

УДК 612.59:004(076.5)

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА – 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 – тепловая защита – окружающая среда». Представлена методика моделирования процессов теплообмена в системе термостабилизации человека (СТС). Описываются механизмы работы СТС, направленные на поддержание теплового комфорта организма, а также механизмы регуляции мощности внутренних тепловыделений. Так как отличительными особенностями предлагаемой методики является учет конвективного переноса тепла между «ядром» и «оболочкой», в статье рассматривается влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между ними. Проводится анализ суммарных тепловых потерь в зависимости от мощности внутренних источников тепла, описывается вклад отдельных составляющих теплового потока для различных значений мощности. Представлены результаты модельных исследований влияния постоянной по времени и переменной мощности внутренних источников тепла на тепловые потери, а также среднemasовые температуры элементов и температуры на границах расчетных слоев. Отдельное исследование посвящено анализу влияния физической нагрузки при различных температурах окружающей среды с учетом внешней теплоизоляции (защитной одежды). Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем реабилитации и индивидуальной защиты от теплового перегрева и переохлаждения.

Ключевые слова: процессы теплообмена, внутренние источники тепла, термические сопротивления, теплоизоляция, низкие температуры.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115

Введение

Одной из актуальных задач при разработке систем жизнеобеспечения является исследование воздействия охлаждения на организм человека. Важным параметром, влияющим на процесс теплообмена в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда» является учет внутренних тепловыделений организма.

Механизм увеличения теплообразования при понижении температуры окружающей среды заключается в увеличении скорости обменных процессов в различных тканях. Часть тепла образуется во внутренних органах с интенсивным обменом веществ, однако основную часть источников тепловыделений (65...90 %) составляют мышцы. При мышечной работе накопленная в мышцах химическая энергия только на одну треть переходит в механическую работу, остальные две трети переходят в теплоту. В зависимости от интенсивности выполняемых работ мощность внутренних источников тепла составляет от 100 до 1000 Вт.

1. Модель системы терморегуляции человека

Для моделирования работы системы термостабилизации человека используется условное разделение объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» –

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

внутренние органы и мышцы [1]. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом (рис. 1) с соответствующим количеством и видом слоев [6].

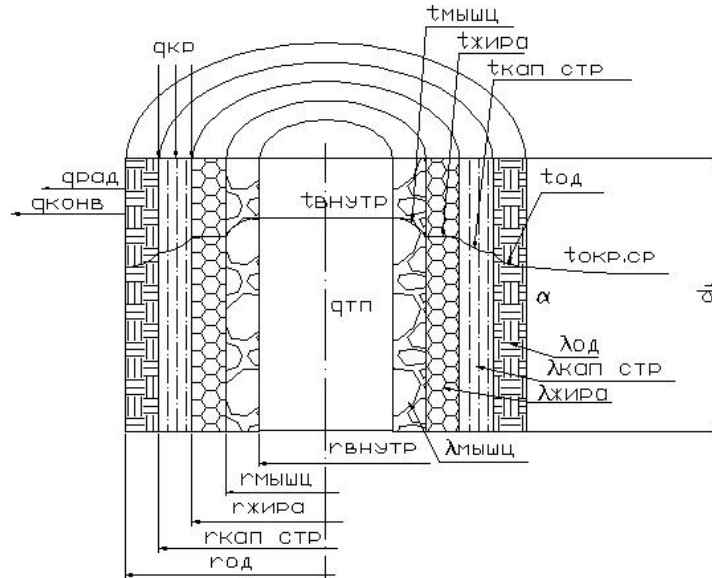


Рис. 1 – Расчетный элемент

Fig. 1 – Element for modeling

Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции (СТР) и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела. Для расчета процесса охлаждения используется система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности для каждого расчетного элемента (многослойной цилиндрической стенки) с учетом тепловых процессов, которые происходят в каждом из его слоев. В общем виде уравнение теплопроводности для расчетного слоя с наличием внутренних источников тепла имеет вид

$$c_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \lambda_j \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} \right) + \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} + q_v.$$

Внутренние источники тепла делятся на два вида. Первый $q_{\text{внутр}}$ – теплопродукция мышц $q_{\text{тп}}$ и внутренних органов $q_{\text{мет}}$, второй – перенос тепла теплоносителем по длине слоя $q_{\text{кр}}$, который напрямую зависит от свойств и количества поступившего в слой теплоносителя при заданных условиях [6]. При этом делается допущение о том, что ввиду малых размеров капилляров теплообмен между теплоносителем и тканями протекает с КПД = 1 до полного теплового равновесия:

$$q_v = q_{\text{внутр}} + q_{\text{кр}}.$$

Изменение теплового потока по длине слоя за счет процесса теплопроводности принимается равным нулю. Расчетный элемент разбивается на ряд элементарных геометрических объемов, в пределах которых закон изменения температуры может быть принят линейным. Для выбранного участка принимается следующее

допущение: в каждый текущий момент времени процесс теплообмена с окружающей средой является стационарным. Процесс распространения теплоты определяется значениями эффективного коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности. Плотность и удельная теплоемкость в пределах элемента изменяются незначительно и считаются постоянными. Коэффициент теплопроводности «ядра» принимается постоянным, а «оболочки» – линейной функцией температуры.

