

Научная статья

УДК 687.1:536.2]:519.876.5

EDN RTKNFX

doi 10.34216/2587-6147-2022-2-56-11-15

Маргарита Всеволодовна Родичева¹

Антон Вячеславович Абрамов²

Николай Николаевич Уткин³

Полина Михайловна Малярова⁴

¹Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия

^{2,3,4}Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

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

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

³pmalyarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-5211>

⁴kol.utkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6211-5565>

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ТЕПЛОВЫМ РАСЧЕТАМ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ОДЕЖДЫ

Аннотация. Существующие математические модели теплообмена не в полной мере учитывают форму и размеры воздушных прослоек вентилируемой одежды. Предложен метод численного моделирования, который позволяет исследовать теплообмен в воздушных прослойках с учетом влияния морфологии тела человека и физико-механических свойств текстильных материалов. В результате расчетов выявлены особенности конвективных процессов в воздушных прослойках вентилируемой одежды при температуре окружающей среды +27 °С. Выявлены зоны интенсификации и торможения воздушного потока, определена теплоотдача с поверхности тела человека, интенсивность которой соответствует результатам физиологических исследований.

Ключевые слова: вентилируемая одежда, пакеты материалов с воздушными прослойками, теплообмен, численное моделирование, проектирование, геометрическая модель, виртуальный манекен

Для цитирования: Новые подходы к тепловым расчетам вентилируемой одежды / М. В. Родичева, А. В. Абрамов, Н. Н. Уткин, П. М. Малярова // Технологии и качество. 2022. № 2(56). С. 11–15. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-11-15>.

Original article

Margarita V. Rodicheva¹

Anton V. Abramov²

Nikolai N. Utkin³

Polina M. Malyarova⁴

¹Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

^{2,3,4}Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

NEW APPROACHES TO THERMAL CALCULATIONS OF VENTILATED CLOTHING

Abstract. It is shown that the existing mathematical models of heat transfer do not fully take into account the real shape and dimensions of the air layers of ventilated clothing. A numerical modelling method is proposed that takes into account the influence of the morphology of the human body and the physical and mechanical properties of textile materials on the size and shape of the air gap. Peculiarities of convective processes in the air interlayers of ventilated clothing at the ambient temperature of +27 °C are revealed by the calculations. The zones of intensification and deceleration of the air flow under the clothes were revealed. It is shown that the results of calculations are consistent with the results of experimental studies.

Keywords: ventilated clothing, air-laid material packs, heat and mass transfer, numerical simulation, projecting, geometric model, virtual mannequin

For citation: Rodicheva M. V., Abramov A. V., Utkin N. N., Malyarova P. M. New approaches to thermal calculations of ventilated clothing. Technologies & Quality. 2022. Nr 2(56). P. 11–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-11-15>.

© Родичева М. В., Абрамов А. В., Уткин Н. Н., Малярова П. М., 2022

Вентилируемая одежда является одним из средств защиты человека от перегрева. Принцип ее действия заключается в организации регулируемого движения воздуха в воздушных прослойках пододежного пространства. Ее размеры фиксируются системой каркасных элементов, а забор воздуха под одежду осуществляется посредством вентиляционных вставок. В результате под одеждой формируется конвективный поток, который усиливает теплоотвод с поверхности тела человека.

Проектирование вентиляруемой одежды связано с необходимостью исследования теплообмена в вентиляруемых воздушных прослойках. При этом необходимо получить геометрическую модель прослойки с учетом морфологии тела человека и физико-механических свойств текстильных материалов и рассчитать интенсивность конвективной теплоотдачи от тела человека при различных начальных условиях.

В современных численных моделях воздушная прослойка представлена в виде правильного прямоугольника. В то же время за счет сложной структуры поверхности тела человека и драпирования изделий под влиянием физико-механических свойств текстильных материалов воздушные прослойки вентиляруемой одежды не могут быть представлены простыми геометрическими фигурами [1].

М. Денг с соавторами предложила исследовать форму воздушных прослоек одежды методами трехмерного сканирования [2]. Реализация метода на примере вентиляруемой одежды для промышленных теплиц (рис. 1а) выявила существенные погрешности, ограничивающие его применимость для оценки вентиляруемой одежды. Таким образом, на настоящий момент отсутствует общепринятый метод исследования тепловых процессов в вентиляруемой одежде, что является фактором, сдерживающим ее дальнейшее развитие.

