

Научная статья

УДК 687.173.2.03.016.5:536.2

doi 10.34216/2587-6147-2021-3-53-30-36

Маргарита Всеволодовна Родичева¹

Антон Вячеславович Абрамов²

Елена Михайловна Гнеушева³

^{1,2,3}Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, г. Орел, Россия

¹rodicheva.unpk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>

²Ant-lin88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>

³emign@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2783-5967>

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ

Аннотация. Предложен комплект вентилируемой одежды для защиты от заражения клещевыми инфекциями. Помимо защитной функции, такой комплект позволяет нормализовать тепловое состояние человека при повышенной температуре или физической активности за счет увеличения интенсивности отвода тепла и влаги от тела человека. Разработана численная модель теплообмена в вентилируемых воздушных прослойках. С ее помощью проведены исследования теплообмена при условиях максимальной активности кровососущих насекомых в диапазоне температур окружающей среды 15–25 °С. Проведена оценка баланса организма человека для уровня физической активности, характерного для представителей социальных групп с наиболее высоким риском заражения клещевыми инфекциями. Установлено, что воздушная прослойка толщиной $h_{ag} = 20$ мм в вентилируемой одежде позволит обеспечить нормативное тепловое состояние человека и эффективную защиту от заражения клещевыми инфекциями.

Ключевые слова: вентилируемая одежда, пакет материалов с воздушными прослойками, теплообмен, конвекция, излучение, температурное поле в пакете материалов, проектирование

Для цитирования: Родичева М. В., Абрамов А. В., Гнеушева Е. М. Развитие принципов проектирования вентилируемой одежды для защиты от биологических опасностей // Технологии и качество. 2021. № 3(53). С. 30–36. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-3-53-30-36>.

Original article

Margarita V. Rodicheva¹

Anton V. Abramov²

Elena M. Gneusheva³

^{1,2,3}Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

DEVELOPMENT OF VENTILATED CLOTHING DESIGN PRINCIPLES FOR PROTECTION AGAINST BIOLOGICAL HAZARDS

Abstract. A set of ventilated clothing to protect against tick-borne infections has been proposed. In addition to the protective function, such a kit allows you to normalising the thermal state of a person at elevated temperatures or physical activity by increasing the intensity of heat and moisture removal from the human body. A numerical model of heat transfer in ventilated air layers was developed. With its help, studies of heat and mass transfer were carried out under conditions of maximum activity of blood-sucking insects in the ambient temperature range of 15–25 °C. The balance of the human body was assessed for the level of physical activity typical for representatives of social groups with the highest risk of contracting tick-borne infections. It has been established that an air gap with a thickness of $h_{ag} = 20$ mm in ventilated clothing will provide a standard thermal state of a person and effective protection against infection with tick-borne infections.

Keywords: ventilated clothing, package of materials with air spaces, heat & mass transfer, convection, radiation, temperature field in package of materials, design

For citation: Rodicheva M. V., Abramov A. V., Gneusheva E. M. Development of ventilated clothing design principles for protection against biological hazards. Technologies & Quality. 2021. No 3(53). P. 30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-3-53-30-36>.

© Родичева М. В., Абрамов А. В., Гнеушева Е. М., 2021

Глобальные климатические изменения формируют новые опасности, что требует пересмотра принципов разработки защитной одежды. В последнее время на территории ЦФО Российской Федерации наблюдается рост числа случаев заражения клещевыми инфекциями на 5–10 % в год.

Очагами клещевых инфекций являются лесные регионы, имеющие густой подлесок из кустарника. Клещи встречаются на дачных участках и в пригородных лесах, особенно вдоль тропинок и на обочинах дорог. Группа риска заражения клещевыми инфекциями достаточно обширна и включает в себя лесников, грибников, дачников и другие социальные группы.

Защита от биологической опасности обеспечивается антимоскитной одеждой. При повышенной температуре или физической активности такая одежда не обеспечивает должную теплоотдачу организма.

