

УДК 612.59:004(076.5)

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ НА ТЕПЛОВЫЙ КОМФОРТ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

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

*Новосибирский государственный технический университет*

В настоящей статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета тепловых процессов в системе терморегуляции человека в условиях низких температур с учетом внутренних источников и переноса тепла между расчетными элементами и слоями. Представленная методика расчета процессов комбинированного теплообмена позволяет получить локальные теплофизические параметры системы «человек – тепловая защита – окружающая среда» с учетом пассивной и активной тепловой защиты, пола, возраста и состояния организма, а также теплофизических и геометрических свойств расчетных элементов в широком диапазоне параметров окружающей среды. Представлена теплогидравлическая схема системы терморегуляции человека, которая иллюстрирует расчет массового расхода теплоносителя (крови) на расчетные элементы. Описана методика расчета среднemasовых температур «ядра» и «оболочки». В статье представлены результаты исследования влияния термических сопротивлений современных материалов, используемых для создания защитной одежды, на теплофизические параметры и состояние теплового комфорта человека. Исследованы материалы в диапазоне термических сопротивлений от 0 до  $1 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  в различных условиях окружающей среды. Анализ получаемых результатов позволяет дополнить эксперименты компьютерными исследованиями и оптимизировать элементы индивидуальных систем жизнеобеспечения для защиты человека от неблагоприятных температурных условий.

*Ключевые слова:* тепловая защита, системы жизнеобеспечения, процессы теплообмена, термическое сопротивление, теплопотери, низкие температуры.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-74-84

### Введение

Математические методы моделирования живых систем существуют наравне с экспериментальными методами физиологии и дополняют их. Применение компьютерных моделей позволяет рассматривать большое количество исследуемых факторов и устанавливать границы необходимых экспериментов. Эти модели находят применение при разработке индивидуальных систем жизнеобеспечения летательных аппаратов. Модельные исследования помогают в решении прикладных задач, связанных с оценкой теплового комфорта человека при работе в экстремальных температурных условиях. В настоящей статье представлена методика расчета тепловых процессов в системе терморегуляции (СТР) человека и проведен анализ эффективности использования тепловой защиты с различным термическим сопротивлением.

### 1. Методика расчета процессов теплообмена в организме человека

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

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Новосибирского государственного технического университета (проект С 19-22).

внутренние органы и мышцы. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом цилиндрической формы с соответствующим количеством и видом слоев. Для расчета процесса охлаждения используется система нестационарных одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности для каждого расчетного элемента с учетом тепловых процессов, которые происходят в каждом из его слоев [18, 19]. Методика позволяет учитывать количество тепла, переносимого с током крови между расчетными элементами и слоями, мощность внутренних источников тепла (внутренний метаболизм и физическую нагрузку), пол, возраст и тип конституции человека, температуру, скорость, давление и другие параметры окружающей среды.

Проведенный анализ представленных в литературе моделей показал, что большую сложность при моделировании представляет собой учет тепла, переносимого теплоносителем (кровью) между «ядром» и «оболочкой» [1–6]. Для иллюстрации получения расходно-напорных характеристик и теплофизических параметров теплоносителя в настоящей работе представлена разработанная теплогидравлическая схема системы терморегуляции человека (рис. 1) и алгоритм расчета среднemasовых температур слоев [20]. Расчетные элементы схемы связаны между собой сложной последовательно-параллельной гидравлической системой, имеющей переменные тепловые и гидравлические свойства. Кроме того, схема учитывает смешение теплоносителей с различной температурой и морфологические особенности строения исследуемых систем [7–12].