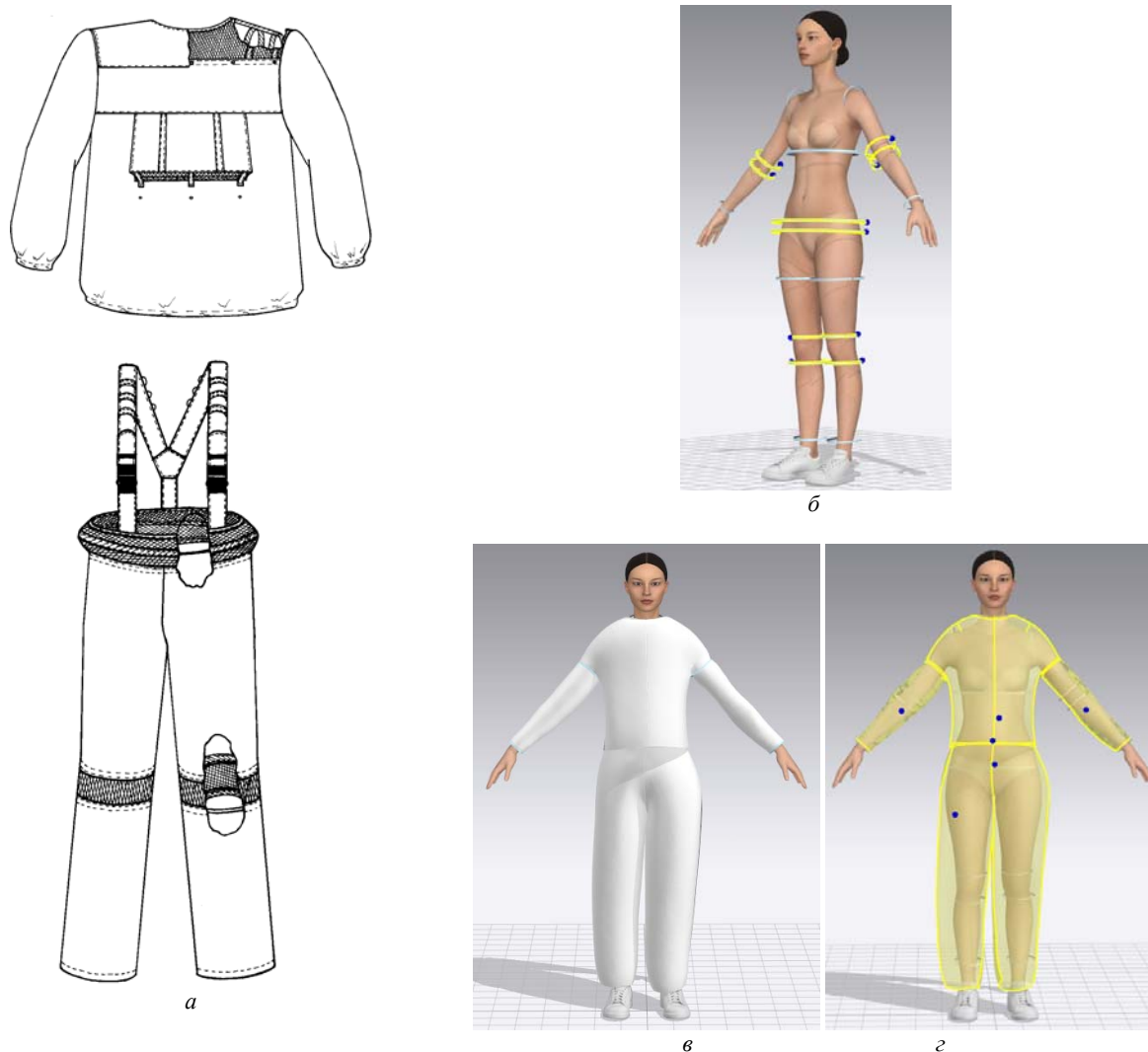


Рис. 1. Комплект вентиляруемой одежды для работников тепличных хозяйств:
 а – схема вентиляруемой одежды; б – схема каркасных колец на теле виртуального манекена;
 в, г – модели вентиляруемой одежды на виртуальном манекене

Авторский метод решения этой задачи предполагает получение модели вентилируемой одежды на виртуальном манекене. Для этого на его теле задаются каркасные элементы двух групп (рис. 1б). Каркасы на опорных поверхностях остаются неподвижными в процессе вычислительного эксперимента. Каркасы, ограничивающие сетчатые вставки (отмечены точками •), могут перемещаться относительно тела, что позволяет оценить эффективность различных вариантов размещения воздухозаборных вставок.

На этих каркасах проектируется комплект вентилируемой одежды (рис. 1в, г). В представленном случае он изготовлен из ткани с высокой эластичностью, что вызывает натяжение изделия в области груди и снижает площадь поперечного сечения воздушной прослойки на

этом участке. Это граничное условие введено в геометрическую модель с целью оценки чувствительности численной модели.

