**На правах рукописи**

**Симанков Дмитрий Сергеевич**

**ТЕПЛОВАЯ АКТИВНОСТЬ КАК ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ КРАТКОВРЕМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА (МБО) С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ**

**Специальность: 01.04.14**

**«Теплофизика и теоретическая теплотехника»**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Рыбинск – 2017**

Работа выполнена на кафедре “Физика” Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Спирин Геннадий Георгиевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*.

кандидат технических наук, начальник

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*.

Ведущая организация:

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*.

Защита состоится « » 2017 г. в \_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного Совета Д 212.210.03 в Рыбинском государственном авиационном техническом университете, по адресу: 152934, г. Рыбинск Ярославской обл., ул. Пушкина, 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Рыбинском государственном авиационном техническом университете.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д 212.210.03  
доктор технических наук, доцент Ремизов Александр Евгеньевич

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.**

**Актуальность работы.** Благодаря развитию новых технологий в лёгкой промышленности, современная одежда изготавливается всё больше из синтетических материалов, свойства которых современные технологические процессы могут изменять. К управляемым теплофизическим характеристикам относятся: теплопроводность, термическое сопротивление, удельная теплоёмкость. Поэтому, развитие методов расчёта и методов прогнозирования теплофизических характеристик (ТФХ) и экспериментальные данные являются важными источниками информации для развития общих и частных сведений о механизме переноса тепла и температурных ощущений живого организма. Отмеченные проблемы полностью не решены.

Исследование ТФХ ведётся по двум направлениям – теоретическому и экспериментальному. Оба подхода применены в настоящей работе, поскольку требовалось экспериментально проверить правильность и адекватность математических моделей теплопередачи в коже МБО (человека). Кроме того, наблюдается значительный рост числа новых материалов, для которых нужно исследовать их ТФХ. Задача может быть отчасти решена за счёт создания технических устройств, к которым предъявляются в настоящее время всё больше требований по быстродействию и точности измерений. Однако, более перспективным методом изучения ТФХ является создание теории теплопроводности для класса дисперсных пластических тел. К ним можно отнести кожу МБО, искусственные кожи и ткани, из которых изготавливается одежда, непосредственно соприкасающуюся с телом МБО.

Имеющиеся в справочной литературе данные о ТФХ поверхностных тканей МБО часто приведены для одной конкретной температуры, обычно комнатной. Кроме температуры на ТФХ кожи МБО влияют и другие факторы – медико-биологические. К ним относятся анатомическое место расположения измеряемого участка кожи МБО и другие. Вследствие чего, данные о ТФХ тканей МБО могут сильно отличаться между собой.

В медицине и лёгкой промышленности необходимо наличие баз данных по ТФХ МБО для решения научных и практических задач. Настоящая работа посвящена пополнению и уточнению этих баз. Полученные экспериментальные данные по тепловой активности можно использовать при расчётах зоны комфортных ощущений МБО с предметом при кратковременном их соприкосновении, используя критерий комфортности. А так же для расчёта критической температуры, при которой ещё не наступает тепловое повреждение кожи МБО, используя критерий ожогового поражения.

Учитывая, что импульсный иррегулярный тепловой режим относится к методам неразрушающего контроля (НК), а так же благодаря точным аналитическим выражениям для определения ТФХ, базирующихся на моделях полупространств, данный метод возможен для определения ТФХ тканей одежды. Аппаратная реализация метода может дать результаты эксперимента с разными величинами относительных ошибок в погрешностях. Для определения более точных эффективных величин необходимо знать не только погрешности метода, но и аппаратные и метрологические погрешности, что бы корректно интерпретировать результаты измерений.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному изучению теплофизических свойств МБО, значения которых определяют комфортные ощущения при кратковременных контактах и критическую температуру, при которой ещё не наступил термический ожог.

Работа выполнена при поддержке грантов: «Ползуновские гранты», «УМНИК-1» и «УМНИК-2» от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

**Цель диссертационной работы** – *исследование тепловой активности МБО и изучение его взаимодействия с внешней средой с точки зрения теплофизики, а так же расчёта граничной температуры разных анатомических участков объекта, при которой ещё не наступает тепловое повреждение кожи.*

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены задачи:

- получение экспериментальных данных по тепловой активности МБО в зависимости от анатомического места и температуры этого участка;

- получение экспериментальных данных по тепловой активности тканей одежды;

- аналитическое решение модельной задачи распределения температур при кратковременном контакте двух полуограниченных неизотермических тел, одно из которых имеет покрытие;

- обоснована актуальность, выбраны методы исследований, позволяющие получать наиболее точные результаты экспериментальных исследований;

- применён принцип обобщённой проводимости для определения ТФХ изучаемого объекта с использованием понятия «действия»;

- определены оптимальные условия проведения эксперимента, обеспечивающие адекватность математических моделей;

- проведен анализ погрешностей: методических и аппаратных для разных методов исследования (абсолютный метод и относительный метод измерений с разной применяемой аппаратной частью).

