

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК - ОДЕЖДА - СРЕДА»

Корнев Н.В.<sup>1</sup>, Черунова И.В.<sup>2</sup>, Лебедева Е.О.<sup>3</sup>, Колесник С.А.<sup>2</sup>, Юдина Е.В.<sup>2</sup>,  
Князева С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>"Университет Росток", Росток, Германия (18059, Росток, ул. Альберта Эйнштейна, 2), e-mail: sylvia.worbs@uni-rostock.de

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», Шахты, Россия (346500, Ростовская область, г. Шахты, ул. Шевченко, 147), e-mail: i\_sch@mail.ru

<sup>3</sup>Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», Ростов-на-Дону, Россия (344018, Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, 215), e-mail: leleol@mail.

---

Прогнозирование и оценка теплового состояния человека в защитной одежде в сложных условиях среды осуществляется с помощью математического моделирования, в рамках которого в настоящее время используются различные подходы геометрического представления системы «Человек – Одежда – Среда». В работе приведено математическое описание процесса теплопередачи в системе «Человек – Одежда – Среда» с асимметрией тепловых потоков, обусловленной расположением теплотворных внутренних органов человека, и модельным представлением системы в виде эллиптических цилиндров. Ее использование подтверждено проведенными проекционными исследованиями поверхности туловища человека. Представленное решение позволяет повысить объективность прогнозирования теплового состояния системы «Человек – Одежда – Среда», достоверность и надежность инженерных решений для разработки современных видов защитной одежды от опасных температурных воздействий на человека в производственных и климатических условиях.

---

Ключевые слова: математическое моделирование, теплообмен, защитная одежда.

## MATHEMATICAL MODELLING OF PROCESSES OF HEAT EXCHANGE IN THE SYSTEM «PERSON-CLOTHES- ENVIRONMENT »

Kornev N.V.<sup>1</sup>, Cherunova I.V.<sup>2</sup>, Lebedeva E.O.<sup>3</sup>, Kolesnik S.A.<sup>2</sup>, Yudina E.V.<sup>2</sup>,  
Knyazeva S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The University of Rostock, Rostock, Germany (18059, Rostock, Albert-Einstein-Straße), e-mail: sylvia.worbs@uni-rostock.de

<sup>2</sup> Southern-Russian State University of Economics and Service, Shachty, Russia (346500, the Rostov region, Shachty, Shevchenko st, 147), e-mail: i\_sch@mail.ru

<sup>3</sup> Rostov technological institute of service and tourism, Southern-Russian State University of Economics and Service, Rostov-on-Don, Russia (344018, Rostov-on-Don, Varfolomeeva st, 215), e-mail: leleol@mail.ru

---

The forecast and assessment of a thermal condition of the person in protective clothes in difficult conditions of the environment is carried out by means of mathematical modeling. In this time various approaches of geometrical representation of the system «Person — Clothes — Environment» are used. In this article the mathematical description of process of a heat transfer is provided in the system «Person — Clothes — Environment» with the asymmetry of thermal streams caused by an arrangement of a calorific internal bodies of the person, and model representation of system in the form of elliptic cylinders. Its use is confirmed with the conducted researches of a surface of a body of the person. The presented decision allows to increase objectivity of forecasting of a thermal condition of the system «Person — Clothes — Environment», reliability of engineering decisions for development of modern types of protective clothes from dangerous temperature impacts on the person in production and climatic conditions.

---

Key words: mathematical modeling, heat exchange, protective clothes

### Введение

Для защиты человека в условиях неблагоприятной производственной и климатической среды используется защитная одежда. Для решения задач, возникающих при создании защитной одежды от тепловых потоков, в системе взаимодействия «Человек –

Одежда – Среда» (Ч-О-С), используется математическое описание процесса теплопередачи из глубинных слоев тела человека через одежду в окружающую среду, с учетом теплофизических характеристик тела человека, одежды и воздействия факторов окружающей среды [1, 3, 6].

В основе большинства математических моделей лежит принцип идеализации тела человека, как совокупности геометрических элементов: голова – шар; руки, ноги – цилиндры; туловище – цилиндр [1, 8]. Известно, что туловище в наибольшей степени определяет тепловой баланс человека [2]. Оно отличается не только геометрической сложностью описания, но и асимметрией тепловых потоков относительно условного центра ядра.