Для вычисления конвективных процессов в воздушной прослойке пододежного пространства формируется матрица точек, характеризующих поверхность одежды и тела манекена (например, рис. 2). Их логическая разность является точной геометрической моделью воздушной прослойки вентилируемой одежды. Как видно, средняя толщина стабилизированной воздушной прослойки составляет 20 мм. В области груди она снижается до 3 мм. Таким образом, в процессе виртуального проектирования получена воздушная прослойка вентилируемой одежды, которая существенно отличается от общепринятых геометрических моделей.

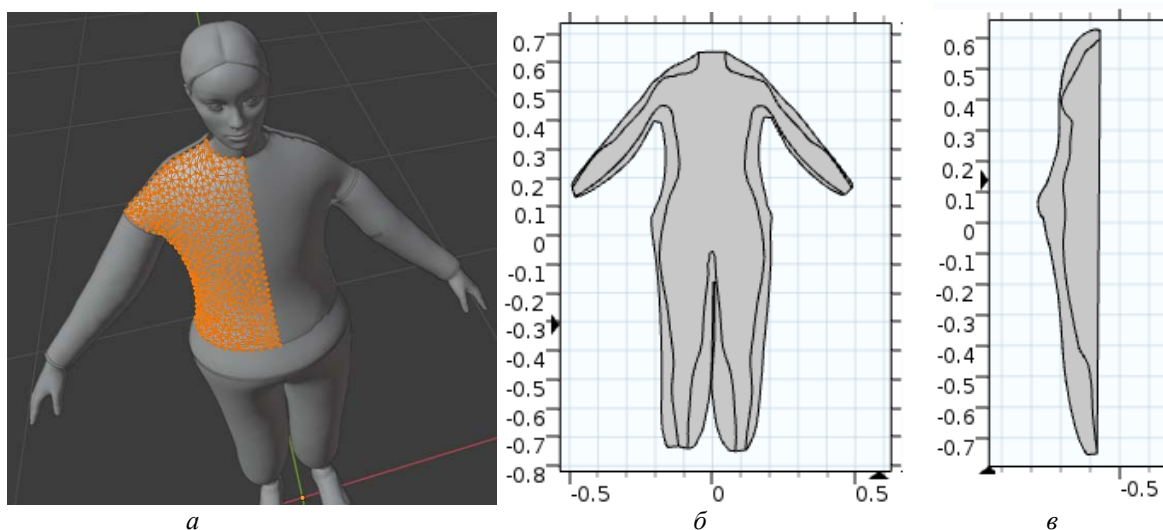


Рис. 2. Геометрия воздушной прослойки:

а – матрица координат полочки куртки; б – плоскостная проекция воздушной прослойки на виде спереди; в – плоскостная проекция воздушной прослойки на виде сбоку

Для описания конвективных процессов в воздушной прослойке составлена система уравнений энергии, движения и неразрывности:

$$\begin{cases} \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q + Q_p + Q_{vd}; \\ q = -k \nabla T; \\ \nabla[-\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F + \rho g; \\ \rho \nabla(u) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха при температуре T , кг/м³;
 C_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);
 T – температура воздуха, К;
 q – плотность теплового потока с поверхности тела человека;

Q – общее количество тепла, вносимое воздухом с температурой T в расчетный объем;
 Q_p – общее количество тепла, снимаемое с поверхности тела человека естественной конвекцией, Вт;
 Q_{vd} – общее количество тепла, уносимое из-под одежды за счет естественной конвекции;
 k – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре T , Вт/(м·К);
 I – единичный вектор в уравнении движения;
 μ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;
 u – скорость воздуха, развиваемая за счет естественной конвекции;
 F – сила, побуждающая восходящее движение воздуха (рассчитывается через разность температур и плотностей по приближению Буссинеска);
 g – вектор силы тяжести, м/с².

По этой системе на составленной расчетной геометрии решена вторая краевая задача Неймана для граничных условий второго рода.

Начальными условиями при решении выступают температуры воздуха в окружающей среде и пододежном пространстве, интенсивность метаболизма человека [3]. Граничные условия модели: температура кожи (рис. 3а)

и внутренней поверхности одежды также приняты по результатам исследований [4]. Температура сетчатых вставок принята равной температуре воздуха окружающей среды, а сами участки рассматриваются как открытые, что позволяет моделировать процессы входа воздуха под одежду и выхода в окружающую среду (рис. 3б).