**Научная новизна работы.**

1. Усовершенствованна методика исследования тепловой активности разных участков кожи МБО, за счёт введения комбинированного расчёта прогнозирования ТФХ МБО.
2. Рассмотрена математическая модель теплообмена между предметом с покрытием и МБО при их кратковременном их соприкосновении. Получено аналитическое выражение для температуры в месте контакта этого предмета с покрытием с МБО.
3. Измерена тепловая активность 4 искусственных кож при комнатной температуре.
4. На основе принципа обобщённой проводимости проведено сравнение двух расчётных методов: с использованием понятия «действия» и тепловых сопротивлений. Результаты оказались идентичны, за исключением случая системы с взаимопроникающими компонентами при адиабатическом дроблении.
5. Измерена тепловая активность МБО в различных анатомических областях при температурах от 0ºС до 40ºС.
6. Обнаружено по аналитической модели, что при кратковременном касании жидкого МБО с другой жидкостью с отличной от него температурой в месте контакта температура зависит от температуропроводности, а не от тепловой активности или теплопроводности.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Данные по теплофизическим свойствам МБО, непосредственно отвечающих за комфортные ощущения при кратковременных соприкосновениях с предметами внешней среды, представляют практическую ценность для научно-исследовательских университетов, лёгкой промышленности и медицины, и используются в проектировании и изготовлении материалов современной одежды, для оказания более качественных медицинских услуг.

Модифицирована методика проведения эксперимента, адекватная модельной задаче, составленной и решённой для нахождения ТФХ МБО, контактирующего с предметами окружающей среды с покрытием и без него, в аналитическом виде. Для тонких верхних слоёв покрова МБО рекомендовано применять как можно меньшие по длительности импульсы тока, в отличие от более толстых слоёв покрова МБО для того, что бы получать данные по эффективной тепловой активности, не искажённые наличием особенностей объекта исследований - МБО (внутреннего распределённого источника тепла по объёму и наличие теплового потока от расположенных в нижних слоях МБО цилиндрических объектов малого диаметра с постоянной температурой), при проведении экспериментов с плоским датчиком в импульсном иррегулярном тепловом режиме используя относительный метод измерения «тонкой нити».

**Реализация научно-технических результатов** подтверждена Актом о внедрении.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты теоретического и экспериментального исследования теплофизических свойств тканей МБО в зависимости от анатомического расположения и температуры. Математическая модель взаимодействия внешней среды при кратковременном соприкосновении с МБО и его компонентами с разными агрегатными состояниями.
2. Теоретические расчёты ТФХ дисперсных сред, к которым относится МБО, методом «действия» - разновидностью принципа обобщённой проводимости.
3. Результаты измерения тепловой активности МБО и 4-х видов искусственных кож.
4. Рекомендации по применению методики проведения эксперимента в импульсном иррегулярном тепловом режиме с плоскими датчиками по измерению тепловой активности МБО: для верхних слоём покрова МБО использовать импульсы напряжения такой длительности, что бы температурная волна от резистивного элемента датчика не затрагивала слои дисперсного объекта исследования, в которых имеется особенности в виде наличия *внутреннего распределённого источника тепла по объёму* и *наличие теплового потока от расположенных в нижних слоях МБО цилиндрических объектов малого диаметра с постоянной температурой*.
5. Результаты теоретического исследования прогнозирования температуры поверхности МБО при кратковременном контакте с жидкой средой с помощью комбинации аналитических расчётов, когда МБО моделируется как твёрдая и как жидкая среда.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена известностью методики проведения эксперимента, зарекомендовавшей себя в теплофизической практике проведения исследований. Теоретические расчёты согласуются с экспериментальными данными на качественном уровне, а относительная общая погрешность измерений коэффициента эффективной тепловой активности МБО не превосходила 5%, а искусственной кожи – до 10%.

**Личный вклад автора.** Основные теоретические и экспериментальные исследования выполнены на кафедре «Физика». Все экспериментальные данные эффективной тепловой активности МБО и расчёты для элементарной ячейки (5 мм) кожи МБО методом «действия» выполнены лично автором. Кроме того, автор активно принимал участие в проведение экспериментов и расчётов в смежных исследованиях, которые указаны в литературе в данной работе. Автором предложен комбинированный аналитический расчёт температурных полей в МБО и температуры на поверхности МБО при кратковременном соприкосновении с жидким телом с отличной температурой. Автор с помощью созданной им портативной установки и датчиков к ней измерил тепловую активность дисперсных материалов применяемых при изготовлении одежды для МБО.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на заседании кафедры "Физика" МАИ; на II Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ», г. Санкт-Петербург 2012г; на 9-ой и 11-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика – 2010 и 2012», г. Москва; на 4 Всероссийском межотраслевом молодёжном научно-техническом форуме «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва; на V Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум»; на конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2013».

**Публикации.** Основные результаты работы отражены в четырёх статьях, опубликованных в журналах: "Современные проблемы науки и образования", издательство «Российская Академия Естествознания», «Инженерно-физический журнал» издательство Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» Национальной академии наук Беларуси и Journal of Engineering Physics and Thermophysics издательства Спрингер (Springer).

**Структура и объем работы.**Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов. Объем работы составляет 153страниц, включая 14 рисунка, 5 таблиц, список используемых литературных источников из 139 наименований, в том числе 57 зарубежных источников.

