

УДК 612.59:004(076.5)

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА
МЕЖДУ РАСЧЕТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»**

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

Новосибирский государственный технический университет

В настоящей статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета тепловых процессов в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда» в условиях низких температур с учетом внутренних источников и переноса тепла между расчетными элементами и слоями, имеющие существенное значение для теории конвективного теплообмена. Представлена методика расчета процессов комбинированного теплообмена, которая позволяет получить локальные теплофизические параметры системы «человек – тепловая защита – окружающая среда» с учетом пассивной и активной тепловой защиты, а также теплофизических и геометрических свойств расчетных элементов в широком диапазоне параметров окружающей среды. Описана схема совместной работы кровеносной системы и системы термостабилизации человека, которая позволяет рассчитывать массовый расход теплоносителя (крови) на расчетные элементы. Исследовано влияние переноса тепла с током теплоносителя между расчетными элементами и слоями на тепловые процессы в системе «человек – окружающая среда». Результаты исследования могут быть полезны специалистам при проектировании термобелья для инвалидов, специализированных костюмов пожарных, высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, а также при совершенствовании элементов систем термостабилизации скафандров.

Ключевые слова: процессы теплообмена, теплоноситель, термическое сопротивление, тепловые потери, низкие температуры.

DOI: 10.17121/1727-2769-2018-1-106-113

Введение

В настоящий момент одной из актуальных задач является разработка физико-математических моделей живых систем. Данная задача имеет большое прикладное значение в области разработки и оптимизации элементов систем жизнеобеспечения, направленных на обеспечение теплового комфорта для человека в рамках системы «человек – тепловая защита – окружающая среда» [1]. При этом наиболее сложным моментом является описание процессов переноса тепла теплоносителем (гемодинамический механизм системы терморегуляции). Часто в моделях системы терморегуляции это либо не учитывается, либо отражается при помощи эмпирических коэффициентов. Для решения этой проблемы в данной работе представлена разработанная принципиальная теплогидравлическая схема совместной работы кровеносной системы и системы термостабилизации человека [2].

1. Модель системы термостабилизации человека

Для моделирования работы системы термостабилизации человека используется условное разделение объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» – внутренние органы и мышцы. Это многослойная многоэлементная модель,

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00257.

в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом (рис. 1) с соответствующим количеством и видом слоев [5].

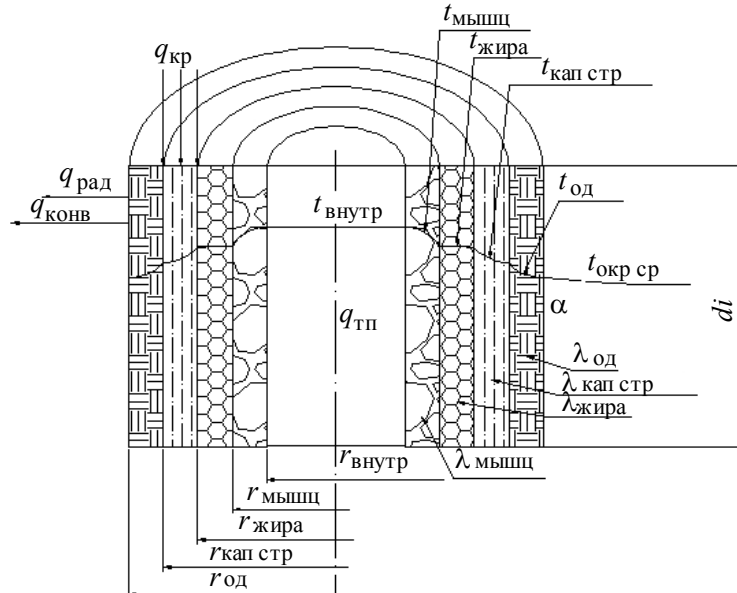


Рис. 1 – Схема расчетного элемента

Fig. 1 – An element for modeling

Кровеносная система (КС) работает совместно с системой термостабилизации (СТС) и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела. Перенос тепла теплоносителем по длине слоя напрямую зависит от свойств и количества поступившего в слой теплоносителя при заданных условиях [2, 4]:

$$q_{кр\,ji} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} G_{кр\,ij} C_{P_{кр}} (t_{входа\,ij} - t_{выхода\,ij}), \quad (1)$$

где $G_{кр\,ij}$ – объемный расход теплоносителя через расчетный элемент и слой;
 $C_{P_{кр}}$ – теплоемкость теплоносителя; $t_{входа\,ij}$, $t_{выхода\,ij}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из расчетного элемента и слоя.