Тепловой комфорт человека и защита от биологических опасностей могут быть обеспечены за счет регулирования теплоотдачи, например посредством эффекта вентиляции. В вентилируемой одежде между телом и верхним слоем пакета создается воздушная прослойка (рис. 1а), в которой возникают архимедовы силы, формирующие восходящее движение воздуха (рис. 1б). Этот поток вовлекает тепло и влагу с поверхности тела и выносит их в окружающую среду.

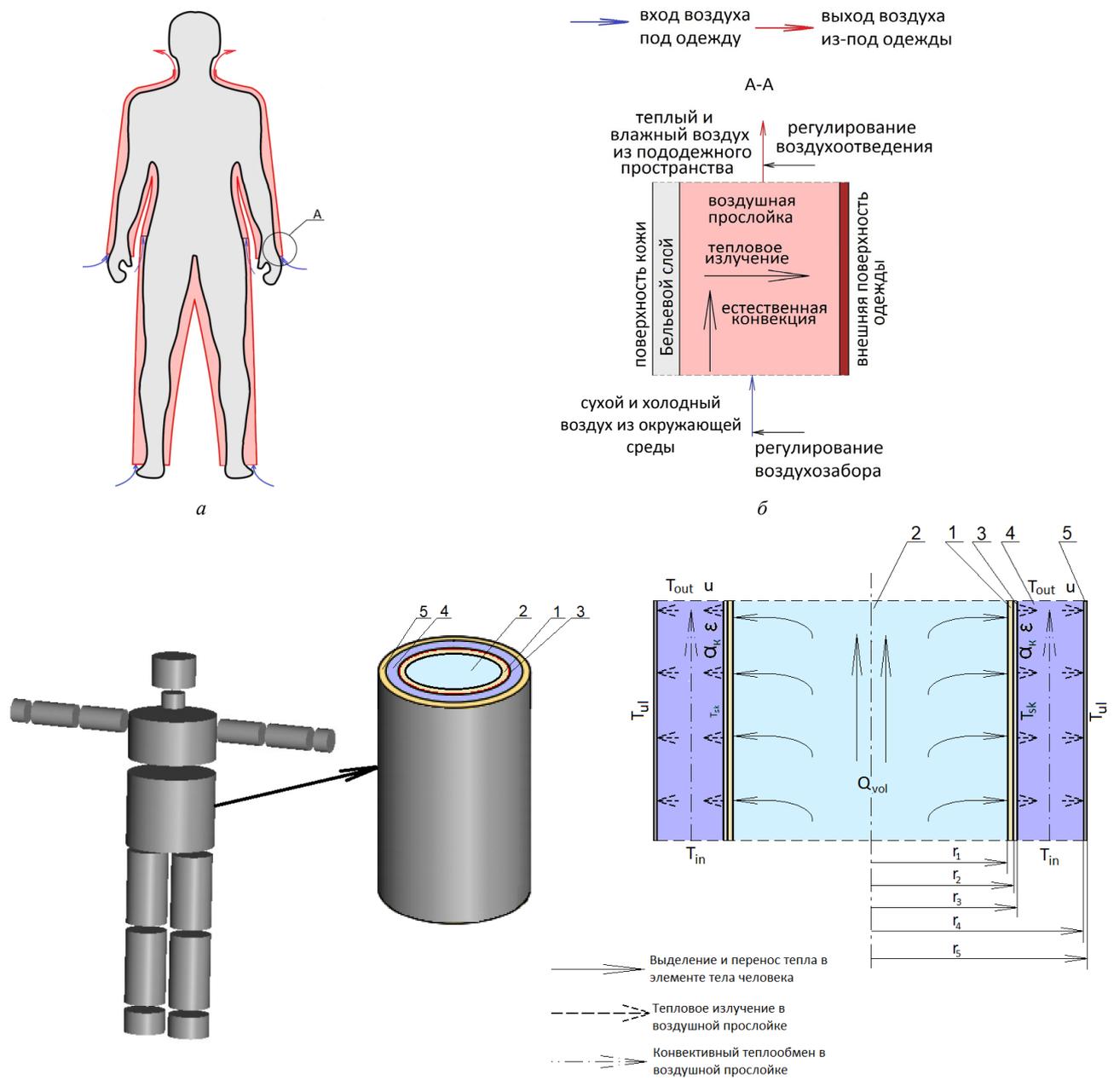


Рис. 1. Тепломассообмен в вентилируемой одежде

Расчет вентилируемой одежды проводится с учетом теплообмена в воздушной прослойке, интенсивность которого определяется численными методами [1–3]. В большинстве моделей воздухообмен пододежного пространства с окружающей средой порождается изменением давления под одеждой при движении человека [4, 5]. По этой причине результаты расчетов не всегда применимы к вентилируемым воздушным прослойкам. Естественная конвекция учтена в модели Z. Kang, однако ее граничные условия предполагают постоянство температуры кожи на уровне $t_{\text{CBTK}} = 34$ °С, а процессы генерация тепла в тканях тела не учитываются [6].

Таким образом, задача разработки численной модели теплообмена в вентилируемой воздушной прослойке с учетом процессов генерации тепла в теле человека и естественной конвекции в воздухе прослойки является актуальной. Ее решение позволит получить важные данные для проектирования вентилируемой одежды.

Описание математической модели теплообмена в вентилируемой одежде

Модель теплообмена в воздушной прослойке построена на примере пятиузловой сегмента тела в цилиндрических координатах (см. рис. 1в, который моделирует теплообмен человека ростом 174 см и весом 70 кг).

В «ядре» тела (узел 2, см. рис. 1в, з) поддерживается постоянная температура 37 °С, для чего в нем вырабатывается тепло Q_{vol} :

$$Q_{\text{vol}} = \frac{100}{K_p} \left(\Delta T + \frac{1}{K_i} \int_0^1 \Delta T dt - K_d \frac{dT}{dt} \right), \quad (1)$$