**Содержание работы**

**Во введении**обоснована актуальность работы и ее практическая значимость. Кратко изложены основные задачи и содержание работы, указанна их научная и практическая ценность.

**Первая глава**посвящена кратковременному взаимодействию МБО с внешней средой с теплофизической точки зрения. Дан обзор литературы с математическими моделями с описанием распределения температуры в МБО (коже) при воздействии на неё внешней среды. Приведены биофизические аспекты и математические модели формирования термического ожога и его развитие во времени. Для граничных условий 1-го, 2-го, 3-го и 4-го рода приведены решения уравнения биотепла. Рассмотрено уравнение Дюхамел-Неймана применительно к покровным тканям МБО для описания термомеханических свойств МБО при температурном воздействии.

Записан критерий комфортности при касании МБО с нагретым (охлаждённым) телом твёрдым. Считая, что диапазон комфортных температур для МБО находится в диапазоне 29-37 ºС, критерий комфортности можно записать в виде:

.

Индексом «» здесь обозначен МБО, «» - нагретое (охлажденное) тело, то есть искусственная кожа, а «» относится к их начальным значениям температуры. На поверхности кожи МБО устанавливается температурный скачок, величина которого зависит лишь от разности начальных температур соприкасаемых тел  и от отношения их тепловых активностей.

Изменения температуры на поверхности МБО не зависят от времени; эта температура устанавливается сразу в момент прикосновения и не меняется в дальнейшем в течение нескольких секунд. Из формулы (0) можно сделать два важных вывода:

1. Если ε1 « ε2 (коэффициент тепловой активности МБО много меньше коэффициента тепловой активности касающегося его тела), то  и , то есть температура на поверхности МБО будет равна температуре касающегося его тела.
2. Если ε2 « ε1 (коэффициент тепловой активности МБО много больше коэффициента тепловой активности касающегося его тела), то  и , то есть температура на поверхности МБО будет равна температуре самого МБО и никакого скачка температуры не возникает. Это значит, что при малом коэффициенте тепловой активности разогретое тело будет восприниматься как «тёплое», а заметно охлажденное тело будет восприниматься как «прохладное».

**Вторая глава** посвящена теоретическому обоснованию измерению ТФХ методом импульсного иррегулярного теплового режима, который базируется на использовании уравнения теплопроводности в виде: .

Постановка модельной задачи для плоского идеального источника тепла при t≥0 следующая:

 (1)

При краевых условиях, в силу симметрии температурного поля относительно оси х: при t=0, Т/=0; при х→∞, Т/→0; при х=0, , где Т/=Т-Т0.

Решая (1) относительно температуры пластины для х=0 для двух моментов времени, получим формулу для тепловой активности среды, в которой находится источник тепла [Г. Карслоу и Д. Егер Теплопроводность твёрдых тел. М. 1964]:

 (2)

Приведённая во второй главе модель справедлива для идеальных источников тепла. Для более корректного описания эксперимента необходимо учитывать поправки на реальную модель источника тепла. К числу их относят влияние собственной теплоёмкости источника, влияние геометрических размеров (длины и ширины) источника тепла, учёт нелинейности уравнения теплопроводности и влияние контактного сопротивления. При измерении плоским зондом на подложке суммарная величина поправок не превышала относительную погрешность измерений в 5% для относительного метода измерений «горячей нити» МБО и до 10% для абсолютного метода измерений для изучения искусственных кож.

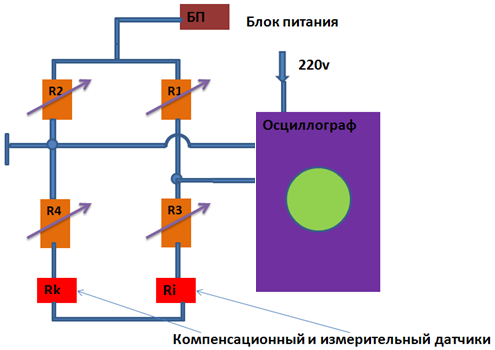
**Третья глава** посвящена реализации приведённой выше модели для измерения ТФХ МБО и тканей одежды.

Практическая реализация приведённых моделей заключалась в использовании зонда-датчика с определённой геометрией температурного поля и с определёнными его геометрическими размерами. Проводились измерения электрического сопротивления измерительного датчика в конце импульса напряжения. Далее, по калибровочной таблице рассчитывалась температура датчика.

Для измерения ТФХ МБО и тканей одежды использовались плоские зонды на подложке. Созданные датчики для исследования искусственной кожи представляют собой напылённый оксид алюминия-3 толщиной 0,2мкм на стеклянную подложку толщиной 1мм, по бокам которой напылена медь толщиной 1мкм и приварены 2 металлических провода для коммутации с экспериментальной установкой. Для изучения МБО использовались стандартные ГОСТированные заводские терморезистывные маленькие платиновые датчики на 100 Ом.

