

Научная статья

УДК 687.173.2-026.657(985)

EDN JICANW

doi 10.34216/2587-6147-2022-4-58-12-18

Антон Вячеславович Абрамов<sup>1</sup>

Маргарита Всеволодовна Родичева<sup>2</sup>

Елена Михайловна Гнеушева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

<sup>2,3</sup> Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия

<sup>1</sup> Ant-lin88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>

<sup>2</sup> rodicheva.unpk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – ОДЕЖДА – СРЕДА» ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВЕТРА

**Аннотация.** Представлена численная модель теплообмена в системе «человек – одежда – среда» при комбинированном воздействии пониженных температур и ветра. С ее помощью исследован тепловой баланс в условиях I климатического региона Российской Федерации. Установлено, что изменение интенсивности теплообмена в условиях ветра связано с разрушением пограничного слоя на поверхности комплекта одежды. При каждом значении температуры в этом диапазоне можно выделить характерную скорость ветра, при которой наблюдается полное разрушение пограничного слоя на поверхности одежды и, как следствие, резкий скачок интенсивности теплоотдачи. На основе полученных данных составлена номограмма тепловых потоков в пакете одежды, которая позволяет подобрать оптимальные условия эксплуатации комплекта в зависимости от уровня физической активности человека.

**Ключевые слова:** теплообмен человека, комбинированное воздействие пониженных температур, конвективный теплообмен, условия сильного холода, арктическая зона Российской Федерации, пограничный слой на поверхности одежды, номограмма тепловых потоков

**Для цитирования:** Абрамов А. В., Родичева М. В., Гнеушева Е. М. Исследование теплообмена в системе «человек – одежда – среда» при комбинированном воздействии пониженных температур и ветра // Технологии и качество. 2022. № 4(58). С. 12–18. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-4-58-12-18>.

Original Article

Anton V. Abramov<sup>1</sup>

Margarita V. Rodicheva<sup>2</sup>

Elena M. Gneusheva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

<sup>2,3</sup> Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

## STUDY OF HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM “MAN – CLOTHING – ENVIRONMENT” UNDER THE COMBINED IMPACT OF LOW TEMPERATURES AND WIND

**Abstract.** A numerical model of heat transfer in the “human – clothing – environment” system under wind conditions is presented. It was used to study the nature of heat transfer in the I climatic region of the Russian Federation under the combined effect of low temperatures and wind. The conditions for the destruction of the boundary layer on the surface of clothing, as well as the nature of the change in the intensity of heat exchange between a person and the environment, are established.

**Keywords:** human heat & mass transfer, combined effect of low temperatures, convective heat transfer, severe cold conditions, Arctic zone of Russian Federation, boundary layer on garment surface, heat flux nomogram

**For citation:** Abramov A. V., Rodicheva M. V., Gneusheva E. M. Study of heat transfer in the system “man – clothing – environment” under the combined impact of low temperatures and wind. *Technologies & Quality*. 2022. No 4(58). P. 12–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-4-58-12-18>.

В нашей стране реализуются многочисленные проекты по развитию Арктической зоны. В то же время в последние десятилетия не уделялось должного внимания задаче развития методов оценки качества теплозащитной одежды, что привело к накоплению ряда нерешенных задач. В частности, актуальной является проблема формирования комплектов одежды из современных эксплуатационных материалов.

В мировой практике подобные задачи решаются методами компьютерного моделирования теплообмена, что позволяет более полно учесть комплекс эксплуатационных условий при формировании пакетов теплозащитной одежды. При построении численных моделей широкое распространение получил феноменологический подход, при котором пакет одежды представлен контактирующими прямоугольными элементами, которые соответствуют определенному слою одежды или воздушной прослойке между ними. Вещество в каждом таком элементе считается однородным. Структурные характеристики и теплофизические свойства материалов задаются в виде экспериментально определенных коэффициентов [1–3].

Несмотря на свою простоту метод позволяет получать достаточно точные результаты. К настоящему времени с его помощью решены многочисленные задачи. В то же время определенные аспекты теории и практики теплообмена в системе «человек – одежда – среда» в должной степени не рассмотрены. В частности, не в полной мере исследованы процессы разрушения пограничного слоя в условиях ветра.