где K_p , K_i , K_d – соответственно пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты (определяются из режимов работы экспериментальной установки);

ΔT – «невязка», соответствующая разности измеренной температуры «ядра» T и ее установившегося значения $T_{\text{yc}} = 37$ °С.

Тело человека на 80 % состоит из жидкости. Ее движение (кровь) возможно только по сосудам и капиллярам под действием разности давлений, создаваемых сердечным ритмом. В основном объеме конвективные процессы не возможны. Перенос тепла в «ядре» тела человека, а также на границе с «оболочкой» описывается законом теплопроводности в жидкости без учета движения (2):

$$\begin{aligned} & \rho_w C_{pw} \left(\frac{\partial T_w}{\partial \tau} + u_w \cdot \nabla T_w \right) + \nabla \cdot q_w = \\ & = \alpha_{pw} T \left(\frac{\partial p_w}{\partial t} + u_w \cdot \nabla p_w \right) + \tau_w : \nabla u_w + Q_{\text{vol}}, \quad (2) \end{aligned}$$

где ρ_w – плотность воды в нагретом цилиндре, кг/м³;

C_{pw} – удельная теплоемкость воды в нагретом цилиндре, Дж/(кг·К);

T_w – температура воды в цилиндре, К;

p_w – давление в воде цилиндра, Па;

q_w – тепловой поток в цилиндре, переносимый теплопроводностью, Вт/м²;

α_{pw} – коэффициент температурного расширения воды в цилиндре, 1/К (формула (3));

τ_w – тензор вязкого напряжения в воде, Па;

Q_{vol} – тепло, вырабатываемое в цилиндре, Вт.

Температура «оболочки» тела (узел 1, см. рис. 1в, з) поддерживается на уровне 32–34 °С в зависимости от условий окружающей среды, за счет подвода тепла от «ядра». Его перенос в узлах 1, 3, 5, представляющих собой твердые стенки, описывается моделью теплопроводности:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} + \nabla \cdot q_s = -\alpha_s \frac{dS}{dt}, \quad (3)$$

где ρ_s – плотность материала в стенке, кг/м³;

C_{ps} – удельная изотермическая теплоемкость материала стенки, Дж/(кг·К);

T_s – абсолютная температура материала стенки, К;

q_s – плотность теплового потока, передаваемого через стенку теплопроводностью, Вт/м²;

α_s – коэффициент объемного расширения материала стенки, К⁻¹.