*Описание установки.*

На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки. Использовался импульсный иррегулярный тепловой режим разогрева датчика с плоской симметрией температурного поля. Одним из условий получения корректных данных в ходе эксперимента является термостатирование эталонного (компенсационного) датчика сопротивлением Rk (стандартный платиновый датчик на 100 Ом при нормальных условиях), находящегося в толуоле. Питание от аккумуляторных батарей 24В. Длительность импульсов выбиралась согласно выработанным рекомендациям в данной работе (1-5с). Осциллограф служит для регистрации сигналов разбаланса и баланса мостика Уинстона, содержащего переменные сопротивления R1, R2, R3 и R4 (см. рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки.**

Для относительного метода измерения тепловой (термической) активности в одно из плеч мостовой схемы введен компенсационный зонд-датчик КД (плоский зонд, опущенный в масло в колбе, которая находится в термостатированном снегом резервуаре при температуре 0ºС), который необходим для выдачи постоянного сигнала сравнения. Это обеспечивается тем, что во всех опытах КД находится в одной и той же среде (масле). Сила тока в обоих плечах моста является постоянной заданной величиной, т.е. температурные изменения компенсируются дополнительным сопротивлением R3.

Длительность импульса нагрева измерительного зонда сопротивлением Ri определялась из условия, при котором длина теплового поля превышает размеры неоднородности компоненты исследуемой системы, поскольку поверхностная ткань МБО – кожа – представляет собой неоднородную многослойную среду. Обычно 3 слоя выделяют. Во втором и третьем из них расположен внутренний распределённый источника тепла по объёму и присутствует тепловой поток от расположенных в нижних слоях МБО цилиндрических объектов малого диаметра с постоянной температурой. Первый слой МБО такие особенности не имеет и его толщина различна на разных участках: составляет от 0,7мм на поверхности кисти руки и до 5мм на пятке человека. Тепловое поле от источника тепла (измерительного датчика) должно быть равно этой величине для корректности проведения эксперимента. Это достигается только, если длительность импульса составляет от 1с и более. Верхняя граница импульса ограничена значением критерия ожогового поражения и рекомендациями к проведению эксперимента на первом (внешнем) слое МБО.

*Методика проведения эксперимента*.

Методика проведения эксперимента базируется на рассмотренной модели плоского источника тепла q0 без подложки. Изменение приращения температуры источника между моментами времени окончанием разогрева датчика t и его началом t0 записывается в виде:

 (3)

Соотношение (3) позволяет определить тепловую активность исследуемого объекта ε1 по известной тепловой активности ε2 и приращениям температуры источника в различные моменты времени  при известном постоянном тепловом потоке от резистивного элемента q0, определение которого сопряжено с метрологическими и другими трудностями.

Экспериментальные исследования МБО базируются на использовании мостовой компенсационной схемы (рис. 1) на которую подаются прямоугольные импульсы постоянного напряжения. Сложные расчеты теплового потока от резистивного элемента q0 нет необходимости выполнять. Для индикации сигнала с моста используется осциллограф. Для относительного метода измерения используется формула для расчёта тепловой активности исследуемого вещества :

 (4)

Здесь  - тепловая активность подложки (поликора) при температуре, достигнутой при длительности задержки t и при контакте с эталонной жидкостью (толуолом);  - такая же характеристика, но при контакте с исследуемым веществом;  - тепловая активность толуола при температуре, достигнутой при длительности задержки;  - сопротивление измерительного датчика при контакте с толуолом;  - сопротивление измерительного датчика, помешенного в исследуемую жидкость.

Параметры мостовой схемы изначально подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие равенства плеч на мостике Уинстона в обозначениях приведённых в *описании установки* на рисунке 1: . С помощью последнего соотношения можно определить сопротивление измерительного зонда, а по известной зависимости сопротивления материала резистивной полоски от температуры – температуру самого зонда и находящегося в контакте с ним образца по формуле (4).

Исследуемый участок тела МБО обдувался в течении 15-20 минут от фена с заданной температурой воздуха, что позволяло принять коже в этом месте температуру обдуваемого воздуха через некоторое время. Резистивный элемент подвергался обдуву в это же время. Через 15 минут обдува датчик прикладывался на короткое время к исследуемому участку тела и разогревался разным по длительности прямоугольным импульсом в зависимости от участка кожи. После чего убирался с поверхности кожи и после остывания через 10 минут снова прикладывался к телу. Каждая точка измерялась 5 раз и среднее значение выбиралось в итоге.

Методика проведения эксперимента с искусственной кожей выполняется в следующей последовательности. На экспериментальном образце портативного измерительного прибора, созданного автором, задаётся режим исследования согласно теоретическим расчётам и критериям: время импульса, скважность импульсов, напряжение постоянное, частота снятия сигнала в импульсе прямоугольном. Благодаря протеканию тока через резистивный элемент на изготовленном датчике выделяется тепловой поток. Зная геометрические размеры датчика и его теплофизические свойства, можно рассчитать тепловой поток. Выходной сигнал на приборе показывает сопротивление разогретого датчика в нескольких точках во время его импульсного разогрев током. Согласно калибровочным таблицам и ГОСТу Р 8.625-2006, сопротивление датчика переводится в температуру по формуле. Полученный результат после статистической обработке записывается как результат исследования в таблицу без дополнительной информации о погрешностях. Далее использовалась формула, с учётом оттока тепла в подложку:

 (5)

где индекс 01 относится к первой измерительной точке в одном импульсе на датчике, а 02 к последней; R(T01) и R(T02) – регистрируемые сопротивления на приборе, Ом; t01 и t02 – время регистрации первого и последнего измерения сопротивления в одном импульсе, разогревающим датчик, с; U- подаваемое напряжение, В; тепловая активность стеклянной подложки ε2 и искусственной кожи ε1, Дж/(м2·К·с0,5); Т – температура датчика.