Известно, что в безветренную погоду на поверхности одежды образуется тонкий слой нагретого воздуха, осуществляется естественно-конвективный теплообмен человека, который обеспечивает 30...40 % общей теплоотдачи. Горизонтальный воздушный поток, движущийся под действием ветрового напора, вызывает частичное разрушение пограничного слоя и поступление в него более холодного воздуха. Тем не менее, по экспериментальным данным, даже в условиях сильного ветра пограничный слой оказывает определенное действие на теплообмен человека [4].

Современные численные модели не позволяют в полной мере исследовать теплообмен при комплексном воздействии пониженных температур и ветра в условиях разрушения

пограничного слоя на поверхности одежды [5, 6]. В то же время в I климатическом регионе Российской Федерации теплообмен человека протекает именно в этих условиях. Таким образом, актуальной задачей развития методов оценки качества теплозащитной одежды является построение численной модели теплообмена в системе «человек – одежда – окружающая среда» с учетом смешанной конвекции в условиях ветра.

Для построения такой модели рассмотрим типовой комплект теплозащитной одежды, который достаточно часто используется в I климатическом регионе (рис. 1). В его состав входят: бельевого слоя, свитер, утепленный полукомбинезон, утепленная куртка.

За счет конструктивных особенностей изделий на различных участках тела человека структура пакета одежды будет различной. В качестве примера рассмотрим структуру пакета одежды на уровне груди. Для этого ограничим длину и высоту рассматриваемого участка размерами 100 × 100 мм. Эти размеры облегчают процесс расчета лучистого теплообмена.

При построении геометрических моделей пакета одежды учитывались результаты трехмерного сканирования воздушных прослоек между свитером и полукомбинезоном ( $h_{с-пк} = 2...7$  мм), а также между полукомбинезоном и курткой ( $h_{пк-к} = 3...9$  мм) [7]. На основе предельных значений этих диапазонов получены две модели пакета одежды – с прослойками минимальной и максимальной толщины.

Учитывая значительный вес теплозащитной одежды, контакт бельевого слоя с телом человека можно считать плотным. При изготовлении курток для условий I климатического региона используются материалы с ветрозащитными пропитками, что позволяет исключить возможность проникновения холодного воздуха в пододежное пространство под действием ветра. Таким образом, схема теплообмена в системе «человек – одежда – среда» принимает вид, показанный на рис. 2.

За счет плотного контакта между телом и одеждой на внутренней поверхности бельевого слоя может быть задан тепловой поток, рассеиваемый телом человека в окружающую среду. Его величина соответствует уровню метаболических тепловыделений.