Для вычисления теплового потока  $q_{кр}$  от теплоносителя необходимо знать его количество в элементе ( $G_{кр}$ ), температуру входа и выхода ( $t_{вх}$ ,  $t_{вых}$ ) и его физические свойства (1). Так как размеры капилляра очень малы, а их количество в каждом расчетном элементе большое, то зависимостью температурного поля от распределения скоростей можно пренебречь. На основании расчетной схемы и с учетом морфологии сосудистого русла составляется система уравнений для определения расходно-напорных характеристик для каждого элемента, которая позволяет в частности вычислить объемный расход теплоносителя  $G_{кр}$  через расчетный элемент ( $i$ ) и слой ( $j$ ). 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 системы терморегуляции.

$$q_{кр\ ji} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} G_{кр\ ij} C_{P_{кр}} (t_{вх\ ij} - t_{вых\ ij}). \quad (1)$$

Для каждого слоя ( $j$ ) расчетного элемента (например,  $i = 2$  (рука)) рассчитывается изменение среднemasовой температуры  $\Delta T_{2j}^L$  на интервале времени  $\Delta \tau$  (2):

$$\Delta T_{21}^L = \frac{Q_{конв\ 21}^L + Q_{рад\ 21}^L + Q_{кр\ 21}^L}{c_{21} m_{21} / \Delta \tau + G_{кр\ 21} c_{кр}} \quad (j = 1, \text{ ядро});$$

$$\Delta T_{22}^L = \frac{Q_{конв\ 22}^L + Q_{рад\ 22}^L + Q_{кр\ 22}^L + Q_{тп\ 22}^L}{c_{22} m_{22} / \Delta \tau + G_{кр\ 22} c_{кр}} \quad (j = 2, \text{ оболочка}), \quad (2)$$

где  $L$  – номер расчетного интервала времени; конв – конвекция; рад – излучение, тп – теплопроводность; кр – кровь.

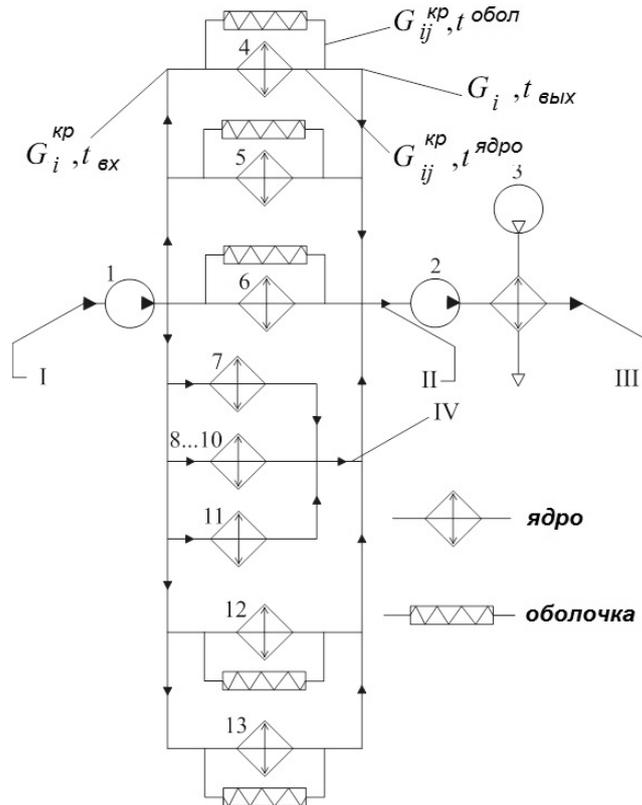


Рис. 1 – Условная теплогидравлическая схема системы терморегуляции человека:

1 – вход теплоносителя в первый контур; II – выход теплоносителя из первого контура; III – выход из второго контура; IV – выход из ядра; 1, 2 – насос (сердце); расчетные элементы: 3 – легкие; 4 – голова; 5 – руки; 6 – мышцы грудной клетки; 7 – миокард; 8–10 – внутренние органы; 11 – почки; 12 – мышцы нижней части туловища; 13 – ноги

Fig. 1 – A conditional thermal and hydraulic scheme of the human thermoregulation system:

1 is a heat carrier inlet to the first contour; II is a heat carrier exit from the first contour; III is an exit from the second contour; IV is a heat carrier exit from the core; 1, 2 are a pump (heart); calculated elements: 3 is lungs; 4 is a head; 5 is hands; 6 is thorax muscles; 7 is a cardiac muscle; 8–10 are digestive organs; 11 is kidneys; 12 is the lower body muscles; 13 is legs

