

УДК 612.59:004(076.5)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ СЛОЕВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК–ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, И.В. Хромова

Новосибирский государственный технический университет

В статье рассматриваются проблемы моделирования тепловых процессов в элементах системы «человек – окружающая среда». Представлена методика моделирования процессов теплообмена в системе термостабилизации человека (СТС). Описаны механизмы работы СТС, направленные на поддержание теплового комфорта. Отличительной особенностью предлагаемой методики является учет конвективного переноса тепла между «ядром» и «оболочкой». Представлены результаты модельных исследований влияния параметров окружающей среды, мощности внутренних источников тепла, теплофизических свойств и толщины слоев тепловой изоляции на эффективность их термических сопротивлений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем реабилитации и индивидуальной защиты от теплового перегрева и переохлаждения.

Ключевые слова: процессы тепломассообмена, термические сопротивления, теплоизоляция, низкие температуры.

DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-137-142

Введение

В настоящий момент одной из актуальных задач является разработка физико-математических моделей биологических систем. Подобные модели позволяют проводить комплексные исследования в области разработки систем жизнеобеспечения, определять границы проводимых экспериментов и создавать модельные тренажеры для отработки экстремальных ситуаций, связанных с переохлаждением и перегревом человека.

В проведенных ранее исследованиях [1–5] установлены основные закономерности теплообмена в расчетных элементах и слоях системы термостабилизации человека, с учетом конвективного переноса тепла теплоносителем в широком диапазоне температур для холодной и горячей сред. Целью настоящей работы является исследование эффективности термических сопротивлений в системе «человек – окружающая среда» слоев теплоизоляции.

1. Особенности слоев теплоизоляции

«Оболочка» системы термостабилизации человека выступает эффективным слоем теплоизоляции и состоит из двух слоев: сети подкожных капилляров системы термостабилизации и жировой прослойки. Сеть подкожных капилляров является активным слоем теплоизоляции и участвует в процессе оттока теплоносителя (крови) из «оболочки» в «ядро» в начальной стадии охлаждения с целью уменьшения теплоотдачи в окружающую среду. Жировая прослойка служит пассивным слоем теплоизоляции. Она расположена между активным слоем «оболочки» и средним слоем «ядра» и является термическим сопротивлением, препятствующим оттоку тепла из «ядра» и сохраняющим тем самым его температуру.

Интенсивное поступление теплоносителя в слой подкожных капилляров вызывает повышение его температуры и, следовательно, повышение теплоотдачи.

В слое пассивной теплоизоляции практически нет трубопроводов гидравлической системы (кровеносных сосудов) и очень мало теплоносителя, поэтому его теплоизолирующие свойства очень высоки. В слое активной теплоизоляции может находиться до 50 % всего теплоносителя (2,5 литра крови). При низких температурах трубопроводы гидросистемы сужаются, теплоноситель из них выдавливается в «ядро», температура поверхности «оболочки» уменьшается, и теплопроводность поверхностных слоев снижается [3, 4].

2. Анализ термических сопротивлений слоев теплоизоляции

Слой пассивной теплоизоляции обладает постоянными теплофизическими свойствами, так как в нем отсутствуют внутренние тепловыделения и конвективный перенос тепла с током теплоносителя [5].

Толщина слоя пассивной теплоизоляции определяется в зависимости от процентного содержания жира в «оболочке» и диаметра расчетных элементов. В частности, для мужчин и женщин существуют разные формулы расчета процента жира:

для мужчин

$$\varepsilon_{\text{ж}} = \frac{495}{(1,03 - 0,19 \lg(\text{талия} - \text{шея})) + 0,15 \lg(\text{рост})} - 450;$$

для женщин:

$$\varepsilon_{\text{ж}} = \frac{495}{(1,29 - 0,35 \lg(\text{талия} + \text{бедро} - \text{шея})) + 0,22 \lg(\text{рост})} - 450.$$

Расчет толщины жира по процентному содержанию производится по следующим формулам:

$$d_{\text{вн}} = \frac{d_{\text{нар}}}{\sqrt{1 + \frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{ж}}}{100}}};$$

$$\delta_{\text{ж}} = \frac{d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}}{2},$$

где $d_{\text{нар}}$, $d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры слоя жира, $\delta_{\text{ж}}$ – толщина слоя жира, $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{м}}$ – плотность жира и тканей мышц, $\varepsilon_{\text{ж}}$ – процентное содержание жира.