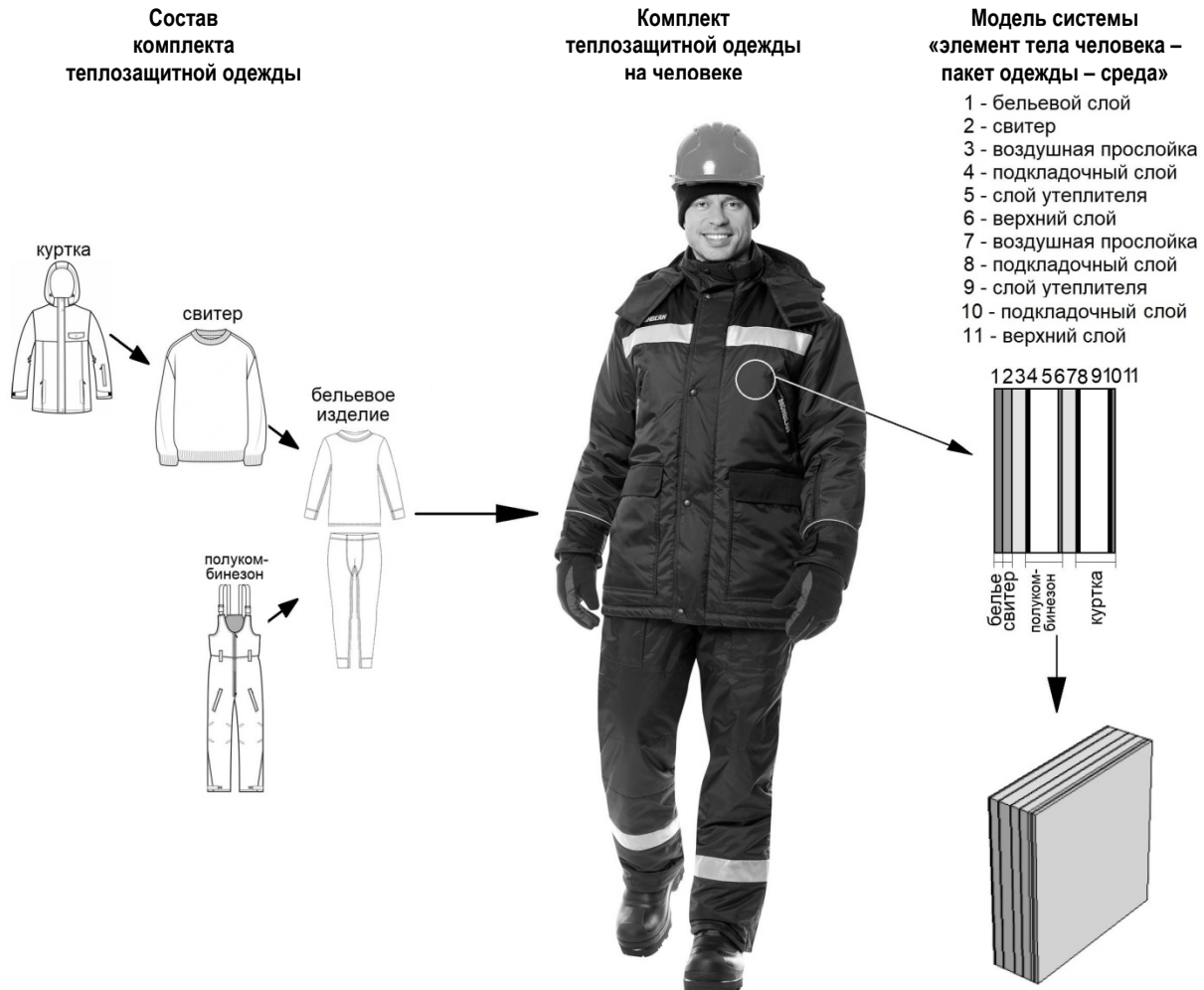


Рис. 1. Этапы построения геометрической модели пакета одежды

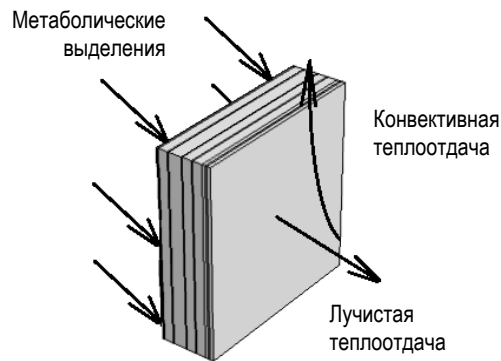


Рис. 2. Схема тепловых процессов в пакете одежды в условиях комбинированного воздействия пониженных температур и ветра

Далее это тепло переносится через пакет одежды, представленный в виде системы прямоугольных элементов теплопроводностью. Математическая модель этого процесса имеет вид:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left( \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) = Q_{\text{met}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность вещества в рассматриваемой области, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – удельная изотермическая теплоемкость материала слоя, Дж/(кг · К);

$T$  – температура в каждой из точек рассматриваемого слоя, К;

$q$  – тепловой поток, подводимый к крайней левой границе слоя за счет теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{met}}$  – количество энергии, подаваемой к крайней левой границе образца, Вт.

Крайняя правая граница геометрической модели соответствует поверхности одежды. Она участвует в тепломассообмене с окружающей средой. Таким образом, на ее поверхности задаются теплообмен естественной конвекцией и тепловым излучением.