В воздушной прослойке между бельевым и верхним слоями пакета материалов (узел 4) тепло переносится конвекцией и тепловым излучением. Модель конвекции включает уравнения неразрывности (4), движения (5) и энергии (6):

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_a u_a) = 0, \quad (4)$$

$$\rho_a \frac{\partial u_a}{\partial \tau} + \rho_a (u_a \cdot \nabla) u_a = \nabla \cdot [-\rho_a I + \tau_a] + F_a, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \rho_w C_{pw} \left(\frac{\partial T_w}{\partial \tau} + (u_a \cdot \nabla) T_w \right) = \\ & = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T_a}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \bigg|_{p_a} \left(\frac{\partial p_a}{\partial \tau} + (u_a \cdot \nabla) p_a \right), \quad (6) \end{aligned}$$

где I – поток воздуха на выходе из прослойки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

F_a – сила, побуждающая движение, $\text{Н}/\text{м}^3$;

τ_a – тензор вязкого напряжения в воздухе, Па.

Лучистый тепловой поток между бельевым и верхним слоями вычисляется по известному закону Стефана – Больцмана.

Известно, что оптимальная толщина воздушной прослойки составляет $h_{\text{ag-опт}} = 20$ мм [7]. При $h_{\text{ag}} < h_{\text{ag-опт}}$ интенсивность конвективных потоков в воздухе резко снижается, а при $h_{\text{ag}} > h_{\text{ag-опт}}$ возникают проблемы с эргономич-

ностью вентилируемой одежды. Таким образом, при разработке численной модели толщина воздушной прослойки принята равной $h_{\text{ag-опт}}$.

Численная модель решалась при комбинированных граничных условиях. Закон конвективной теплоотдачи с поверхности бельевого слоя определен по критерию Nu. Результат решения представлен распределениями полей температуры, скорости движения воздуха и плотности тепловых потоков (например, на рис. 2 – для $t_{\text{окр}} = 20$ °С).