2. Расчет гидравлических характеристик в контуре теплоносителя

В расчетных элементах в зависимости от параметров внешней среды производится нагрев либо охлаждение теплоносителя. Вторая группа тепловых процессов происходит в результате смешения теплоносителей разной температуры на выходе из расчетных элементов. Таким образом, важной особенностью СТС является наличие нескольких типов расчетных элементов, связанных между собой сложной последовательно-параллельной гидравлической системой, обладающей переменными теплогидравлическими свойствами (рис. 2).

Определяемые параметры. Расчет гидравлических характеристик позволяет учитывать начальную стадию охлаждения, характерной особенностью которой является распространение температурных возмущений в пространстве и захват новых слоев тела. С другой стороны, расчет расходов теплоносителя для каждого

расчетного элемента и слоя позволяет учитывать количество тепла, которое передается от «ядра» к «оболочке» и, наоборот, в зависимости от температуры окружающей среды и мощности внутренних тепловыделений.

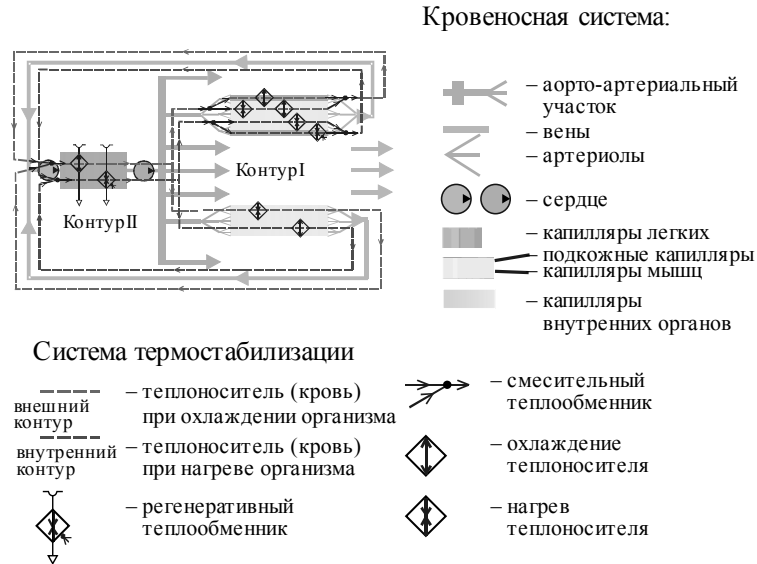


Рис. 2 – Схема совместной работы КС и СТС

Fig. 2 – Scheme of the joint work of the blood system and the system of thermoregulation

Количество тепла, которое переносит теплоноситель, напрямую зависит от его расхода на соответствующий расчетный элемент. Так как размеры капилляра очень малы, а их количество в каждом расчетном элементе очень большое, то зависимость температурного поля от распределения скоростей можно пренебречь. Таким образом, расходно-напорные характеристики определяются системой уравнений (2) для каждого элемента [2]:

$$P_a = \xi(\text{var})_i \frac{\rho V_i^2}{2} + \zeta(\text{var})_i \frac{\rho W_i^2}{2} + k(\text{var})_{ij} G_{ij} + P_{vi} + \rho g h_i + \Delta P_{\text{уск}i} + \Delta P_{\text{комп}i}; \quad (2)$$

$$k_{ij} G_{ij} + \xi_i \rho \frac{V_i^2}{2} + \zeta_i \frac{\rho W_i^2}{2} + \Delta P_i = 0.$$

Для расчета коэффициентов сопротивления участков сосудистого русла $k(\text{var})$, $\zeta(\text{var})$ и $\xi(\text{var})$ разработаны методики расчета отдельно для каждого участка (подробно описаны в [2]). В них учитываются геометрические размеры и гидравлические характеристики контура: объемный расход теплоносителя, давление на входе в систему, вид, диаметры, длины и количество трубопроводов (сосудов) гидравлической сети и скорость течения теплоносителя. Схема расчетных участков контура учитывает пространственное положение трубопроводов, схему делений и ответвлений, а также протяженность участков. В результате рассчитываются перепады давления ΔP_i и объемный расход G_{ij} для семи расчетных элементов в зависимости от внешних условий.