Расчеты проводятся для мужчины 30 лет в диапазоне процентного содержания жира от 0 до 40 % с шагом 10. Параметры внешней среды одинаковы для всех случаев: охлаждение в воде при температуре 0 °С при отсутствии защитного снаряжения (рис. 1, 2).

Анализ суммарного теплового потока расчетного элемента показал, что с ростом толщины слоя теплоизоляции существенно уменьшается теплоотдача в окружающую среду. Значительное сокращение теплопотерь наблюдается при 10 ... 20 % жира (оптимальная физиологическая норма), а при дальнейшем увеличении процента уменьшение потерь составляет 2 ... 4 %. С ростом толщины пассивной теплоизоляции увеличивается разница температур между активной и пассивной теплоизоляцией от 0 до 10 ... 15 °С. При 40 % жира температура среднего слоя «ядра» постоянна на протяжении начальной стадии охлаждения. Таким образом, с увеличением толщины слоя пассивной теплоизоляции растет его термиче-

ское сопротивление, что приводит к увеличению температуры непосредственно под слоем и сохранению температуры «ядра» на оптимальном физиологическом уровне.

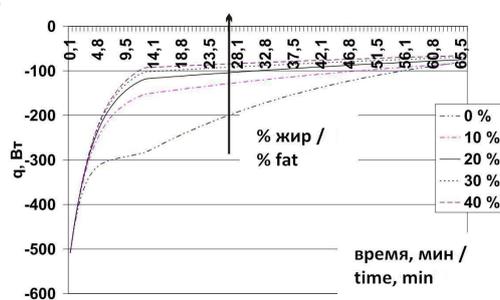


Рис. 1 – Влияние толщины слоя пассивной теплоизоляции (% жира) на суммарные тепловые потери расчетного элемента

Fig. 1 – Effect of layer thickness passive insulation (% of fat) on the total heat loss of the element

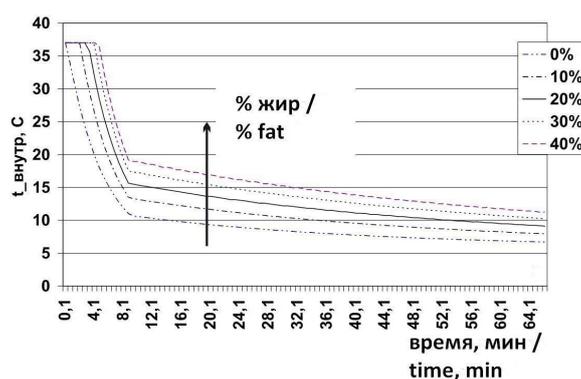


Рис. 2 – Изменение температуры под слоем пассивной теплоизоляции в зависимости от толщины слоя

Fig. 2 – The change in temperature under a layer of passive insulation depending on the layer thickness

Слой активной теплоизоляции обладает переменным термическим сопротивлением, так как в нем присутствуют внутренние тепловыделения и конвективный перенос тепла с током теплоносителя [3–5]. Для анализа термического сопротивления слоя активной теплоизоляции решается обратная задача: вычисляется эффективный коэффициент теплопроводности, который определяется по формуле

$$\lambda_{\text{эффект}} = \frac{q_{\Sigma} \delta_{\text{кап_СТР}}}{t_{\text{кап_СТР}} - t_{\text{ж}}}$$

Результаты расчетов $\lambda_{\text{эффект}}$ представлены на рис. 3, 4.