Тогда среднемассовые температуры слоев определяются выражениями (3):

$$T_{21}^L = T_{21}^{L-1} + \Delta T_{21}^L; \quad T_{22}^L = T_{22}^{L-1} + \Delta T_{22}^L. \quad (3)$$

Принимаем допущение о равенстве среднемассовой температуры слоя и выходной температуры теплоносителя, протекающей вдоль слоя (теплообменник бесконечной площади):

$$T_{ij}^L = T_{\text{вых}ij}^L. \quad (4)$$

Таким образом, средняя температура теплоносителя на выходе из элемента определяется как

$$T_{\text{ВЫХ}_2}^L = \frac{\left( T_{\text{ВЫХ}_{21}}^L G_{\text{кр}21} + T_{\text{ВЫХ}_{22}}^L G_{\text{кр}22} \right)}{G_{\text{кр}21} + G_{\text{кр}22}}. \quad (5)$$

Выходные температуры на шаге  $L$  принимаются в качестве входных для следующего интервала времени  $L + 1$ . В начальный момент времени входная температура для всех тканей равна  $36,7^\circ\text{C}$  (нормальная температура «ядра»). Более подробно методика расчета и проверка достоверности описаны в [19].

## 2. Исследование влияния термического сопротивления защитной одежды на состояние теплового комфорта

На процесс охлаждения оказывают влияние многие параметры: условия окружающей среды, физиологические особенности организма, а также свойства защитной одежды, в том числе термическое сопротивление. При работах в условиях низких температур часто наблюдается охлаждение поверхностных и глубоких тканей тела человека и реакции системы терморегуляции в диапазоне от общих и/или локальных дискомфортных ощущений до поражений различной степени тяжести [13–16]. Для измерения теплового сопротивления материалов используется специальная единица –  $clo$  ( $1 clo = 0,155 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ). В настоящей работе проведен анализ эффективности защитной одежды для оценки теплового комфорта человека. Выбраны комплекты с разными величинами теплового сопротивления в диапазоне от 0 до 7  $clo$ .

Одним из критериев анализа теплового комфорта человека является оценка величины суммарных тепловых потерь организма. При выполнении исследований необходимо учитывать величину внутреннего метаболизма  $q_{\text{мет}}$  [2]. На рис. 2 представлены тепловые потери расчетных элементов при температурах окружающей среды  $24$  и  $-30^\circ\text{C}$  без защитной одежды и  $q_{\text{мет}} = 90 \text{ Вт}$ .

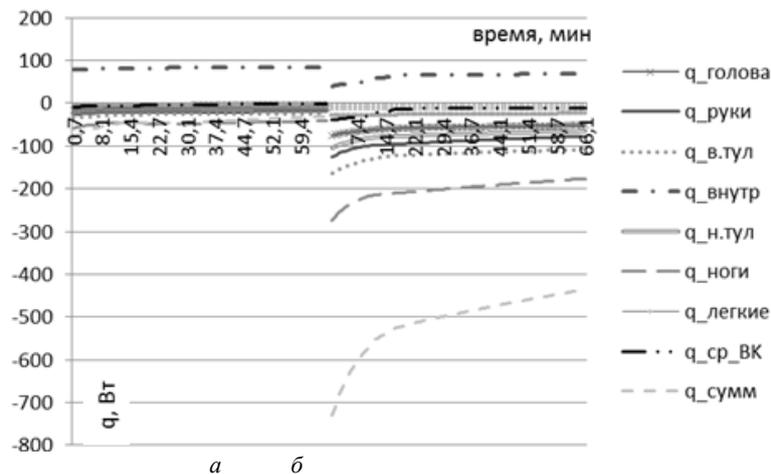


Рис. 2 – Теплотери расчетных элементов при разной температуре окружающей среды (женщина, 40 лет, температуры: а –  $24^\circ\text{C}$  и б –  $-30^\circ\text{C}$ )

Fig. 2 – Heat losses of calculated elements at different air temperatures (woman, 40 years old, air temperatures are  $24^\circ\text{C}$  (a) and  $-30^\circ\text{C}$  (b))