Отдельно рассчитывается расход теплоносителя, поступающего в «оболочку», что позволяет в тепловом расчете учитывать количество тепла, переносимое теплоносителем из «оболочки» в «ядро» и переменное термическое сопротивление слоя подкожных капилляров СТС [3].

3. Влияние переноса тепла между расчетными элементами на тепловые процессы в системе «человек – окружающая среда»

Предложенный подход позволяет рассчитать расход теплоносителя на расчетные элементы (рис. 3). Максимальное количество теплоносителя для 40-летнего мужчины приходится на туловище и внутренние органы, минутный объем крови (МОК) составляет 54 %, наименьший расход – на сердце и голову (5 и 8 %), на мышечную группу приходится 14 и 19 % на руки и ноги соответственно. Наибольшие теплототери при температуре 20 °С наблюдаются в мышечной группе (рис. 4).

Рис. 3 – Расход теплоносителя на расчетные элементы

Fig. 3 – Heat carrier consumption on the calculated elements

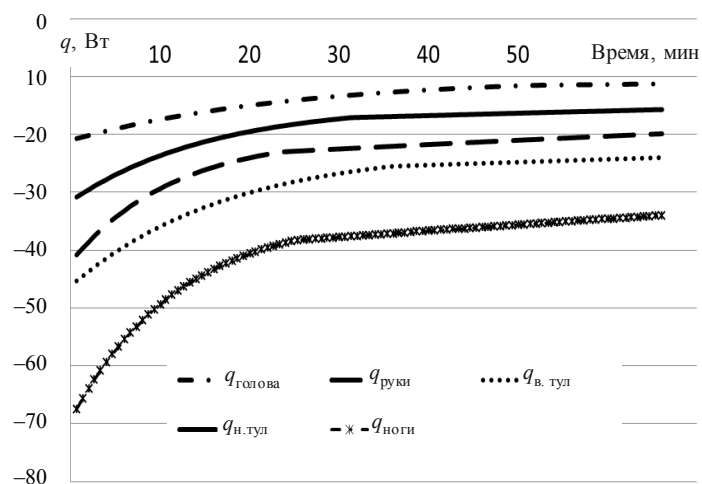
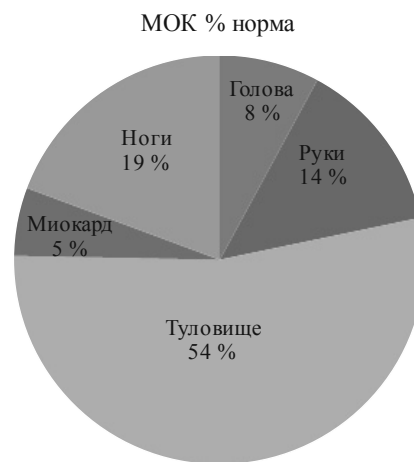


Рис. 4 – Теплототери расчетных элементов

Fig. 4 – Heat losses of the calculated elements

Кроме того, МОК значительно перераспределяется между «ядром» и «оболочкой» в случае, когда в режиме охлаждения включается механизм «выдавливания» теплоносителя из «оболочки» с целью увеличить термическое сопротивление активной теплоизоляции (слоя подкожных капилляров СТС). Расход на оболочку составляет около 40 % от общего расхода на потребитель при высоких температурах или физической нагрузке (рис. 5). При переходе от начальной стадии к регулярному режиму охлаждения при низких температурах на «оболочку» приходится около 10 % от суммарного МОК на расчетный элемент. Это позволяет уменьшить теплотери «ядра» и сохранить его температуру постоянной как можно дольше.