Расположение внутренних органов, производящих тепло, не является симметричным, и каждый внутренний орган характеризуется собственным уровнем основного обмена [5]. Основным обменом в данном случае называется измеренный уровень выделения теплоты по сравнению с нормальным, который определяется по формуле:

$$VOO = \frac{Q_{изм} - Q_{норм}}{Q_{норм}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $VOO$  - уровень основного обмена, %;  $Q_{изм}$  - измеренный уровень выделения теплоты, ккал.;  $Q_{норм}$  - нормативный уровень выделения теплоты, ккал.

В данном случае уровень основного обмена ( $VOO$ ) является определяющей характеристикой для оценки степени интенсивности тепловыделения в зоне размещения определенного органа, так как данный параметр напрямую отражает основные метаболические процессы. Больше всего влияют на уровень основного обмена печень, мозг и скелетные мышцы, причем мышцы в активном состоянии влияют на  $VOO$  гораздо больше, чем в состоянии покоя [5].

Проведенные проекционные исследования поверхности туловища человека как условного объекта исследуемой категории мужчин подтвердили, что его модельное представление может быть сформировано из набора эллиптических цилиндров [6, 7]. Такое решение ложится в основу разработки методов решения задач оптимизации и расчета параметров системы «Ч-О-С» с пассивными локальными источниками терморегуляции.

Рассматривая поперечное сечение туловища человека, основанное на полученных проекционных данных [6], из центра симметрии проведены радиусы, образующие секторы с центральным углом  $15^\circ$  (0,262 рад) (рисунок 1).

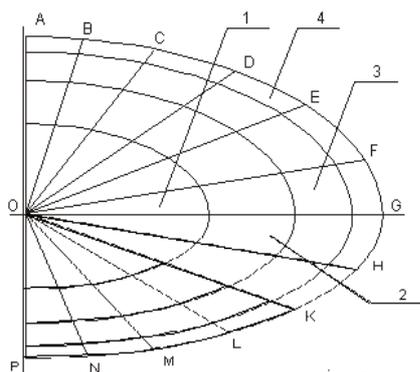


Рисунок 1– Поперечное сечение туловища (внутренние слои).

В соответствии с рисунком 1 позиции определены следующим образом: 1- ядро; 2- мышцы; 3- жировой слой; 4- кожа.

Используя данные о величинах толщины каждого из слоев внутреннего строения туловища человека, нами была выдвинута схема представления внутреннего строения туловища: внутренние слои туловища распределены в соответствии с долевым соотношением каждого из них к общему радиусу кривизны; внешнее строение представлено двумя (и более) эллиптическими цилиндрами, поперечные сечения которых различны.

Основные теплофизические характеристики тела человека, которые используются при расчетах параметров системы «Ч-О-С»: теплоемкость, теплопродукция, начальные температуры, коэффициенты теплопроводности и теплопередачи. Учитывая то, что поперечное сечение частей системы представлено послойно в виде последовательности слоев (ядро, мышцы, жир, кожа), где в рамках слоя «ядро» подразумевается наличие внутренних органов, введено положение, что в различных местах, в зависимости от расположения конкретных органов туловища, температурные показатели системы различны.

Для определения уровня теплопродукции зон, где размещаются указанные выше органы, рассчитаны УОО для всех активных участков теплопродукции человека: для печени УОО составит =6,992 Вт/м<sup>2</sup>; для сердца: 3,923 Вт/м<sup>2</sup>; для почек: 3,069 Вт/м<sup>2</sup>.

Учитывая математический подход к решению поставленной задачи, который предполагает деление туловища человека на сегменты с равным центральным углом, для определения сегментов, в которых размещаются теплотворные органы, необходимо иметь данные о площадях сечений, занимаемых данными органами. С этой целью были проведены дополнительные расчеты, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры теплотворных органов человека.

Орган	Объем, м <sup>3</sup>	Площадь поперечного	Площадь поверхности
-------	-----------------------	---------------------	---------------------

		сечения, м <sup>2</sup>	органа, м <sup>2</sup>
Печень	0,001715	0,012975	0,0663
Сердце	0,00032	0,00262	0,02477
Почки	0,000295	0,002932	0,0224

В результате расчетов были получены схемы размещения теплотворных органов в модели туловища человека по срезам, представленные на рисунке 2.