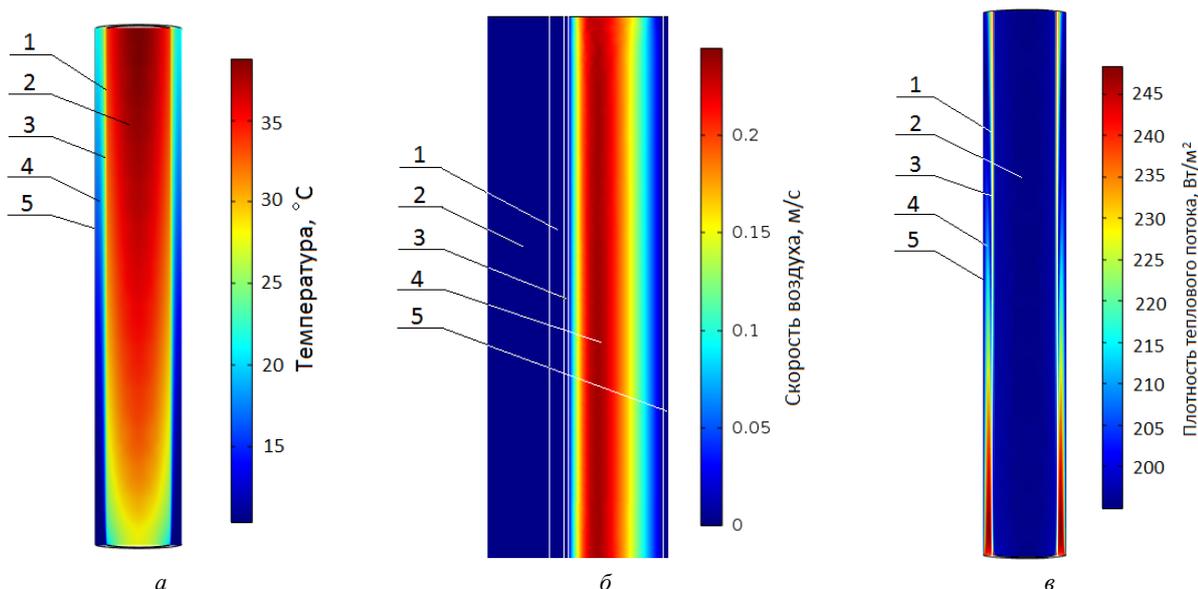


Рис. 2. Результаты расчета тепловых процессов в воздушной прослойке*:

а – распределения поля температуры; б – распределение поля скоростей воздуха; в – поле плотности тепловых потоков: 1 – «оболочка» элемента тела; 2 – «ядро» элемента тела; 3 – бельевого слоя пакета материалов; 4 – воздушная прослойка; 5 – верхний слой пакета материалов

Анализ результатов исследования

Расчет тепломассообмена в воздушных прослойках вентилируемой одежды проведен при $t_{\text{окр}} = +15...+25$ °С. Именно в этот период наблюдается максимальная активность кровососущих насекомых.

Согласно полученным результатам, изменение внешних условий не вызывает колебания температуры «ядра» и «оболочки» тела человека. Температура бельевого слоя изменяется на 2,5 °С, верхнего слоя пакета и воздуха в прослойке на 7,6 и 9,4 °С соответственно (рис. 3а).

Разность температур бельевого и верхнего слоев изменяется незначительно. Вследствие этого лучистый тепловой поток в воздушной прослойке также остается достаточно постоянным (рис. 3б).

Интенсивность конвекции в прослойке определяется подъемной силой F_a :

$$F_a = g(\rho_{\infty} - \rho_{\text{out}}), \quad (7)$$

где ρ_{∞} , ρ_{out} – величины плотности воздуха соответственно на входе и выходе из воздушной прослойки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – вектор силы тяжести.

Поле плотности воздуха в прослойке связано с распределением температурного поля:

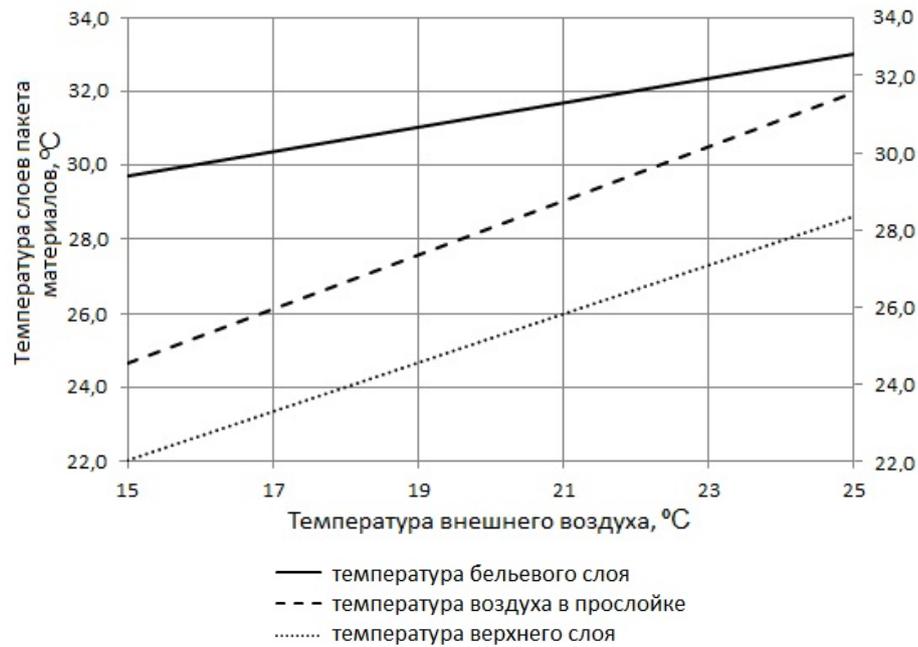
$$\rho = \rho_{\text{окр}} \left(1 - \frac{T - T_{\text{окр}}}{T_{\text{окр}}} \right), \quad (8)$$