Исследование охлаждения в воде и воздухе показало, что эффективный коэффициент теплопроводности каждого расчетного элемента разный. Самые высокие значения у грудной клетки и нижней части туловища, а низкие – у рук и ног. Таким образом, чем больше поверхность теплообмена и соответственно теплоноси-

теля (крови) в слое, тем больше эффективный коэффициент теплопроводности и меньше термическое сопротивление слоя активной теплоизоляции. В воздухе эквивалентный коэффициент теплопроводности практически не меняется. В воде он нелинейно уменьшается в 2 раза на начальной стадии охлаждения за счет резкого изменения объема теплоносителя в слое и далее практически не меняется. При увеличении внутренних тепловыделений от 0 до 800 Вт резко увеличивается объем циркулирующей крови в «оболочке», вследствие чего эквивалентный коэффициент теплопроводности слоя дополнительно увеличивается на 30...80 %.

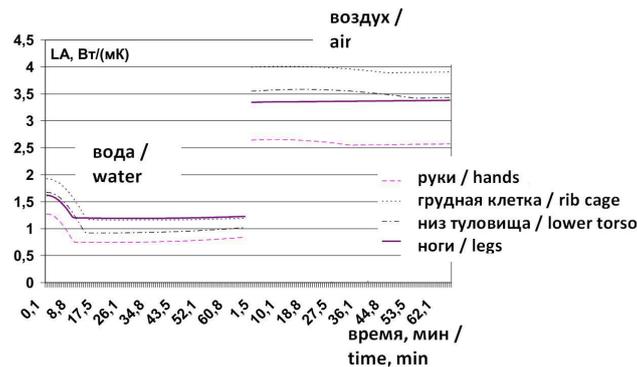


Рис. 3 – Эффективный коэффициент теплопроводности (LA) расчетных элементов в воде и в воздухе

Fig. 3 – The effective coefficient of thermal conductivity (LA) of the element in water and in air

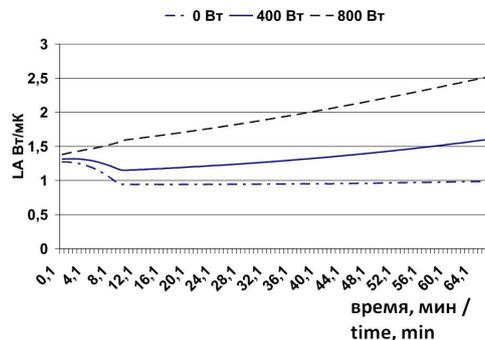


Рис. 4 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности (LA) активного слоя теплоизоляции расчетного элемента от мощности внутренних источников тепла

Fig. 4 – The dependence of the effective coefficient of thermal conductivity (LA) of the active heat insulation layer of the element from the power of internal heat sources

Заключение

Отличительными особенностями предлагаемой методики расчета процессов теплообмена в системе «человек – окружающая среда» является учет конвективного переноса тепла теплоносителем между «ядром» и «оболочкой». По результатам разработки проведены модельные исследования термических сопротивлений

слоев активной и пассивной теплоизоляции. Установлено, что с увеличением толщины слоя пассивной теплоизоляции растет термическое сопротивление слоя, что приводит к снижению суммарных теплопотерь на 10 ... 15 % и уменьшению градиента изменения среднemasсовой температуры «ядра», т.е. «ядро» остывает медленнее. Показано, что теплофизические параметры слоя активной теплоизоляции существенным образом зависят от объема теплоносителя в слое, типа расчетного элемента, режимов охлаждения, свойств окружающей среды и мощности внутренних источников тепла. Результаты работы могут быть полезны при проектировании средств тепловой защиты человека в условиях низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко Ю.В., Чичиндаев А.В. Численное моделирование системы терморегуляции человека: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 40 с.
2. Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов: учебное пособие для вузов / под ред. Ю.В. Дьяченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 512 с. – (Учебники НГТУ).
3. Чичиндаев А.В., Хромова И.В. Моделирование тепловых процессов системы «человек–окружающая среда» в условиях низких температур // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 197–201.
4. Хромова И.В. Исследование тепловых процессов в системе «человек–окружающая среда» в условиях низких температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.
5. Чичиндаев А.В., Фомичева И.В., Толстошеева В.В. Численное моделирование кровеносной системы человека // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 11. – С. 35–46.