Граничные условия описывают температуры и тепловые потоки на стыке слоев и заданные параметры окружающей среды. В качестве начальных условий принимается нормальная температура ядра ($36,7^{\circ}\text{C}$).

В результате рассчитываются тепловые потоки, температуры на границах слоев и среднemasовые температуры. Проверка достоверности проведена путем сравнения полученных результатов с известными экспериментальными и расчетными данными, установлено качественное и количественное соответствие, расхождение не более 10 % [1–6].

2. Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между элементами

При выполнении физической нагрузки значительно увеличивается приток теплоносителя к «оболочке» (в 4...8 раз) за счет прилива крови к мышцам и расширения сети подкожных капилляров с целью сбросить лишнее тепло в окружающую среду. Для оценки перераспределения теплоносителя между элементами и слоями моделируется физическая нагрузка 500 Вт и 1000 Вт (рис. 2). С увеличением мощности внутренних тепловыделений суммарные тепловые потери растут, однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих (рис. 3). Теплоотдача в окружающую среду растет за счет увеличения доли конвективной составляющей на 60 %, а также доли тепла, переносимого разогретым теплоносителем из «ядра» в «оболочку» на 80 % на начальной стадии охлаждения.

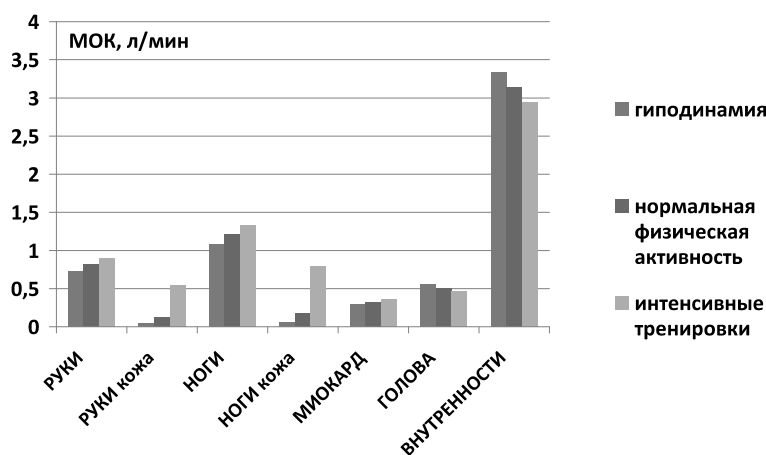


Рис. 2 – Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между расчетными элементами и слоями

Fig. 2 – Influence of external work at the redistribution of the heat transfer fluid between the elements and layers

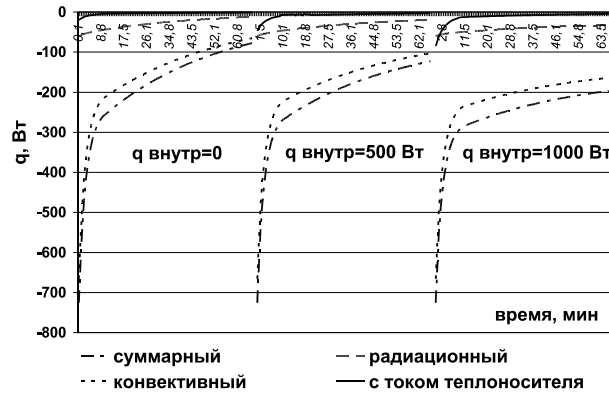


Рис. 3 – Влияние мощности внутренних источников тепла на тепловые потери руки

Fig. 3 – The effect of the internal heat sources on the heat losses hands

3. Влияние мощности внутренних источников тепла на процесс теплообмена

Для иллюстрации переменной мощности внутренних источников тепла рассматривается случай, когда физическая нагрузка максимальна на начальной стадии и ступенчато убывает к концу рассматриваемого периода времени. Расчеты представлены для трех вариантов (рис. 4): без внутренних тепловыделений, переменная мощность внутренних источников тепла (1000, 500 и 250 Вт) и постоянная мощность (1000 Вт). С ростом мощности внутренних источников тепла увеличивается разница между температурами на границах слоев. При отсутствии тепловыделений разница между температурами с внешней и внутренней стороны «оболочки» небольшая, но с ростом тепловыделений перепад температур увеличивается больше чем в 2 раза за счет притока подогретого теплоносителя. Показано, что при постоянной мощности характер изменения температуры среднего слоя «ядра» плавный, а при переменной мощности – ступенчатый.