В первом случае суммарные тепловые потери не превышают внутренних тепловыделений, теплотери «ядра» отсутствуют, и человек может оценить свое состояние как комфортное. Во втором случае суммарные тепловые потери превышают  $q_{\text{мет}}$  в 4...7 раз, наблюдаются теплотери «ядра», что на практике приведет к тяжелым последствиям обморожения. Кроме того, охлаждение разных частей тела носит неодинаковый характер, так как они состоят из различных слоев с разными теплофизическими свойствами, а также имеют различную массу и поверхность теплообмена. Быстрее всего остывают ткани мышечной группы (руки и ноги) и грудная клетка (за счет воздухообмена через легкие). Это необходимо учитывать при создании средств защиты от холода, в том числе для диагностики мест установки утепляющих вставок в конструкцию одежды и подбора термических сопротивлений для них.

Исследование влияния величины термического сопротивления на среднemasсовую температуру «ядра» на примере руки показало, что при низких температурах повышение термического сопротивления одежды приводит к уменьшению теплотери расчетных элементов в окружающую среду и сохранению среднemasсовых температур на уровне до 28 °C (биологический порог в воздухе) (рис. 3).

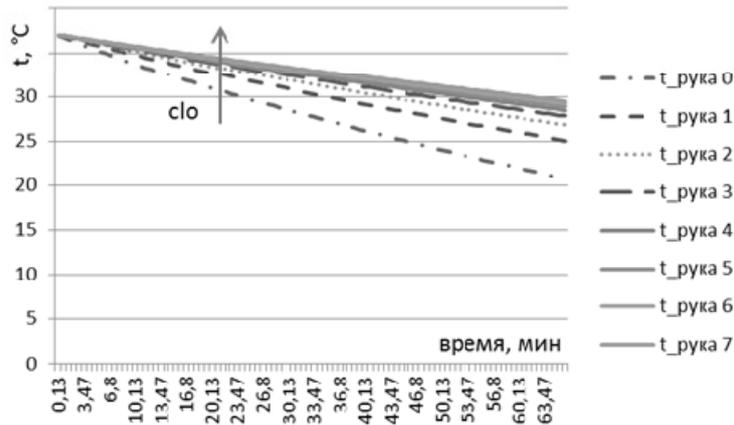


Рис. 3 – Влияние термических сопротивлений защитной одежды (0...7 clo) на среднemasсовую температуру «ядра» (элемент – рука) (женщина, 40 лет, температура среды –30 °C)

Fig. 3 – Influence of protective clothing thermal resistances (0... 7 clo) on the "core" weight average temperature (element – hand) (woman, 40 years old, air temperature is –30 °C)

В предыдущих работах показано, что кожа вместе с подкожными капиллярами системы терморегуляции представляет собой активный слой теплоизоляции с переменным термическим сопротивлением, которое зависит от количества поступившего в слой теплоносителя [18]. Низкие температуры стимулируют отток теплоносителя из-под кожи для снижения теплопроводности «оболочки», чтобы уменьшить за счет этого градиент суммарных тепловых потерь и как можно дольше сохранять температуру «ядра» на жизнеспособном уровне. В отдельных случаях сосудистый просвет за счет вынужденного спазма уменьшается на 90 %. Подобный спазм при нахождении на холоде и расширение при возврате в комфортные условия являются достаточно болезненным состоянием.

Установлено, что с увеличением термического сопротивления защитной одежды и при отсутствии физической нагрузки максимальный вклад теплопроводности

сти «оболочки» в суммарные теплотери расчетного элемента (рука) уменьшается с 23,38 % при 0 *clo* до 0,14 % при 7 *clo* (рис. 4). При этом наиболее значимый вклад наблюдается в диапазоне от 0 до 3 *clo*, что объясняет значимость этих сопротивлений для сохранения температуры «ядра». Несмотря на то что для сохранения среднemasсовой температуры «ядра» расчетных элементов нет существенной разницы между термическим сопротивлением защитной одежды в диапазоне от 4 до 7 *clo* (рис. 3), на практике, с точки зрения оценки теплового комфорта, эта разница существенна для субъективного ощущения человеком холода. Для достоверной оценки теплового комфорта необходимо получить данные о температуре кожи, так как холодовые рецепторы в большом количестве находятся в верхних покровных тканях, причем ближе к поверхности и в большем количестве, чем тепловые [11].