В **главе 4** представлены результаты исследований покровных тканей МБО и искусственных кож. Описан метод прогнозирования тепловой активности на основе обобщённой проводимости с использованием понятия «действия». «Действием», применительно к теплопереносу, является величина: ,  – коэффициент теплопроводности вещества. Проведены сравнения расчётных методов обобщённой проводимости на основе понятия «действия» и тепловых сопротивлений и выявлены различия в расчётных формулах при адиабатическом делении ячейки. С помощью математического моделирования с использованием понятия «действия» показано влияние наличия твёрдых и жидких компонент в дисперсной среде МБО (в коже человека) на измеряемую величину тепловой активности.

*Метод прогнозирования тепловой активности на основе принципа обобщённой проводимости с использованием понятия «действия»* заключается в разбиении объекта исследования на элементарные ячейки, каждая из которых повторяет структуру и ТФХ всего исследуемого объекта; далее тепловое поле в изучаемой дисперсной среде описывается по аналогии с электрическим таким образом, что криволинейные линии тока, в силу малости размера элементарной ячейки, заменяются на прямолинейные, что в итоге для математического описания становится более удобно с использованием преобразования Лапласа. Данный метод отличается от описанного в работе [Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей композиционных материалов. - Л.: Энергия, 1974] тем, что он более удобен при расчёте эффективных ТФХ дисперсных сред в виде жидкостей и пластических тел, ввиду лёгкости описания сложной формы компоненты системы, поскольку её геометрия не важна, а нужно знать только её объёмную долю в системе. Принцип минимума «действия» может быть полезен при оценке точности численного решения стационарных температурных полей. Так, увеличивая точность описания температурного поля, «действие» уменьшается, имея в пределе своё минимальное значение, соответствующее истинному распределению температурного поля. «Действие» применяется для прогнозирования ТФХ МБО.

Моделировалась элементарная ячейка кожи МБО с длинной ребра L, в которой находится твёрдое включение (волос из α-кератина) в виде усечённого цилиндра радиусами r1 и r2 (r1 < r2) высотой L и жидкое включение (потовая железа из воды) в виде цилиндра с радиусом r0  и высотой L. Их расположение изображено на рисунке 2. Для корректности моделирования необходимо ввести условие r2«L иr0 « L.

1

3

2

q0

**Рис. 2 Модельная задача. Элементарная ячейка: 1- потовая железа, 2- эпидермис, 3- волос.**

Т2 – температура на границе среда-кожа или на верхней грани ячейки, Т1- температура дермы или нижней грани ячейки. Пусть тепловой поток нормален верхней поверхности ячейки. Элементарная ячейка, имеющая форму куба с ребром L, ограничена торцевыми изотермическими поверхностями с температурами T1 и T2 соответственно, и боковыми адиабатическими. Применив метод «действия» для каждой компоненты, получим составляющие для теплопроводности:

 (6)

 (7)

где , ,, , .

Эффективная тепловая активность находится по формуле:

, (8)

где  - средняя теплоёмкость МБО (Дж/(кг·ºС)), - среднее по объёму значение плотности МБО (кг/м3).

Толщина первого наружного слоя МБО не является постоянной величиной для разных участков тела человека (МБО), поэтому предложено при проведении эксперимента использовать различные расчётные формулы. Для случая толстого первого наружного слоя – кожа МБО моделируется как не живая среда. Для случая тонкого первого наружного слоя кожа МБО моделируется с учётом внутреннего распределённого источника тепла по объёму и наличие теплового потока от расположенных в нижних слоях МБО цилиндрических объектов малого диаметра с постоянной температурой. Данные факторы учтены в уравнении биотепла Пеннеса:

, (9)

где ρ, С, k, Т – плотность (кг/м3), теплоёмкость (Дж/(кг·ºС)), теплопроводность (Дж/(с·м·ºС)), температура (ºС) ткани МБО; , , ,  - плотность крови (кг/м3), теплоёмкость крови (Дж/(кг·ºС)), коэффициент перфузии крови (1/с), температура артериальной крови (ºС);  - генерация тепла за счёт метаболизма (внутреннего распределённого источника тепла по объёму) (Вт/м3), - пространственный источник тепла (обычно, это внешнее воздействие от датчика, реже – кровеносный крупный сосуд или опухоль).

*Критерий ожогового поражения с граничными условиями 3-го рода*

Если МБО (применяется индекс 2 в обозначении) соприкасается с жидкими телами (применяется индекс 1 в обозначении), то записываются граничные условия 3-го рода. Температуру на поверхности МБО (как твёрдая среда) Т2Т(х,t) можно вычислить аналитическим методом, приняв ряд допущений. Главное из которых - отток тепла не происходит нормально поверхности соприкосновения (как бы ограничена изотермической поверхностью), то температура на границе раздела сред (на поверхности МБО) в аналитическом виде известна [Лыков, А.В. Теория теплопроводности/ – М.: Высшая школа, 1967]. Уравнение конвективного потока перспирации по порам и внутри МБО не применяется из-за выбранного малого времени взаимодействия до 5с, а так же из-за характерного размера масштаба выбранной модели (5 мм).