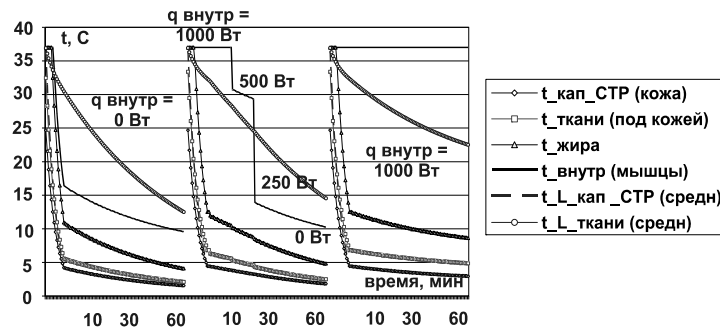


Рис. 4 – Температуры на границах слоев расчетных элементов в зависимости от характера мощности внутренних источников тепла

Fig. 4 – Temperatures at the boundaries of elements layers depending on the characteristics of internal heat sources

Анализ среднемассовых температур показал, что температура среднего слоя «ядра» (мышечная группа) и «оболочки» растет с увеличением мощности, а тем-

пература внутреннего слоя «ядра» (внутренние органы) падает (рис. 5). При отсутствии внутренних тепловыделений температуры расчетных элементов резко уменьшаются. В случае ступенчатой нагрузки мощность падает с 1000 до 500 Вт и температуры начинают уменьшаться, но с меньшим градиентом. Если нагрузка остается постоянной (1000 Вт), то охлаждение расчетных элементов происходит в 2...3 раза медленнее, чем при переменной нагрузке.

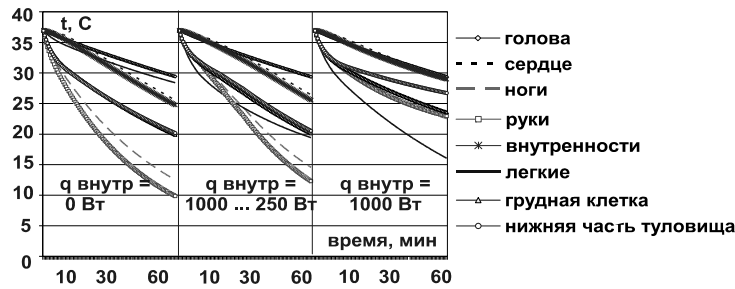


Рис. 5 – Зависимость среднемассовых температур элементов от характера изменения мощности внутренних источников тепла

Fig. 5 – Average mass temperatures of elements depending on the characteristics of internal heat sources

4. Исследование влияния величины теплового сопротивления защитной одежды на процесс охлаждения

Для оценки теплового сопротивления одежды используется специальная единица измерения – *clo* ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт}$).

На рис. 6 представлен график зависимости времени охлаждения «ядра» до критической температуры (24 °C) от теплопродукции организма при температуре окружающей среды 0 °C . Линиями показана одежда с тепловым сопротивлением 3 clo (обычная синтепоновая одежда) и 7 clo (одежда из верблюжьей шерсти). На рис. 7 в том же виде представлены результаты расчета при -30 °C . Установлено, что при -30 °C время остывания при росте мощности увеличивается незначительно (на 10...20 мин). При 0 °C время остывания значительно увеличивается (на 3...5 часов) при мощности от 100 Вт. Для -30 °C , в отличие от 0 °C , большой разницы между двумя материалами не наблюдается (разница во времени охлаждения до критической температуры составляет от 2 до 10 минут).

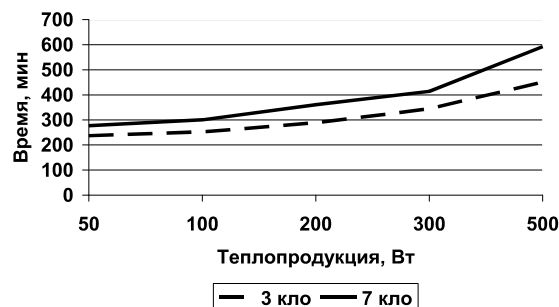


Рис. 6 – Зависимость времени охлаждения от величины теплопродукции при 0 °C

Fig. 6 – The cooling time depending on the of magnitude internal heat sources at 0 °C