Для наглядности на рис. 5 представлены данные по среднemasсовым температурам кожи руки в зависимости от сопротивления 0; 5 и 7 *clo* при температуре среды  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра 10 м/с. Разница между 5 и 7 *clo* достигает  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что существенно сказывается на ощущении теплового комфорта человеком. Для кожи руки границей комфортного диапазона являются значения от 28 до  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При 5 *clo* человек выходит из зоны комфорта уже на 26 минуте, а при 7 *clo* – только на 45 минуте, т. е. допустимое время нахождения в данных условиях увеличивается почти на 20 мин.

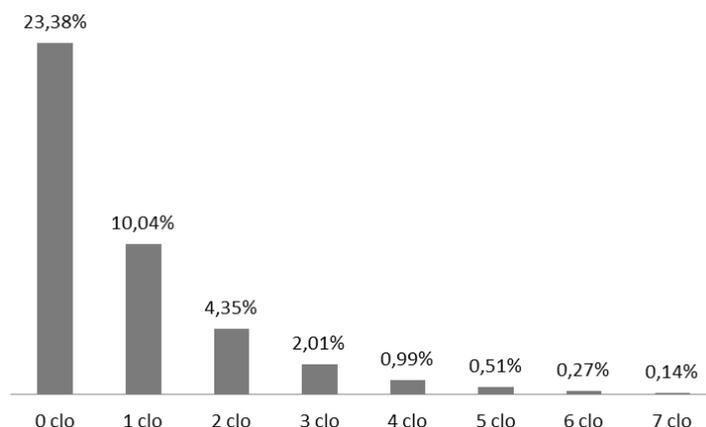


Рис. 4 – Максимальный вклад теплопроводности слоя подкожных капилляров СТР в суммарные тепловые потери руки в зависимости от сопротивлений защитной одежды (женщина, 40 лет, температура среды  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 4 – Maximum contribution of thermal conductivity of a subcutaneous capillary layer of a human thermoregulation system in hand total heat losses depending on protective clothing thermal resistance (a woman, 40 years old, air temperature is  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Таким образом, при наличии оптимально подобранного термического сопротивления одежды у системы подкожных капилляров отсутствует необходимость работать в «чрезвычайном» режиме, что в свою очередь способствует дополнительному снижению дискомфорта при работе в условиях низких температур. Кроме того, подбирать термические сопротивления для утепляющих элементов защитной одежды целесообразно в соответствии с тепловыми потерями различных частей тела (расчетных элементов) и с учетом среднemasсовых температур кожи

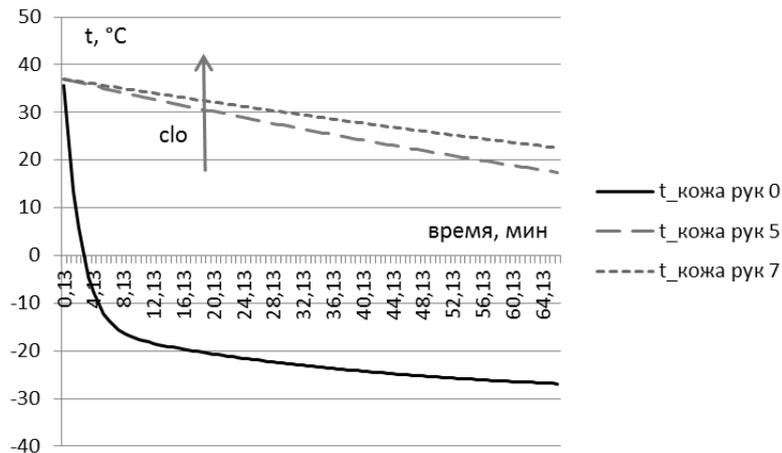


Рис. 5 – Оценка теплового комфорта для руки по среднемассовой температуре кожи (термическое сопротивление одежды: 0; 5 и 7 clo; температура среды  $-30^\circ\text{C}$ ; скорость ветра 10 м/с; женщина; 40 лет)

Рис. 5 – An estimate of thermal comfort for a hand by a weight average skin temperature (thermal resistance of clothes: 0; 5 and 7 clo; air temperature  $-30^\circ\text{C}$ ; wind speed 10 m/s; a woman, 40 years old)

в зависимости от количества поступившего в «оболочку» теплоносителя. Также следует предусмотреть удобные и конструктивно доступные варианты сброса избытка тепла при выполнении интенсивной физической работы, например в виде вентилирующих вставок на молниях или других креплениях [1, 4, 17].