где ρ – плотность воздуха в данной точке воздушной прослойки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

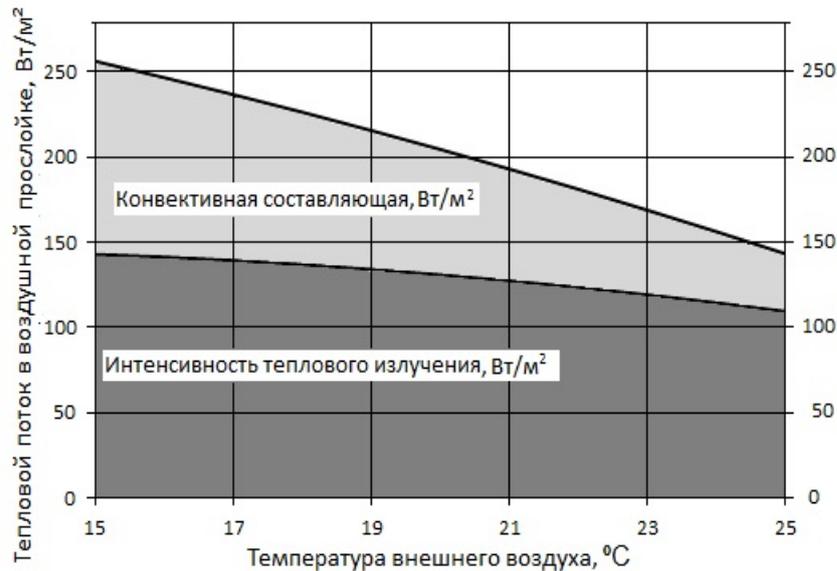
$\rho_{\text{окр}}$ – плотность воздуха при температуре окружающей среды $T_{\text{окр}}$;

T – температура в данной точке воздушной прослойки, К.

* Полноцветная версия представлена на сайте. URL: <https://tik.ksu.edu.ru>.



а



б

Рис. 3. Результаты исследования тепломассообмена в вентилируемой воздушной прослойке:

а – распределение поля температуры в пакете материалов с вентилируемой прослойкой;

б – структура теплового баланса в вентилируемой прослойке

По мере повышения температуры воздуха на входе в прослойку разность $\Delta\rho = \rho_{\infty} - \rho_{out}$ снижается. За счет влияния вектора силы тяжести подъемная сила уменьшается на порядок быстрее. Под действием этого эффекта доля конвективного потока в балансе теплоотдачи снижалась с 49 % при $t_{окр} = 15\text{ °C}$ до 25 % при $t_{окр} = 23\text{ °C}$.

Обоснование эффективности вентилируемой одежды в эксплуатационных условиях проводится путем оценки баланса между требуемым тепловым потоком на поверхности тела человека и его фактическим значением.

Оценка требуемого теплового потока проведена путем расчета метаболического эквивалента работы (metabolic equivalent of task – MET) [8]:

$$MET = 1,162m [Вт] = \frac{1,162h_0m}{m^{0,452}h^{0,725}} \left[\frac{Вт}{м^2} \right], \quad (9)$$

где h_0 – опорный рост человека (139 см);

m – вес человека, кг;

h – фактический рост человека, см.

В состоянии покоя тепловыделения составляют 1 МЕТ, или 47 Вт/м² для человека ростом 174 см и весом 70 кг. При легкой физической нагрузке, например ходьбе в свободном режиме, теплопродукция составляет 2...3 МЕТ. При существенных усилиях, например бег трусцой, – 4...5 МЕТ. При работе, требующей серьезных усилий, например перемещение грузов массой до 10 кг, теплопродукция близка к 6 МЕТ, а при предельных физических усилиях (перенос грузов массой свыше 10 кг) – 7 МЕТ. Фактическая теплоотдача с поверхности элемента тела

человека оценивается по тепловому потоку в воздушной прослойке, рассчитанному по модели.