, (10)

Известно, что аморфное тело (кожа) МБО состоит на 60-70% из воды. Необратимые реакция в следствии термического (или холодового) воздействия наступают при достижении определённой температуры и времени при котором эта температура была. Это интегральный показатель. Предлагается рассмотреть МБО ещё и как жидкую среду, которая кратковременно контактирует с более горячей жидкой средой. Модельная задача запишется с граничными условиями 3-го рода так:

, , ; , , .

, ; , . (11)

,  , 

Получено аналитическое решение:

 (12)

где t- время контакта, с; а1- температуропроводность жидкой среды, м2/с; а2- температуропроводность МБО как жидкости, м2/с; α – коэффициент теплопередачи между МБО и жидкостью (обычно 0,7), Вт/(м2К); Т01- температура начальная жидкой среды, К; Т02- температура начальная МБО, К.

Согласно выражению (12), при контакте жидкого МБО с жидкостью определяющим значением в критерии ожога является не тепловая активность или теплопроводность, а температуропроводность и коэффициента теплоотдачи.

Предлагается истинную температуру на поверхности МБО искать как значение, находящееся между значениями температур по формулам (10) и (12):

 (13)

Значения коэффициентов **k** и **r** определяются экспериментальным путём и зависят от различных факторов и состояния МБО. Наиболее существенным фактором является влагосодержание (более 70%). Поэтому, рекомендуется брать значения **r** в диапазоне 0,6-0,7, а **k** – 0,4-0,3. То есть критерий ожогового поражения при граничных условиях 3-го рода можно записать так: . (14)

*Влияние покрытия.*

Для изучения влияния покрытия была смоделирована задача: в начальный момент времени τ=0 покрытие и первое тело имеют одинаковую температуру . Если окружающая среда моделируется как тело, имеющее покрытие, то система дифференциальных уравнений запишется так:

 (15)

При начальном условии:

,



и граничных условиях 4-го рода:



Используя преобразования Лапласа, решение для координаты х=0:

 (16)

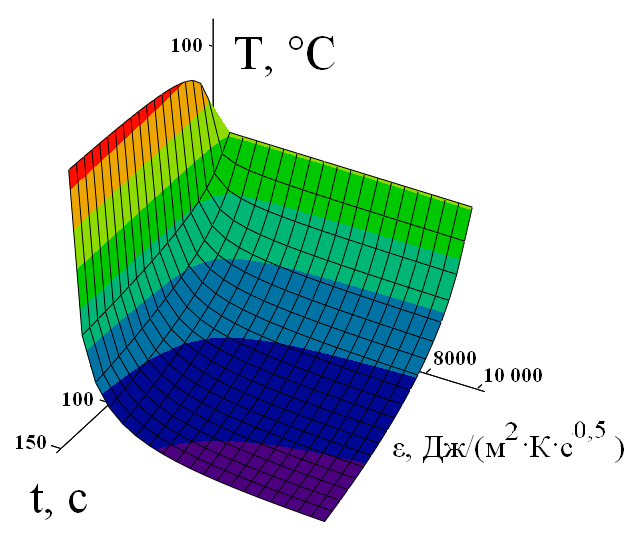
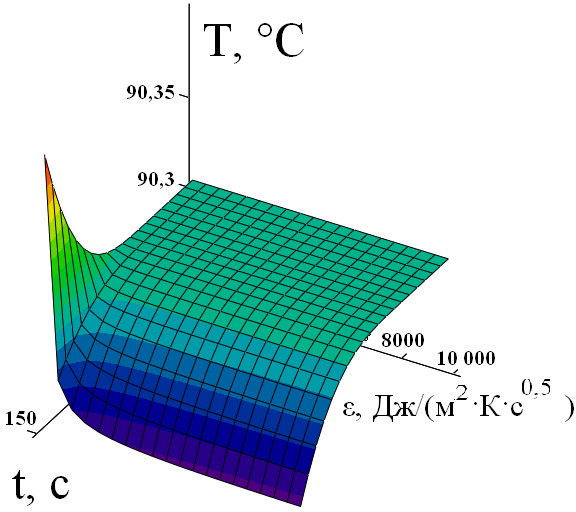
где: , nZ\forallZ[0;∞).

τ- время, с; х0- толщина покрытия, соприкасаемого с МБО, тела, моделируемого тканью одежды, м; ε- тепловая активность, Дж/м2·К·с0,5; индексы: 0, 1 и 2 относятся к покрытию, соприкасаемому телу и МБО соответственно.

При τ→0 или х0→∞ из (16) получим:  (17)

При τ→∞ или х0→0 из (16) получим:  (18)

На рисунке 3 показано, каким образом влияет толщина покрытия на распределение температур, рассчитанная по формуле (16). В качестве тела без покрытия выбрано МБО ε2=1100 Дж/(м2·К·с0,5), а=1,6\*10-7 м2/с, а покрытие было с тепловой активностью ε0= 2000 Дж/(м2·К·с0,5). Толщина покрытия принималась 0,001м и 0,01м.