### Заключение

Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить влияние термического сопротивления защитной одежды на состояние теплового комфорта человека при работе в условиях низких температур. Дает возможность определять границы проводимых экспериментов и создавать модельные тренажеры для отработки экстремальных ситуаций, связанных с переохлаждением, а также подобрать дополнительные элементы в конструкцию одежды для оптимизации элементов индивидуальных средств защиты. Результаты исследований могут быть полезны специалистам при проектировании: специализированных костюмов пожарных; спецодежды для персонала, выполняющего работы на станциях и путях РЖД, буровых станциях, угле- и щебнедобывающих карьерах и др. в неблагоприятных погодных условиях; термобелья для спортсменов и паралимпийцев; высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, а также при совершенствовании элементов систем термостабилизации скафандров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов: учебное пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.
2. Васин Ю.А. Тепловое состояние системы «человек–окружающая среда» в экстремальных условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2003. – 22 с.
3. Ермакова И.И. Исследование динамических процессов в системе терморегуляции человека методом цифрового моделирования: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Л., 1974. – 21 с.

4. Курмазенко Э.А. Конструирование тепломассообменных аппаратов систем жизнеобеспечения: учебное пособие / Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе. – М.: Изд-во МАИ, 1991. – 71 с.
5. Трегубов В.П. Математическое моделирование неньютоновского потока крови в дуге аорты // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 259–269. – DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-2-259-269. – На англ. яз.
6. Brengelmann G.L., Savage M.V. Temperature regulation in the neutral zone // The annals of the New York academy of science / ed. by C.M. Blatteis. – New York: New York Academy of Sciences, 1996. – Vol. 813, iss. 1: Thermoregulation. – P. 39–50.
7. Морман Д., Хеллер Л. Физиология сердечно-сосудистой системы. – 4-е междунар. изд. – СПб.: Питер, 2000. – 256 с.
8. Багаев С.Н., Захаров В.Н., Орлов В.А. Закономерности ветвления кровеносного русла. – Новосибирск, 2000. – 59 с. – (Препринт / Институт лазерной физики СО РАН; № 2).
9. Кирсанов Р.И., Куликов В.П. Винтовое (вращательно-поступательное) движение крови в сердечно-сосудистой системе // Успехи физиологических наук. – 2013. – Т. 44, № 2. – С. 62–78.
10. Neonatal hematology / ed. by P.A. De Alarcón, E.J. Werner. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 452 p.
11. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека: справочник. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
12. Основы космической биологии и медицины. Т. 2, кн. 1. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. – М.: Наука, 1975. – 422 с.
13. Уманский С.П. Снаряжение летчика и космонавта. – М.: Воениздат, 1967. – 192 с.
14. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты / под ред. В.С. Кошеева и З.С. Четвериковой. – М.: б. и., 1981. – 28 с.
15. Афанасьева Р.Ф., Бурмистрова О.Б., Бобров А.Ф. Холод. Критерии оценки и прогнозирование риска охлаждения // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – № 3 (49). – С. 13–18.
16. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики / Р.Ф. Афанасьева, И.В. Тихонова, А.Б. Михайлов, Т.М. Осина, И.Д. Михайлова, В.Т. Прохоров // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 155–158.
17. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, В.А. Спарин, И.В. Хромова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с. – (Учебники НГТУ). – ISBN 978-5-7782-3904-3.
18. Чичиндаев А.В., Хромова И.В., Дьяченко Ю.В. Влияние переноса тепла между расчетными элементами на тепловые процессы в системе «человек – окружающая среда» // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 1 (38). – С. 106–113. – DOI: 10.17212/1727-2769-2018-1-106-113.
19. Чичиндаев А.В., Хромова И.В. Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 214 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-3492-5.
20. Khromova I.V., Chichindaev A.V. Heat exchange processes modeling in «human body – thermal protection – environment» system // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 158. – P. 181–185. – DOI: 10.2991/avent-18.2018.35.