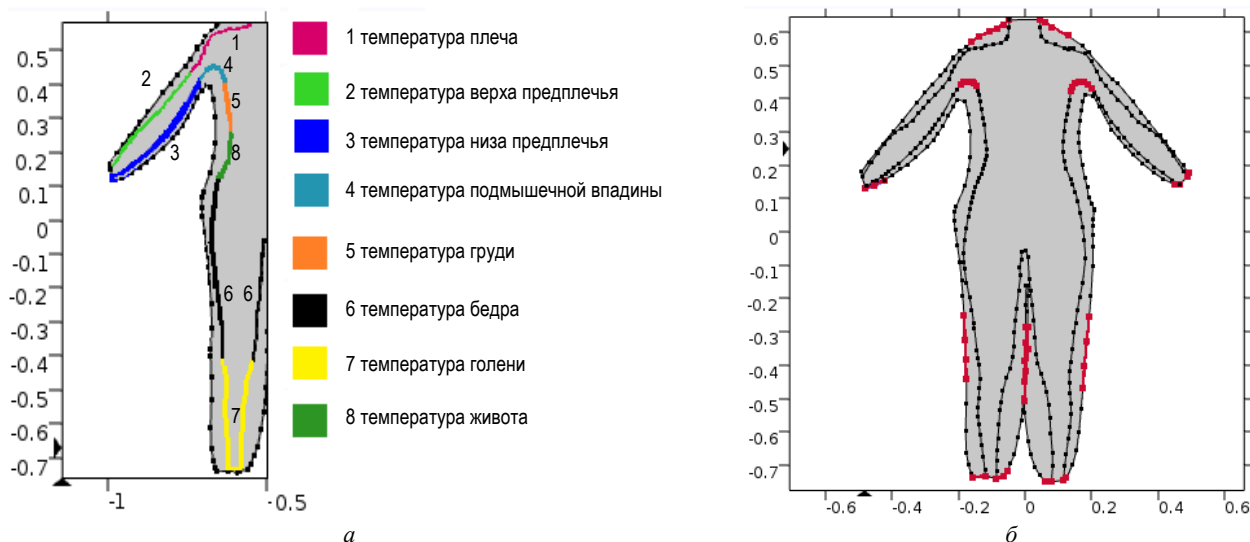


Рис. 3. Граничные условия численной модели:

а – распределения поля температур на поверхности тела человека;
б – открытые границы в системе уравнений конвективных процессов

Результатами решения выступают распределение полей температуры и скорости движения воздуха в прослойке, динамика тепловых потоков на поверхности тела человека. Рассмотрим пример расчета при температуре окружающей среды $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ и среднем уровне нагрузки на организм человека (уровень метаболизма $Q = 100\text{ Вт}$), которые характерны для работы в условиях промышленной теплицы. Результаты решения модели для этих начальных условий представлены на рис. 4.

За счет более равномерной прослойки в области брюк скорость воздушного потока достигает $0,4\text{ м/с}$ (рис. 4а), параметры воздушного потока становятся достаточно устойчивыми. В результате сужения воздушной прослойки в области груди средняя скорость воздуха в воздушной прослойке под плечевым изделием снижается до $0,15\text{ м/с}$.

Воздушные зоны с наиболее низкой температурой наблюдаются в местах забора возду-

ха под одежду. Средняя температура воздуха в области брюк близка к $29\text{ }^{\circ}\text{C}$. В верхней части комплекта, где восходящее движение затруднено, температура достигает $30,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конвективная теплоотдача с бедра и голени составляет $4,6$ и $2,7\text{ Вт}$ соответственно. Интенсивность конвективной теплоотдачи кожи в области груди и живота – $1,0$ и $1,8\text{ Вт}$ соответственно. Общая конвективная теплоотдача тела человека составляет 63 Вт , что согласуется с результатами современных исследований [1].

ВЫВОДЫ

Предложенный метод численного эксперимента позволяет исследовать форму воздушных прослоек вентилируемой одежды, а также моделировать протекающие в них процессы теплообмена. Результаты расчетов могут использоваться при проектировании вентилируемой одежды для различных климатических условий.