Математическая модель естественно-конвективной теплоотдачи принимает следующий вид:

$$\alpha_{\tau} T + \frac{u_{\tau}}{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)} + Q_{\text{конв}} = \rho_{\text{в}} C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha_{\tau}$  – коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К;

$T$  – температура воздуха в точке пограничного слоя, К;

$u_{\tau}$  – скорость движения воздуха, вызываемого его тепловым расширением, м/с;

$Q_{\text{конв}}$  – количество тепла, отдаваемого с поверхности пакета одежды за счет естественной конвекции, Вт;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха при данной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – удельная изотермическая теплоемкость воздуха, Дж/(кг · К);

$\tau$  – продолжительность эксперимента, с.

Уравнение (2) описывает процесс восходящего движения воздуха при естественно-конвективном теплообмене. При проведении численного моделирования оно решается для пограничного слоя воздуха совместно с уравнением энергии, которое имеет вид, аналогичный уравнению (1). Связь между этими уравнениями обеспечивается через поле плотности воздуха, которое, в свою очередь, рассчитывается из распределения поля температур по приближению Буссинеска [8].

Горизонтальный воздушный поток в условиях ветра определяется ветровым напором. Математическая модель этого процесса принимает следующий вид [9]:

$$Q_{\text{конв}} = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right) + \alpha_p T \left( \frac{\partial p}{\partial \tau} \right), \quad (3)$$

где  $p$  – давление воздуха в точке, Па;

$\alpha_p$  – коэффициент расширения воздуха при изменении давления.

Изменение конвективных процессов влияет на характер температурного поля поверхности одежды. В результате в условиях ветра про-

исходит изменение лучистой составляющей теплоотдачи. Таким образом, в численной модели также необходимо учитывать этот процесс.

Для получения математической модели лучистого теплообмена будем считать поверхность одежды серой в инфракрасном спектре. Интенсивность теплового излучения таких тел вычисляется по сумме потоков испускания (в направлении от поверхности пакета одежды  $\Omega$ ) и поглощения (в направлении к пакету одежды  $\Omega'$ ) тепла. Соотношение между ними описывается фазовой функцией  $\varphi = f(\Omega, \Omega')$ , коэффициентами излучения  $\sigma_s$  и поглощения  $k$ . Баланс потоков можно записать для каждой элементарной ячейки поверхности теплообмена [10]:

$$\Omega \cdot \nabla I(\Omega) = k I_b(T) - \beta I(\Omega) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \iint_{4\pi} (I_b(\Omega') \varphi(\Omega, \Omega')) d\Omega', \quad (4)$$

где  $I_b$  – тепловой потока с поверхности абсолютно черного тела;

$\beta$  – среднеинтегральное значение коэффициентов испускания и поглощения.

При этом плотность теплового потока с поверхности абсолютно черного тела

$$I_b = \frac{n_{\tau}^2 \sigma T^4}{\pi}, \quad (5)$$

где  $n_{\tau}$  – единичный нормальный вектор излучения;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Размеры рассматриваемого участка выбирались таким образом, чтобы считать углы наклона каждой точки к нормали одинаковыми, что облегчает процедуру интегрирования в уравнении (4).

Соотношения (1)–(5) являются математической моделью теплообмена в системе «человек – одежда – среда» при комбинированном воздействии пониженных температур и ветра. При численном решении модели температура окружающей среды составляла, °С: 0; –10; –25; –41; скорость ветра, м/с: 0; 3; 6,5; 9,5; 12. Эти условия характерны для I климатического региона Российской Федерации.

В результате численного моделирования установлены: характер распределения полей температуры и тепловых потоков в пакете материалов, интенсивность теплоотдачи с поверхности одежды (рис. 3, 4).