А) Б) 

**Рис 3. Зависимость тепловой активности горячего тела от времени соприкосновении при: а)х0=0,001м и б) х0=0,01м.**

*Результаты экспериментов МБО*

Получены экспериментальные данные по тепловой активности кожи МБО при разной температуре, сведены в Таблицу 1.

**Таблица 1. Тепловая активность МБО**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Участок на теле МБО | Тепловая активность ε·103, Дж/(м2·К·с0,5) в зависимости от температуры | | | |
| 0-3°С | 10-13°С | 25°С (Литер.) | 40-42 °С |
| Лоб | 1,27 | 1,31 | 1,35 | 1,36 |
| Щека | 1,27 | 1,31 | 1,35 | 1,37 |
| Кисть руки, ладонь | 1,10 | 1,13 | 1,19 | 1,21 |
| Кисть руки (внеш. сторона) | 1,21 | 1,25 | 1,28 | 1,29 |
| Живот | 1,28 | 1,30 | 1,33 | 1,34 |
| Предплечье | 1,15 | 1,18 | 1,22 | 1,26 |
| Область подошвы | 0,84 | 0,86 | 0,87 | 0,88 |
| Область сустава голеностопного | 0,90 | 0,92 | 0,95 | 0,97 |

Погрешности измерений учитывали и аппаратную погрешность полученных данных и методологическую. Общая относительная погрешность измерения не превышала 5%.

Значения эффективной измеренной тепловой активности для тонкой кожи МБО больше чем для толстой кожи. Это объясняется с одной стороны тем, что измеряемая величина тепловой активности искажена внутренним распределённым источником тепла по объёму и наличию теплового потока от расположенных в нижних слоях МБО цилиндрических объектов малого диаметра с постоянной температурой, а с другой – процентным содержанием воды в разных по толщине слоях кожи МБО.

Уменьшение значения коэффициента тепловой активности кожи МБО с уменьшением её температуры объясняется тем, что кожа МБО состоит примерно на 70% из воды, тепловая активность которой с уменьшением температуры тоже уменьшается. К этому добавляется биологический механизм – снижение влагосодержания в коже МБО из-за перекрывания и объёмного уменьшения влагосодержащих компонент МБО и уменьшение испарения с поверхности МБО вследствие внешнего холодового воздействия на кожу МБО.

Используя критерий ожогового поражения (14) рассчитана предельная температура горячего предмета с исследуемым участком кожи МБО, при которой ещё не наступит её термическое повреждение (ожог). Для сравнения приведены пороговые значения температуры при времени взаимодействия в 3с между МБО (кожи) при температуре =25ºС с нагретым телом: металл (=10 000 Дж/(м2Кс0,5)), пластмасса (=2000 Дж/(м2Кс0,5)) и уголь (=100 Дж/(м2Кс0,5)). Результаты расчётов даны в Таблице 2.

*Результаты экспериментов искусственных кож*

Для практического применения критерия комфортных ощущений была экспериментально измерена эффективная тепловая активность нескольких искусственных кож. Полученные данные учитывают ряд погрешностей (пористость, влагосодержание и эффективная площадь контакта), связанных с особенностями искусственных кож.

В Таблице 3 приведены результаты экспериментов на искусственных кожах. Расчёт выводов о том, что одежда из конкретного материала (искусственной кожи) соответствует критерию комфортности, описанному в **главе 1**.

**Таблица 2 Температура касаемого на 3с тела с МБО**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Температура касаемого на 3с тела с МБО, ºС | | |
| Участок на теле МБО | Металл | Пластмасса | Уголь |
| Лоб | 65,29 | 84,46 | 539,75 |
| Щека | 65,29 | 84,46 | 539,75 |
| Кисть руки, ладонь | 64,72 | 81,62 | 482,95 |
| Кисть руки (внешняя сторона) | 65 | 83,22 | 514,9 |
| Живот | 65,22 | 84,1 | 532,65 |
| Предплечье | 64,83 | 82,15 | 493,6 |
| Область подошвы | 63,59 | 75,94 | 369,35 |
| Наружная область голеностопного сустава | 63,87 | 77,36 | 397,75 |

**Таблица 3 Тепловая активность искусственных кож**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Искусственная кожа | Тепловая активность, Дж/(м2·К·с0,5) |
| 1 | Винилискожа ТР | 290 |
| 2 | Перчаточная, пористая | 276 |
| 3 | Винилискожа ТР, пористая | 235 |
| 4 | Винилискожа Т, галантерийная | 450 |

*Основные выводы по работе*

1. Для измерения ТФХ МБО и искусственных кож была использована кафедральная установка и установка автора. Надежность метода подтверждена полученными экспериментальными данными, которые сопоставимы с данными других исследований. Получены коэффициенты тепловой активности искусственных кож и МБО.

2. Проанализирована математическая модель влияние покрытия на формирование полей температур при кратковременном контакте двух полуограниченных неизотермических тел. Проведены асимптотические аналитические решения полученного уравнения. Дан анализ уравнения теплопроводности для такой системы тел. Графически представлена зависимость тепловой активности второго тела и толщины покрытии и времени в зависимости от толщины покрытия.