**INFLUENCE OF PROTECTIVE CLOTHING THERMAL RESISTANCE  
ON A HUMAN'S THERMAL COMFORT UNDER LOW  
TEMPERATURE CONDITIONS**

**Khromova I.V., Chichindaev A.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 human thermoregulation system under low temperature conditions. The proposed method allows calculating local thermo-physical parameters in the “Human body – Thermal protection – Envi-

ronment” system. It takes into account passive and active thermal protection, sex, age and an organism’s health state as well as heat transfer with a blood flow, internal heat sources, thermo-physical and geometric properties of calculated elements and thermal resistance of protection means in a wide range of surrounding medium parameters. The heat-hydraulic scheme of the human thermoregulation system which illustrates the calculation of the mass flow rate of the heat carrier (blood) for the calculated elements and layers is presented. The method of calculation of average mass temperatures of the "core" and "shell" is described. The paper presents the research results of the thermal resistance influence of modern materials used to create protective clothing on the thermo-physical parameters and the state of human thermal comfort. The materials in the range of thermal resistances from 0 to 1 ( $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ) under different environmental conditions were examined. Analysis of the obtained results allows supplementing experiments with computer research and optimizing elements of individual life support systems to protect a human from unfavorable temperature conditions.

*Keywords:* thermal protection, life support systems, heat exchange processes, heat carrier, thermal resistance, thermal losses, low temperatures.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-74-84

#### REFERENCES

1. Pichulin V.S. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie individual'nykh sistem zhizneobespecheniya ekipazhei kosmicheskikh apparatov* [Mathematical modeling and design of individual life support systems for crews of spacecraft: proc. allowance]. Moscow, MAI Publ., 2001. 88 p.
2. Vasin Yu.A. *Teplovoe sostoyanie sistemy "chelovek-okruzhayushchaya sreda" v ekstremal'nykh usloviyakh*: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Thermal state of the “human–environment” system under extreme conditions. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2003. 22 p.
3. Ermakova I.I. *Issledovanie dinamicheskikh protsessov v sisteme termoregulyatsii cheloveka metodom tsifrovogo modelirovaniya*: avtoref. diss. kand. biol. nauk [Research of dynamic processes in the system of human thermoregulation by the method of digital modeling. Author's abstract of PhD biological sci. diss.]. Leningrad, 1974. 21 p.
4. Kurmazenko E.A. *Konstruirovaniye teplomassoobmennyykh apparatov sistem zhizneobespecheniya* [Construction of heat and mass transfer devices for life support systems]. Moscow, MAI Publ., 1991. 71 p.
5. Tregubov V.P. Mathematical modelling of the non-Newtonian blood flow in the aortic arc. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 259–269. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-2-259-269.
6. Brengelmann G.L., Savage M.V. Temperature regulation in the neutral zone. *The annals of the New York academy of sciences*. Vol. 813, iss. 1. *Thermoregulation*. Ed. by C.M. Blatteis. New York, New York Academy of Sciences, 1996, pp. 39–50.
7. Mohrman D.E., Heller L.J. *Cardiovascular physiology*. New York, McGraw-Hill, Health Professions Division, 1997 (Russ. ed.: Morman D., Kheller L. *Fiziologiya serdechno-sosudistoi sistemy*. 4<sup>th</sup> ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2000. 256 p.).
8. Bagaev S.N., Zakharov V.N., Orlov V.A. *Zakonomernosti vtvleniya krovenosnogo rusla* [Regularities of vascular bed branching]. Preprint no. 2. Institute of laser physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Novosibirsk, 2000. 59 p.
9. Kirsanov R.I., Kulikov V.P. Vintovoe (vrashchatel'no-postupatel'noe) dvizhenie krovi v serdechno-sosudistoi sisteme [Helical (spiral or swirling) blood flow in cardiovascular system]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk*, 2013, vol. 44, no. 2, pp. 62–78. (In Russian).
10. De Alarcón P.A., Werner E.J. *Neonatal hematology*. New York,; Cambridge University Press, 2005. 452 p.
11. Berezovskii V.A. Kolotilov N.N. *Biofizicheskie kharakteristiki tkanei cheloveka: spravochnik* [Biophysical characteristics of human tissues. Directory]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 224 p.
12. *Osnovy kosmicheskoi biologii i meditsiny*. T. 2, kn. 1. *Ekologicheskie i fiziologicheskie osnovy kosmicheskoi biologii i meditsiny* [Fundamentals of space biology and medicine. Vol. 2,

