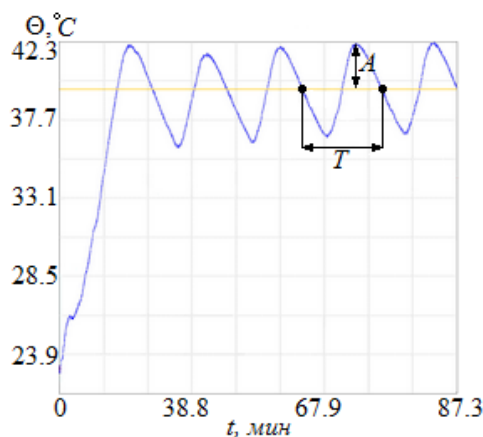


Рис. 2 – График переходного процесса АСР температуры обогреваемой спеодежды с включённым регулятором МИНИТЕРМ-400

Анализируя график на рис. 2 можно определить амплитуду и период автоколебаний: $A \approx 2.6^{\circ}\text{C}$, $T \approx 17.7 \text{ мин}$; средняя температура нагревательного элемента 39.6°C .

Полученный график переходной характеристики для одного из экспериментов с регулятором на основе MP707R (с МК ATtiny45) представлен на рис. 3. Зона неоднозначности релейного регулятора для данного случая, как и для предыдущего, $b = \pm 1^{\circ}\text{C}$.

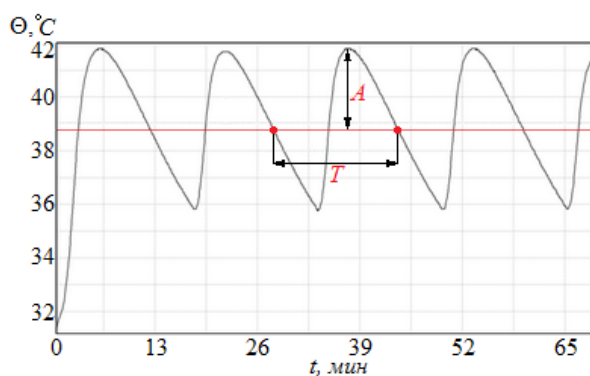


Рис. 3 – График переходного процесса АСР с регулятором на основе МК ATtiny45

Анализ графика на рис. 3 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 рис. 3, полученная в результате экспериментов с релейным регулятором,

сделанном на основе МК, имеет незначительные отличия от переходной характеристики, представленной на рис. 2, которая была получена во время одного из экспериментов с промышленным регулятором МИНИТЕРМ-400.

В результате исследований, 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 °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.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В результате расчётов и исследований 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 исследований 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. 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;

5. 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Другие публикации:

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.