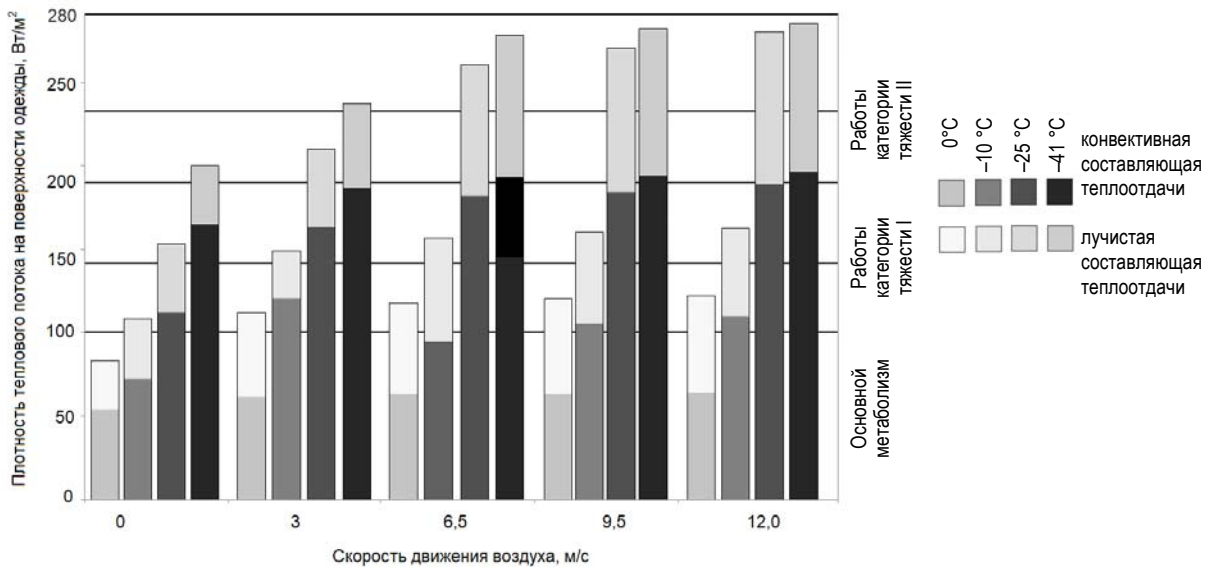


Рис. 3. Плотность тепловых потоков в системе «человек – одежда – среда» при различных условиях комплексного воздействия на человека пониженных температур и ветра