Для оценки соответствия между ними составлена номограмма, поле которой разделено на уровни теплопродукции, различающиеся на 1 МЕТ (рис. 4). Далее на нее нанесены тепловые потоки, рассчитанные для воздушной прослойки $h_{ag} = 20$ мм. Уровень номограммы, соответствующий значению столбца, характеризует физическую нагрузку, при которой обеспечивается тепловой комфорт организма человека.

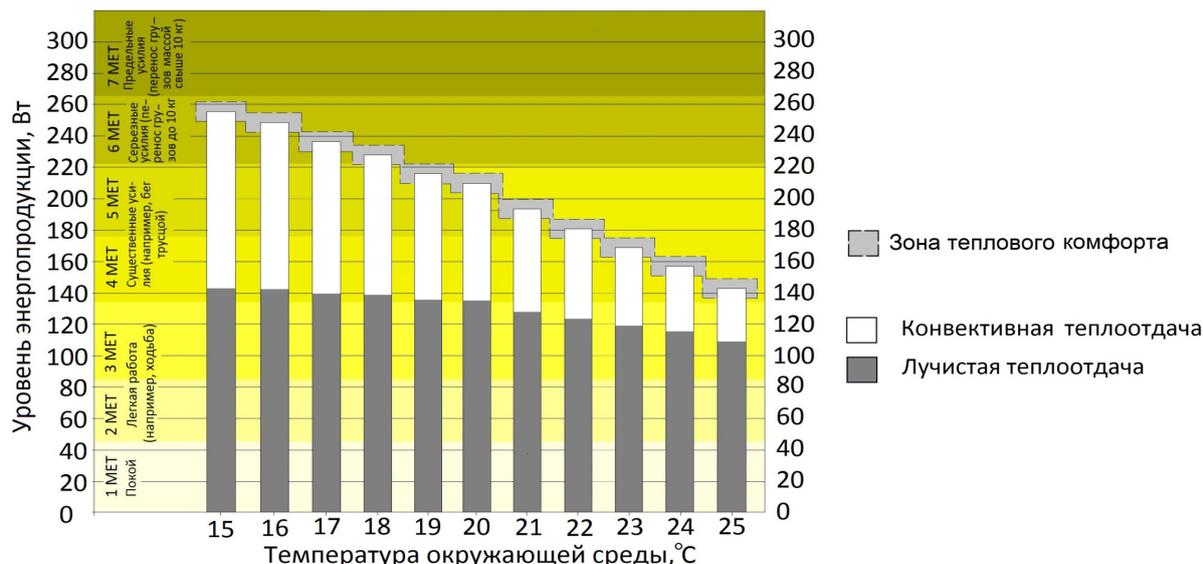


Рис. 4. Номограмма для определения комфортных условий эксплуатации вентилируемой одежды

Тепловой комфорт поддерживается при некотором дефиците (избытке) тепла в организме, значение которого хорошо известно [9]. На поле номограммы эти значения выделены в виде границ зоны теплового комфорта.

Согласно полученным данным, при температурах $t_{окр} = 15...18$ °C плотность теплового потока в воздушной прослойке $h_{ag} = 20$ мм способствует поддержанию теплового комфорта человека при выполнении работ, требующих серьезных физических усилий (6 МЕТ). Также на протяжении короткого времени комфорт будет обеспечен при выполнении работ на уровне 7 МЕТ.

При повышении температуры комфортный уровень физической нагрузки ожидаемо снижается. При $t_{окр} = 19...25$ °C комфортная ин-

тенсивность работ составляет 4...5 МЕТ, что соответствует существенным усилиям.

Уровень теплопродукции, соответствующий физической активности представителей социальных групп с наиболее высоким риском заражения клещевыми инфекциями, соответствует усилиям на уровне 3...5 МЕТ. Таким образом, вентилируемая одежда с воздушной прослойкой толщиной $h_{ag} = 20$ мм позволит обеспечить эффективную защиту от заражения клещевыми инфекциями.