RESEARCH ON HEAT INSULATION THERMAL RESISTANCE IN THE HUMAN ORGANISM-ENVIRONMENT SYSTEM

Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper deals with the problems of thermal processes modeling which occur in the elements of the human organism-environment system. The simulation method of heat transfer processes in the human thermoregulatory system (HTS) is presented. Mechanisms of HTS aimed to support thermal comfort are described, the influence of environmental parameters, power of internal heat sources, thermal properties and thickness of thermal insulation layers on the efficiency of their thermal resistance investigated. A distinctive feature of the proposed method of heat transfer process calculation in the human organism – environment system is the assessment of the convective heat transfer between the core and shell. Based on the results of the development modeling studies of thermal resistance layers of active and passive insulation are carried out. The results may be useful in the development of a system's rehabilitation and individual protection from thermal overheating and overcooling.

Keywords: processes of heat and mass transfer, thermal resistance, heat insulation, low temperature.

REFERENCES

1. D'yachenko Yu.V., Chichindaev A.V. *Chislennoe modelirovanie sistemy termoregulyatsii cheloveka* [Numerical modeling of human thermoregulation system]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 40 p.
2. D'yachenko Yu.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya letatel'nykh apparatov* [Life-support systems of aircraft]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2003. 512 p.
3. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Modelirovanie teplovykh protsessov sistemy «chelovek-okruzhayushchaya sreda» v usloviyakh nizkikh temperatur* [Modelling of the thermal processes of system «human organism-environment» in cold temperature condition]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 4 (37), pp. 197–201.

4. Khromova I.V. *Issledovanie teplovykh protsessov v sisteme «chelovek-okruzhayushchaya sreda» v usloviyakh nizkikh temperatur*. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of thermal processes in system "human-environment" in cold temperature condition. Author's abstract of PhD eng. Sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 20 p.
5. Chichindaev A.V., Fomicheva I.V., Tolstosheeva V.V. Chislennoe modelirovanie krovenosnoi sistemy cheloveka [Numerical modeling circulatory system of the person]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument-Making*, 2006, no. 11, pp. 35–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чичиндаев Александр Васильевич – родился в 1960 году, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630133, Россия, г. Новосибирск, ул. Высоцкого, д. 11. Email: ttf_nstu@rambler.ru).

Chichindaev Aleksandr Vassil'evich (b. 1960) – D.Sc. (Eng.), professor, head of the engineering thermophysics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heating engineering. He is author of 40 scientific papers. Address: 11 Vysotsky Street, Novosibirsk, 630133, Russia. Email: ttf_nstu@rambler.ru).



Дьяченко Юрий Васильевич – родился в 1944 году, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630032, Россия, г. Новосибирск, м-рн Горский, д. 72. Email: ttf_nstu@rambler.ru).

D'yachenko Yury Vassil'evich (b. 1944) – D.Sc. (Eng.), professor, professor of the engineering thermophysics department, Novosibirsk State Technical Univer. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical the heating engineeing. He is author of 40 scientific papers. (Address: 72, Gorskii mikroraion Street, Novosibirsk, 630032, Russia. Email: ttf_nstu@rambler.ru).



Хромова Ирина Владимировна – родилась в 1983 году, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 18 научных работ. (Адрес: 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, д. 138. Email: ttf_nstu@rambler.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – C. Sc. (Eng.), assistant professor, associate professor, department of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heating engineer. She is author of 18 scientific papers. (Address: 138 Nemirovicha-Danchenko Street, Novosibirsk, 630087, Russia. Email: ttf_nstu@rambler.ru).

*Статья поступила 11 декабря 2014 г.
Received December 11, 2014*

To Reference:

Chichindaev A.V., D'yachenko Yu.V., Khromova I.V. Issledovanie termicheskikh soprotivlenii sloev teploizolyatsii v sisteme «chelovek–okruzhayushchaya sreda» [Research on heat insulation thermal resistance in the human organism-environment system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4 (25), pp. 137–142.