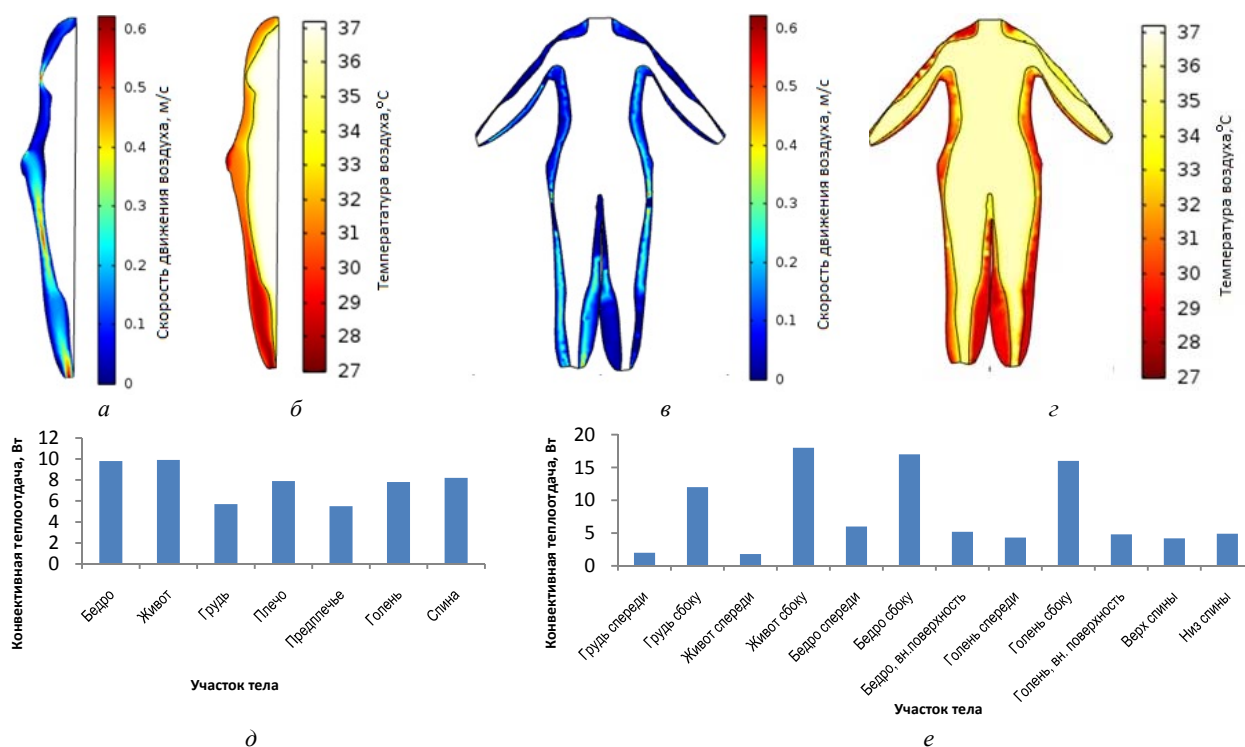


Рис. 4. Некоторые результаты численного решения модели тепломассообмена в воздушной прослойке вентилируемой одежды*:

- а, б – поля скоростей и температуры воздуха в прослойке в боковом разрезе пакета материалов;
 в, г – поля скоростей и температуры воздуха в прослойке в разрезе пакета материалов спереди;
 д, е – результаты расчетов в виде конвективной теплоотдачи с поверхности термоманекена на различных участках

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 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. Nr 157. P. 119–133.
- Deng M., Wang Yu, Li P. Effect of air gaps characteristics on thermal protective performance of firefighters' clothing: A review // *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2018. Nr 30(2). P. 246–267.
- ГОСТ Р ИСО 11079–2015. Определение холодного стресса и его интерпретация на основе показателей требуемой термоизоляции одежды и локального охлаждающего воздействия. М. : Стандартинформ, 2016. 39 с.
- Исследования влияния неравномерности воздушных прослоек в одежде на теплообмен человека с окружающей средой / М. В. Родичева, А. В. Абрамов, Е. Я. Сурженко, Д. А. Черненко // *Известия вузов. Технология легкой промышленности*. 2021. № 1(51). С. 24–30.

REFERENCES

- 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.
- Deng M., Wang Yu, Li P. Effect of air gaps characteristics on thermal protective performance of firefighters' clothing: A review. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2018;30(2):246–267.
- GOST R ISO 11079–2015. Opredelenie holodovogo stressa i ego interpretaciya na osnove pokazatelej trebuemoj termoizolyacii odezhdy i lokal'nogo ohlazhdayushchego vozdejstviya* [State Standart R ISO 11079–2015. Definition of cold stress and its interpretation based on the indicators of the required thermal insulation of clothing and local cooling effect]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 39 p.
- Rodicheva M. V., Abramov A. V., Surzhenko E. Ya., Chernenko D. A. Investigation of the influence of non-uniformity air layers in clothing on the heat exchange of a person with the environment. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti* [Proceedings of higher educational institutions. Light industry technology]. 2021;1(51):24–30. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 17.02.2022
 Принята к публикации 19.05.2022

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