3. В работе представлена методика оценки толщины одежды с её тепловой активностью, которая способна уберечь кожный покров МБО от ожога. Зная коэффициенты тепловой активности покрытия, МБО и касающегося его горячего тела можно рассчитать по аналитическому выражению толщину покрытия, способного предотвратить ожог в следствии высокой температуры.

4. Впервые применён принцип обобщённой проводимости с использованием понятия «действие» для прогнозирования ТФХ МБО с учётом наличия твёрдых и жидкий компонент в дисперсной среде МБО. Получено аналитическое выражение для тепловой активности и теплопроводности, учитывающее эти компоненты кожи МБО совместно.

5. Получены экспериментальные данные о тепловой активности поверхностных тканей МБО в зависимости от их анатомического расположения и при различной температуре. Экспериментально подтверждены основные физиологические зависимости относительно теплофизических свойств: при уменьшении температуры кожи МБО её тепловая активность снижается в основном из-за того, что кожа состоит порядка на 70% из воды, тепловая активность которой с уменьшением температуры тоже уменьшается. К этому добавляется биологический механизм – снижение влагосодержания в коже МБО из-за перекрывания и объёмного уменьшения влагосодержащих компонент МБО и уменьшение испарения с поверхности МБО вследствие внешнего холодового воздействия на кожу МБО.

6. Получены расчётные данные о критическом значении температуры, при которой ещё не наступил ожог, от кратковременного прикосновения горячего предмета к коже МБО.

7. Предложен полуаналитический метод расчёта ТФХ МБО, позволяющий более точно прогнозировать свойства кожи МБО в зависимости от анатомического расположения.

*Основные публикации по теме диссертации*

1. Симанков Д.С., Василевский Д.В., Спирин Г.Г. Бесконтактный метод исследования биологических тканей // Сб. тез. 9-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010». Москва, 16-18 ноября 2010г; изд. МАИ, C. 152-153.

2. Симанков Д.С. Моделирование профиля температурных полей в плоскости контакта двух полубесконечных неизотермических тел, одно из которых имеет покрытие // Сб. тез. международной конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2013». Москва, 16-18 апреля 2010г; изд. МАИ, С. 81-82.

3. Симанков Д.С. Прибор "Режим-1" для измерения теплофизических свойств веществ // Сб. тез. II Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ». Санкт-Петербург, 28-30 ноября 2012г; изд. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С. 70.

4. Симанков Д.С. Прибор "Режим-1" для измерения теплофизических свойств веществ // Сб. тез. 11-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012» Москва. 13-15 ноября 2012г; изд. МАИ, C. 397-398.

5. Симанков Д.С. Прибор "Режим-1" для измерения теплофизических свойств веществ // Сб. тез.4 Всероссийском межотраслевом молодёжном научно-техническом форуме «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Москва, 30 октября 2012г; изд. МАИ, C. 180-182.

6. Василевский Д.В., Спирин Г.Г., Побережский С.Ю., **Симанков Д.С.** Оценка влияния излучения на результат кратковременных измерений теплофизических характеристик полупроницаемых сред. // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 61, 2012. — Режим доступа:

[**http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35612**](http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35612) — 01.02.2013.

7. **Симанков Д.С.**, Побережский С.Ю. Измерение теплофизических характеристик фторуглеродов импульсным методом. //Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования». Выпуск № 6, 2012. — Режим доступа:

[**http://www.science-education.ru/106-7730**](http://www.science-education.ru/106-7730) — 12.12.2012.

8. Побережский С.Ю., **Симанков Д.С.** Определение температур гомогенной нуклеации жидкостей. //Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования». Выпуск № 6, 2012. — Режим доступа:

[**http://www.science-education.ru/106-7923**](http://www.science-education.ru/106-7923) — 12.12.2012.

9. **Симанков Д.С.**, Побережский С.Ю. Критерий комфортности температурных ощущений медико-биологических объектов. //Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования». Выпуск № 6, 2012. — Режим доступа:

[**http://www.science-education.ru/106-7725**](http://www.science-education.ru/106-7725) — 12.12.2012.

10. **Симанков Д.С.** Влияние покрытия на формирование полей температур при кратковременном контакте двух полуограниченных неизотермических тел. //Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования». Выпуск № 2, 2013. — Режим доступа: [**http://www.science-education.ru/108-8621**](http://www.science-education.ru/108-8621)   — 18.03.2013.

11. Симанков Д.С. Прибор "Режим-1" для измерения теплофизических свойств веществ // Доклад на V Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум». Москва. 15февраля – 31 марта 2013г. Тезисы доклада. — Режим доступа: [**http://www.scienceforum.ru/2013/15/6556**](http://www.scienceforum.ru/2013/15/6556) — 01.04.2013.

12. **Симанков, Д.С.** Задача кратковременного взаимодействия твёрдого и аморфного тел / Д.С. Симанков// ИФЖ. – 2016. – Т.89 – №1.

13. **Simankov, D.S.** "Problem of Brief Interaction of Liquid and Amorphous Bodies"/ D.S. Simankov// Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2016. - №89 (1) - DOI 10.1007/s10891-016-1366-z

Для заметок