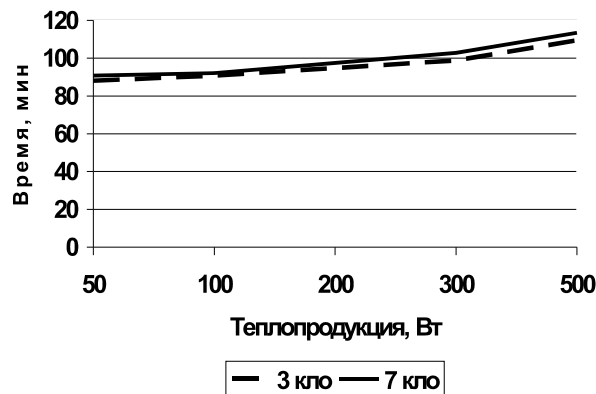


Рис. 7 – Зависимость времени охлаждения от величины теплопродукции при -30°C

Fig. 7 – The cooling time depending on the of magnitude internal heat sources at -30°C

Заключение

Увеличение мощности внутренних источников тепла приводит к изменению характера температурных полей расчетных элементов в исследуемой системе. Увеличение мощности до 1000 Вт приводит к увеличению в 2 раза разницы температур между «оболочкой» и средним слоем «ядра». При этом температура внутреннего слоя «ядра» с ростом внутренних тепловыделений падает за счет постоянного притока охлажденного теплоносителя из «оболочки». Увеличение мощности внутренних источников тепла ведет к увеличению теплоотдачи в окружающую среду, однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих. Доля тепла, переносимого теплоносителем на начальной стадии охлаждения, с ростом мощности увеличивается в 2,5 раза. Переменная во времени мощность внутренних источников иллюстрирует реальный процесс охлаждения организма человека. Увеличение мышечной активности способствует повышению теплообразования на 25 ... 30 %. При очень низких температурах окружающей среды рост мощности внутренних источников тепла незначительно влияет на время остывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В. Исследование термических сопротивлений слоев теплоизоляции в системе «человек – окружающая среда» // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 137–142.
2. Дьяченко Ю.В., Чичиндаев А.В. Численное моделирование системы терморегуляции человека: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 40 с.
3. 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).
4. Чичиндаев А.В., Хромова И.В. Моделирование тепловых процессов системы «человек – окружающая среда» в условиях низких температур // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4. – С. 197–201.
5. Хромова И.В. Исследование тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.

6. Чичиндаев А.В., Фомичева И.В., Толстошеева В.В. Численное моделирование кровеносной системы человека // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2006. – № 11. – С. 35–46.

**EFFECT OF INTERNAL HEAT SOURCES ON THE PROCESSES
OF HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM
«HUMAN - THERMAL PROTECTION – ENVIRONMENT»**

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 system "human - thermal protection - environment." The simulation method of heat transfer processes in the human thermoregulatory system (HTS) is presented. Mechanisms of HTS aimed to support thermal comfort of the human organism and mechanisms of regulation internal heat sources described. Presented an analysis of influence of external work at the redistribution of the heat transfer fluid between the "core" and "shell". The analysis of cumulative heat loss, depending on the power of the internal heat sources, described the contribution of individual components of the heat flux for different values of power. Submitted the results of the modeling studies about the effect of internal heat sources characteristics (constant and variable) on the heat loss, average mass temperatures of the elements and on the temperature at the boundaries of elements layers. A separate study is devoted to the analysis of the effectiveness of physical exercise at different ambient temperatures, taking into account the external insulation (protective clothing). The results may be useful in the development of the systems individual protection and rehabilitation from thermal overheating and overcooling.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115

REFERENCES

1. Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V. Issledovanie termicheskikh soprotivlenii sloev teploizoliatsii v sisteme "chelovek – okruzhayushchaya sreda" [Research of thermal resistance of the heat insulation in the system "human organism – environment"]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4 (25), pp. 137–142.
2. Dyachenko Y.V., Chichindaev A.V. *Chislennoe modelirovanie sistemy termoregulyatsii cheloveka* [Numerical modeling of human thermoregulation system]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 40 p.
3. Dyachenko Y.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya leta-tel'nykh apparatov* [Life-support systems of aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003. 512 p.
4. 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 Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4, pp. 197–201.
5. 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.
6. 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, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Chichindaev Aleksandr Vasil'evich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, head of Engineering Thermophysics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is author of 40 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 Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

D'iachenko Iurii Vasil'evich (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor at the Engineering Thermophysics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is 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 Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 18 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – Ph.D., assistant professor, associate professor chair of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is author of 18 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Статья поступила 01 декабря 2015 г.

Received December 01, 2015

To Reference:

Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V. Vliyanie vnutrennikh istochnikov tepla na protsessy teploobmena v sisteme "chelovek – teplovaya 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. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115