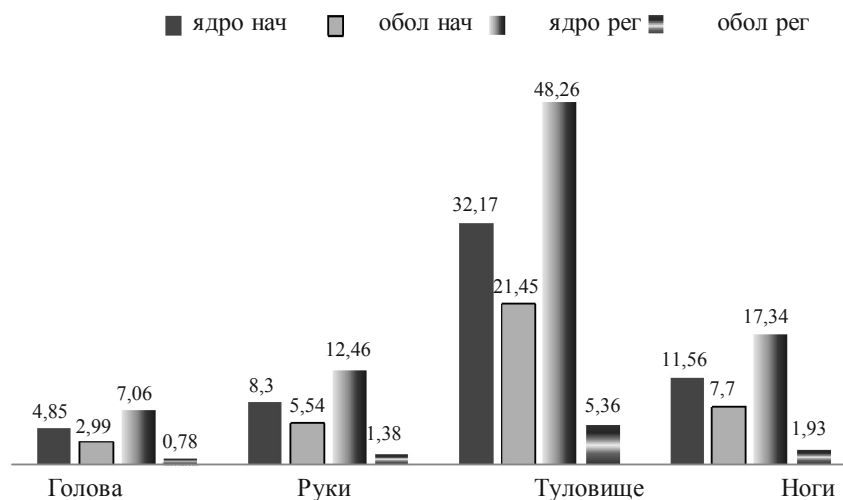


Рис. 5 – Перераспределение теплоносителя между «ядром» и «оболочкой»

Fig. 5 – The heat carrier redistribution between the “core” and the “envelope”

При анализе составляющих теплотерь рук установлено, что наибольший вклад в суммарные потери тепла вносит конвективная составляющая (рис. 6). При этом начальную стадию охлаждения хорошо иллюстрирует компонента, характеризующая процесс теплопроводности активного слоя теплоизоляции $q_{\text{тп. кап}}$: происходит постепенный процесс оттока теплоносителя из подкожного слоя на протяжении 25 мин. После достижения оптимального значения термического сопротивления слоя градиент теплотерь за счет других составляющих резко уменьшается, суммарные потери снижаются и включается режим регулярного охлаждения. Скорость оттока и количество теплоносителя зависят от температуры окружающей среды, индивидуальных параметров и морфологических особенностей СТС и КС.

Заключение

Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить влияние перераспределения теплоносителя между расчетными элементами на функционирование системы «человек – тепловая защита – окружающая среда», получить локальные теплофизические параметры в широком диапазоне свойств окружающей среды. Дает возможность определять границы проводимых экспериментов и создавать модельные тренажеры для отработки экстремальных ситуаций, связанных с переохлаждением и перегревом, а также оптимизировать элементы индивидуальных средств защиты от воздействия неблагоприятных