- bk. 1. Ecological and physiological basis of space biology and medicine]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 422 p.
13. Umanskii S.P. *Snaryazhenie letchika i kosmonavta* [Pilot and astronaut equipment]. Moscow, Voenizdat Publ., 1967. 192 p.
  14. Koshcheev V.S., Chetverikova Z.S., eds. *Fiziologo-gigienicheskie trebovaniya k izoliruyushchim sredstvam individual'noi zashchity* [Physical and hygienic requirements for insulating personal protective equipment: edited by]. Moscow, 1981. 28 p.
  15. Afanas'eva R.F., Burmistrova O.B., Bobrov A.F. Kholod. Kriterii otsenki i prognozirovaniya riska okhlazhdeniya [Gold, assessment criteria and forecasting the human cooling risk]. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk – Bulletin of the East Siberian Scientific Center SBRAMS*, 2006, no. 3 (49), pp. 13–18.
  16. Afanas'eva R.F., Tikhonova I.V., Mikhailov A.B., Osina T.M., Mikhailova I.D., Prokhorov V.T. Polimernye materialy v proizvodstve kostyuma dlya voennosluzhashchikh Arktiki [Polymer materials in the production of a suit for Arctic soldiers]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Herald of Technological University*, 2015, vol. 18, no. 15, pp. 155–158.
  17. Chichindaev A.V., Dyachenko Yu.V., Sparin V.A., Khromova I.V. *Sistemy zhizneobespecheniya i oborudovanie letatel'nykh apparatov* [Life support systems and equipment for aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 319 p. ISBN 978-5-7782-3904-3.
  18. Chichindaev A.V., Khromova I.V., Dyachenko Yu.V. Vliyanie perenosa tepla mezhdou raschetnymi elementami na teplovye 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.
  19. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Teploobmen v sisteme «chelovek – okruzhayushchaya sreda» v usloviyakh nizkikh temperatur* [Heat exchange in the “human-environment” system in conditions of low temperatures]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 214 p. ISBN 978-5-7782-3492-5.
  20. Khromova I.V., Chichindaev A.V. Heat exchange processes modeling in "human body – thermal protection – environment" system. *Advances in Engineering Research*, 2018, vol. 158, pp. 181–185. DOI: 10.2991/avent-18.2018.35.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**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: xromova@corp.nstu.ru).

**Khromova Irina Vladimirovna** (b. 1983) – Ph.D (Eng.), associate professor, associate professor at the Department of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heating engineering. She is the author of 20 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: xromova@corp.nstu.ru).



**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: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ttf\_nstu@rambler.ru).

**Chichindaev Aleksandr Vasilevich** (b. 1960) – D.Sc. (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 heating engineering. He is the 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, доктор технических 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 Vasilievich** (b. 1944) – D. Sc. (Eng.), professor, professor at the department of Engineering Thermal Physics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heating 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 2019 г.  
Received Decembaer 11, 2019*

---

To References:

Khromova I.V., Chichindaev A.V., Dyachenko Yu.V. Vliyanie termicheskogo soprotivleniya zashchitnoi odezhdy na teplovoi komfort cheloveka v usloviyakh nizkikh temperatur [Influence of protective clothing thermal resistance on a human's thermal comfort under low temperature conditions]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 4 (45), pp. 74–84. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-74-84.