На основе полученных данных необходимо разработать конструкцию комплекта, в котором будет обеспечена возможность создания и стабилизации воздушной прослойки толщиной $h_{ag} = 20$ мм между бельевым и верхним слоями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Analyzing stored thermal energy and thermal protective performance of clothing / G. W. Song, W. Cao, F. Gholamreza // *Textile Research Journal*. 2011. Vol. 81 No. 11. P. 1124–1138.
2. Effects of multiple air gaps on the thermal performance of firefighter protective clothing under low-level heat exposure / M. Fu, W. G. Weng, H. Y. Yuan // *Textile Research Journal*. 2014. Vol. 84, No 9. P. 968–978.

3. Ghazy A., Bergstrom D. J. Numerical simulation of transient heat transfer in a protective clothing system during a flash fire exposure // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2010. Vol. 58 No. 9. P. 702–724.
4. Coupled CFD and radiation simulation of air gaps in bench top protective fabric tests / P. Talukdar, D. A. Torvi, C. J. Simonson, C. M. Sawcyn // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, No 1/3. P. 526–539.
5. Sawcyn C. M. Heat Transfer Model of Horizontal Air Gaps in Bench Top Testing of Thermal Protective Fabrics // University of Saskatchewan, Saskatoon. 2003. 215 p.
6. Numerical modeling of body heat dissipation through static and dynamic clothing air gaps / Z. Kang, D. Shou, J. Fan // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. No 157. P. 119–133.
7. Effect of heterogenous and homogenous air gaps on dry heat loss through the garment / E. Mert, A. Psikuta, M. A. Bueno, R. M. Rossi // International Journal of Biometeorology. 2015. Vol. 59, No 11. P. 1701–1710.7.
8. Thermal protective performance of protective clothing used for low radiant heat protection / G. Song, S. Paskaluk, R. Sati, E. M. Crown, D. J. Doug, M. Ackerman // Textile Research Journal. 2011. Vol. 81, No 3. P. 311–323.
9. Кощеев В. С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода. М. : Медицина, 1981. 288 с.

REFERENCES

1. Song G. W., Cao W., Gholamreza F. Analyzing stored thermal energy and thermal protective performance of clothing. Textile Research Journal. 2011;81(11):1124–1138.
2. Fu M., Weng W. G., Yuan H. Y. Effects of multiple air gaps on the thermal performance of firefighter protective clothing under low-level heat exposure. Textile Research Journal. 2014;84(9):968–978.
3. Ghazy A., Bergstrom, D. J. Numerical simulation of transient heat transfer in a protective clothing system during a flash fire exposure. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2010;58(9):702–724.
4. Talukdar P., Torvi D. A., Simonson C. J., Sawcyn C. M. Coupled CFD and radiation simulation of air gaps in bench top protective fabric tests. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(1/3):526–539.
5. Sawcyn C. M. Heat Transfer Model of Horizontal Air Gaps in Bench Top Testing of Thermal Protective Fabrics. University of Saskatchewan, Saskatoon. 2003. 215 p.
6. Kang Z., Shou D., Fan J. Numerical modeling of body heat dissipation through static and dynamic clothing air gaps. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;157:119–133.
7. Mert E., Psikuta A., Bueno M. A., Rossi R. M. Effect of heterogenous and homogenous air gaps on dry heat loss through the garment. International Journal of Biometeorology. 2015;59(11):1701–1710.
8. Song G., Paskaluk S., Sati R., Crown E. M., Doug D. J., Ackerman M. Thermal protective performance of protective clothing used for low radiant heat protection. Textile Research Journal. 2011;81(3):311–323.
9. Koshcheev V. S. *Fiziologiya i gigiena individualnoj zashchity cheloveka ot holoda* [Physiology and hygiene of individual protection of a person from the cold]. Moscow, Meditsina Publ., 1981. 288 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 12.05.2021
Принята к публикации 18.08.2021