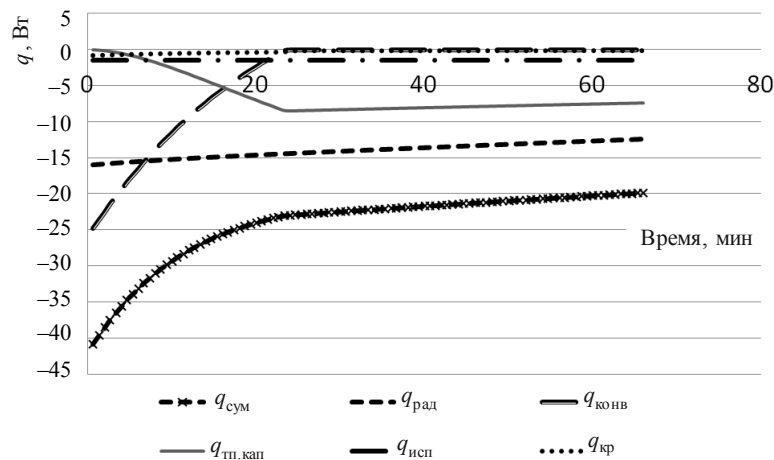


Рис. 6 – Составляющие тепловых потерь рук

Fig. 6 – The thermal loss components of the hands

температурных условий путем внедрения дополнительных элементов в конструкцию одежды [6]. Результаты исследования могут быть полезны специалистам при проектировании термобелья для инвалидов, специализированных костюмов пожарных, высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, а также при совершенствовании элементов систем термостабилизации скафандров.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. Хромова И.В. Исследование тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.
3. Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В. Исследование термических сопротивлений слоев теплоизоляции в системе «человек – окружающая среда» // Доклады АН ВШ РФ. – 2014. – № 4 (25). – С. 137–142.
4. Исследование влияния свойств окружающей среды и индивидуальных средств защиты от холода на тепловое состояние человека / И.В. Хромова, А.В. Чичиндаев, Н.Н. Евтушенко, А.Н. Денисова // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 9. – С. 20–26.
5. Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В. Влияние внутренних источников тепла на процессы теплообмена в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда» // Доклады АН ВШ РФ. – 2016. – № 1 (30). – С. 108–115.
6. Khromova I.V. Heat Exchange in "Human body – Thermal protection – Environment" System [Electronic resource] // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/891/1/012084/pdf> (accessed: 29.03.2018).

INFLUENCE OF HEAT TRANSFER BETWEEN CALCULATED ELEMENTS ON THERMAL PROCESSES IN THE HUMAN BODY – ENVIRONMENT SYSTEM

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

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This paper is devoted to the issues of simulation and calculation of thermal processes in the system called "Human body – Thermal protection - Environment" under low temperature conditions. It considers internal heat sources and the convective heat transfer between the calculated elements. In general it is important for the Heat Transfer Theory. The method introduces a complex heat transfer calculation method and a local thermo-physical parameter calculation method in the system called «Human body – Thermal protection - Environment», considering passive and active thermal protection, thermo-physical and geometric properties of the calculated elements in a wide range of environmental parameters. The scheme of joint work of the human blood system and the system of thermal stabilization is described in the paper. It makes it possible to calculate the mass flow of the heat carrier (blood) for the calculated elements. The effect of heat transfer with a heat carrier current between the calculated elements and layers on thermal processes in the "Human body –Environment" system is investigated. The research results can be useful to specialists in the design of thermal underwear for disabled people, specialized fireman clothing, altitude-compensating suits for pilots, permanent- wear pressure suits for astronauts, and also to improve elements of the space suit thermoregulation systems.

Keywords: Processes of heat and mass transfer, heat carrier, thermal resistance, thermal losses, low temperatures.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-1-106-113

REFERENCES

1. Dyachenko Yu.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya letatel'nykh apparatov* [Life-support systems of aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003. 512 p.
2. Khromova I.V. *Issledovanie teplovykh protsessov v sisteme "chelovek – okruzhayushchaya sreda" v usloviyakh nizkikh temperatur*. Avtoref. diss. 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.
3. Chichindaev A.V., Dyachenko 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.
4. Khromova I.V., Chichindaev A.V., Evtushenko N.N., Denisova A.N. *Issledovanie vliyaniya svoistv okruzhayushchei sredy i individual'nykh sredstv zashchity ot kholoda na teplovoe sostoyanie cheloveka* [Research of influence properties of environment and individual means of protection from the cold on the human thermal state]. *Ekologicheskie sistemy i pribory – Ecological Systems and Devices*, 2015, no. 9, pp. 20–26.
5. Chichindaev A.V., Dyachenko Yu.V., Khromova I.V. *Vliyanie vnutrennikh istochnikov tepla na protsessy teploobmena v sisteme "chelovek – zashchita – okruzhayushchaya sreda"* [Effect of internal heat sources on the processes of heat transfer in the system "human – thermal protection – environment"]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 108–115.
6. Khromova I.V. Heat Exchange in "Human body – Thermal protection – Environment" System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/891/1/012084/pdf> (accessed 29.03.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чичиндаев Александр Васильевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Chichindaev Aleksandr Vasil'evich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of engineering thermal physics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).



Хромова Ирина Владимировна – родилась в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor, department of engineering thermal physics, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. She is the author of 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).



Дьяченко Юрий Васильевич – родился в 1944 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Dyachenko Yuri Vasil'evich (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor at the department of engineering thermal physics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical heat engineering. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

*Статья поступила 11 декабря 2017 г.
Received December 11, 2017*

To Reference:

Chichindaev A.V., Khromova I.V., Dyachenko Yu.V. Vliyanie perenosa tepla mezhdru raschetnymi elementami na teplovy protsessy v sisteme "chelovek – okruzhayushchaya sreda" [Influence of heat transfer between calculated elements on thermal processes in the human body – environment system]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2018, no. 1 (38), pp. 106–113. doi: 10.17212/1727-2769-2018-1-106-113.