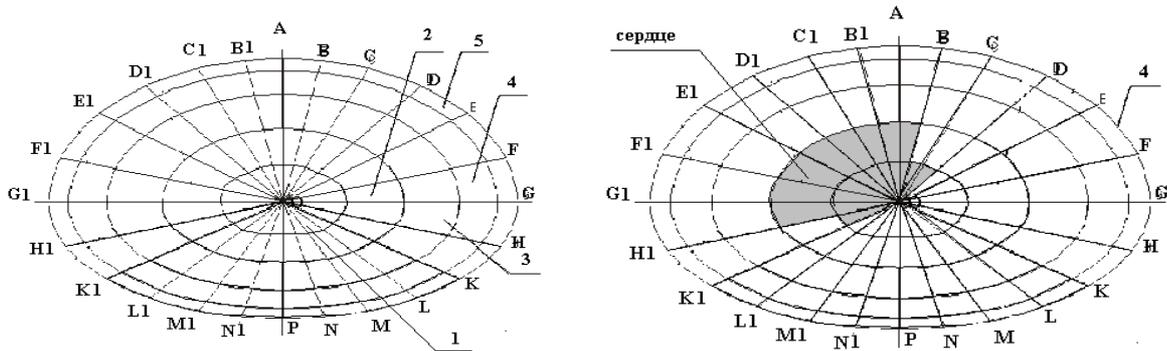


Рисунок 2 – Схема поперечного сечения туловища человека по срезам 1-5 (слева направо)

Полученные данные о геометрических и теплофизических характеристиках тела человека ложатся в основу математического моделирования системы «Ч-О-С», поэлементное представление теплопередачи опирается на описанные выше положения и также имеет аналитический способ решения [4], который позволяет рассчитать искомые параметры системы. Фундаментальная математическая модель задачи представляет собой совокупность дифференциальных уравнений с частными производными вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \Delta T_i + \frac{1}{c_i \rho_i} f_i \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где  $T_i = T_i(x, t)$  - температура в момент времени  $t$  в некоторой точке  $M$   $i$ -ой подобласти подсистемы «Человек-Одежда»;

$F_i = F_i(x, t)$  - плотность тепловых источников в  $i$ -ой подобласти;

$\Delta$  - оператор Лапласа.  $T_i = T_i(x, t)$

В качестве допущений для получения решения задачи были рассмотрены переходы к усредненным радиальным секторам в рамках послойного представления задачи. Правильность допущений проверена сравнением результатов моделирования и эксперимента. В результате расчетов аналитическим методом получено, что значения соотносятся с экспериментальными данными с погрешностью не более 15%.

Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанные способы решения задачи описания условной модели тела человека и моделирования системы теплообмена «Ч-О-С» приводят к получению инструментов и расчетных технологий для оптимизации, прогнозирования тепловом состоянии системы с высокой степенью объективности, а также с высокой степенью достоверности и надежности инженерных решений создавать современные виды защитной одежды от опасных температурных воздействий на человека в производственных и климатических условиях.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение №14.В37.21.1247)*

### Список литературы

1. Бринк И.Ю., Лебедева Е.О. Исследование воздействия ветра на пакеты теплозащитной одежды // Швейная промышленность, № 3. 2005. – С.34-36.
2. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. – Киев: Госмедиздат, 1956. – 148 с.
3. Делль Р.А., Афанасьева Р.Ф., Чубарова З.С. Гигиена одежды: Учебное пособие для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 160с.
4. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Костюк В.В. Методы расчета сопряженных задач теплообмена. – М.: Машиностроение, 1985. - 232с.
5. Человек. Медико-биологические данные. – М.: Медицина, 1977. – 496с.
6. Черунова И.В. Построение математической модели теплообмена системы «Человек-Одежда-Среда» для проектирования одежды как СИЗ человека от критических температур // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, № 2. 2007. – С. 43-46.
7. Cherunova I., Kornev N., Brink I. Mathematical model of the ice protection of a human body at high temperatures of surrounding medium. // Forschung im Ingenieurwesen - Springer. – 2012. Vol. 76, Issue 3-4, P 97-103.
8. Stolwijk J.R. A mathematical model of Physiological temperature regulation in man // Washington: Nat. Aeronaut and Space Admin, 1971. - 77p.

### Рецензенты:

Алиева Наталья Зиновьевна, доктор философских наук, доцент, заведующая кафедрой "Физика", ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», г. Шахты.

Безуглов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Информационные технологии в сервисе", Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», г. Ростов-на-Дону.