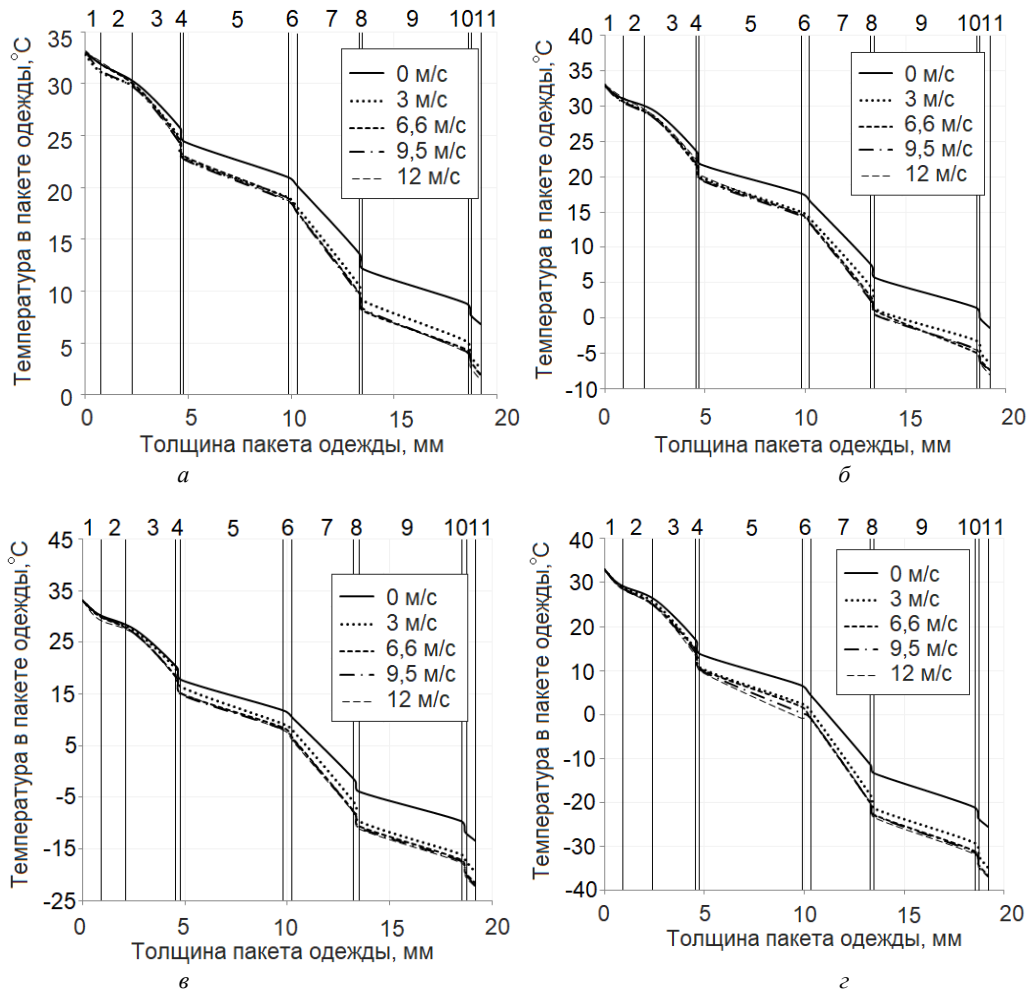


Рис. 4. Распределение температурного поля в пакете одежды при различной температуре:  
а – при  $t_{\text{окр}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б – при  $t_{\text{окр}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в – при  $t_{\text{окр}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; г – при  $t_{\text{окр}} = -41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
1 – бельевой слой; 2 – свитер; 3, 7 – воздушная прослойка; 4, 8, 10 – подкладочный слой;  
5, 9 – слой утеплителя; 6, 11 – верхний слой

Согласно полученным результатам в безветренную погоду теплоотдача изменяется плавно, без скачков (см. рис. 3). Эта динамика сохраняется и при температуре  $-25...0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра 3 м/с. При этом интенсивность теплоотдачи возрастает на 25...30 % в сравнении с тепловым потоком на поверхности одежды в безветренную погоду. Это свидетельствует о постепенной хаотизации воздушного потока в пограничном слое.

В условиях ветра, движущегося со скоростью 6,5 м/с и выше, характер теплообмена изменяется. Наблюдается резкий рост теплового потока на поверхности одежды за счет конвективной и лучистой составляющих. Это свидетельствует о разрушении пограничного слоя на поверхности одежды, после чего теплоотдача протекает в условиях свободного воздуха. При этом дальнейшее повышение скорости ветра почти не вызывает существенного роста теплоотдачи.

В условиях спокойного воздуха температура всех слоев пакета одежды немного выше, чем при воздействии ветра (см. рис. 4). В условиях ветра со скоростью 3 м/с наблюдается наиболее резкое изменение температуры в пакете одежды. При дальнейшем нарастании его ин-

тенсивности характер температурного поля в пакете одежды почти не изменяется. При построении численной модели исключалась возможность проникновения холодного воздуха в пакет одежды. Наблюдаемые изменения температурного поля связаны с влиянием внешнего теплообмена. Таким образом, использование тканей верха с ветростойкими пропитками позволяет обеспечить надежную защиту человека от переохлаждения при комбинированном воздействии пониженных температур и ветра в I климатическом регионе Российской Федерации.

Впрочем, эти выводы нуждаются в дополнительной проверке, так как в условиях реальной эксплуатации будет наблюдаться проникновение холодного воздуха под одежду через конструктивные неплотности.

Отметим, что полученные результаты расчетов иллюстрируют динамику теплообмена на поверхности одежды в условиях I климатического региона РФ. В то же время численная модель раскрывает механизмы разрушения гидродинамического пограничного слоя на поверхности одежды, что требует дополнительных исследований.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alsaad H., Voelker C. CFD Assessment of Thermal Comfort and Indoor Air Quality Using Ductless Personalized Ventilation // 15th IBPSA Conference. San Francisco, 2017. P. 273–281.
2. Исследование влияния пористости на теплопроводность однослойных вспененных материалов типа «неопрен» / И. В. Черунова, Е. Н. Сирота, С. Ш. Ташпулатов, Г. И. Махмудова, З. У. Зуфарова, П. В. Черунов, З. А. Сабирова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 75–80.
3. Экспериментальный комплекс для оценки эксплуатационной эффективности пакетов материалов современной теплозащитной одежды / М. В. Родичева, Ю. С. Шустов, А. В. Абрамов, Т. Н. Ветрова // Дизайн и технологии. 2019. № 70. С. 65–71.
4. Кощеев В. С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода. М. : Медицина, 1981. 288 с.
5. Fiala D., Lomas K., Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature response to a wide range of environmental conditions // International journal Biometeorology. 2001. Vol. 41. P. 143–159.
6. A numerical investigation of the influence of wind on convective heat transfer from the human body in a ventilated room / J. Xua, A. Psikuta, J. Lia, S. Annaheim, R. M. Rossi // Building and Environment. 2021. Vol. 188. P. 107–127.
7. McQuerry M., Denhartog E., Barker R. Analysis of Air Gap Volume in Structural Firefighter Turnout Suit Constructions in Relation to Heat Loss // Textile Research Journal. 2018. Vol. 88(21). P. 2475–2484.
8. Bejan A. Heat transfer. Handbook. N.-Y. : Wiley, 1993. 704 p.
9. Mahyuddin N., Awbi H. B., Essah E. A. Computational fluid dynamics modelling of the air movement in an environmental test chamber with a respiring manikin // Journal Building Performance Simulation. 2015. Vol. 8. P. 940–952.
10. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incropera, D. P. De Witt, T. L. Bergman, A. S. Lavine. N.-Y. : John Wiley & Sons, 2006. 658 p.

## REFERENCES

1. Alsaad H., Voelker C. CFD Assessment of Thermal Comfort and Indoor Air Quality Using Ductless Personalized Ventilation. *15th IBPSA Conference*. San Francisco, 2017. P. 273–281.
2. Cherunova I. V., Sirota E. N., Tashpulatov S. Sh., Makhmudova G. I., Zufarova Z. U., Cherunov P. V., Sabirova Z. A. Research of the influence of porosity on thermal conductivity of single-layer foamed materials of the “neoprene” type. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 2021;3(393):75–80. (In Russ.)
3. Rodicheva M. V., Shustov Yu. S., Abramov A. V., Vetrova T. N. Experimental complex for assessing the operational efficiency of packages of materials for modern heat-protective clothing. *Dizayn i tekhnologii* [Design and technologies]. 2019;70:65–71. (In Russ.)
4. Koshcheev V. S. Physiology and hygiene of individual protection of a person from the cold condition. Moscow, Medicine Publ., 1981. 288 p. (In Russ.)
5. Fiala D., Lomas K., Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature response to a wide range of environmental conditions. *International journal Biometeorology*. 2001;41:143–159.
6. Xua J., Psikuta A., Lia J., Annaheim S., Rossi R. M. A numerical investigation of the influence of wind on convective heat transfer from the human body in a ventilated room / *Building and Environment*. 2021;188:107–127.
7. McQuerry M., Denhartog E., Barker R. Analysis of Air Gap Volume in Structural Firefighter Turnout Suit Constructions in Relation to Heat Loss. *Textile Research Journal*. 2018;88(21):2475–2484.
8. Bejan A. Heat transfer. Handbook. New York, Wiley, 1993. 704 p.
9. Mahyuddin N., Awbi H. B., Essah E. A. Computational fluid dynamics modelling of the air movement in an environmental test chamber with a respiring manikin. *Journal Building Performance Simulation*. 2015;8:940–952.
10. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York, John Wiley & Sons, 2006. 658 p.

Статья поступила в редакцию 19.10.2022  
Принята к публикации 23.11.2022