

Научная статья

УДК 677.03:614.842.86

doi 10.34216/2587-6147-2021-1-51-9-14

Дмитрий Вячеславович Сорокин¹

Александр Леонидович Никифоров²

^{1, 2}Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Россия

¹element_37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7613-3315>

²anikiforoff@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7356-9300>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В МНОГОСЛОЙНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос проектирования композиционного текстильного материала на основе использования 3D текстильной матрицы для боевой одежды пожарного с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Для снижения трудовых и материальных затрат на проектирование и создания альтернативы экспериментальному подбору структуры и состава материала предложена математическая модель нестационарного теплообмена в системе «окружающая среда – композиционный текстильный материал – человек». Задача распределения температуры в любой момент времени для внешнего и внутреннего слоев представлена в виде теплопереноса в многослойной пластине. Задача распределения температуры в теплоизолирующем слое материала представлена в виде теплопереноса через ограниченный стержень в воздушной среде. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать распределение температурных полей в слоях материала при различных значениях действующего теплового потока и определить предельные параметры его теплозащитного действия.

Ключевые слова: композиционный текстильный материал, моделирование, теплообмен, математическая модель, боевая одежда пожарного, специальная защитная одежда, теплофизические показатели

Для цитирования: Сорокин Д. В., Никифоров А. Л. Математическое моделирование нестационарного теплообмена в многослойном композиционном материале // Технологии и качество. 2021. № 1(51). С. 9–14. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-1-51-9-14>.

Original article

Dmitriy V. Sorokin, Alexandr L. Nikiforov

Ivanovo Fire Rescue Academy of SFS of EMERCOM of Russia, Ivanovo, Russia

MATHEMATICAL MODELLING

OF NON-STATIONARY HEAT TRANSFER IN A MULTILAYER COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The article considers the issue of designing a composite textile material based on the use of a 3D textile matrix for firefighter combat clothing with improved performance characteristics. To reduce labour and material costs for design and create an alternative to the experimental selection of the structure and composition of the material, a mathematical model of non-stationary heat transfer in the “environment – composite material – human” system is proposed. The problem of temperature distribution at any time for the outer and inner layers is presented in the form of heat transfer in a multilayer plate. The problem of temperature distribution in the heat-insulating layer of the material is presented in the form of heat transfer through a limited rod in the air. The developed mathematical model allows calculating the distribution of temperature fields in the layers of the material at different values of the effective heat flow and determine the limit parameters of its thermal protection effect.

Keywords: composite textile material, modelling, heat transfer, mathematical model, firefighter's combat clothing, special protective clothing, thermophysical indicators

For citation: Sorokin D. V., Nikiforov A. L. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in a multilayer composite material // *Tekhnologii i kachestvo* = Technologies & Quality. 2021;1(51): 9–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-1-51-9-14>.

© Сорокин Д. В., Никифоров А. Л., 2021

В рамках выполнения научно-исследовательской работы в Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России был разработан композиционный текстильный материал для боевой одежды пожарного (БОП) с улучшенными эксплуатационными характеристиками на основе 3D текстильной матрицы [1].

Разработанный композиционный полимерный материал предназначен для изготовления специальной защитной одежды пожарного, имеющей повышенную стойкость к воздействию интенсивного теплового излучения, к кратковременному контакту с открытым пламенем и нагретыми предметами, другим опасным факторам, возникающим при тушении пожаров и эксплуатационных нагрузках [2, с. 48].

Выбор текстильной 3D-матрицы в качестве основы разработанного материала позволяет на стадии производства регулировать его теплофизические и физико-механические показатели применительно к каждому конкретному элементу БОП без дополнительных технических решений. Технология производства таких материалов позволяет подбирать их толщину, плотность и угол наклона армирующих нитей, что определяет теплофизические и механические показатели готового изделия и дает возможность минимизировать количество шовных соединений на готовом комплекте БОП.

На рис. 1 представлен опытный образец разработанного материала.

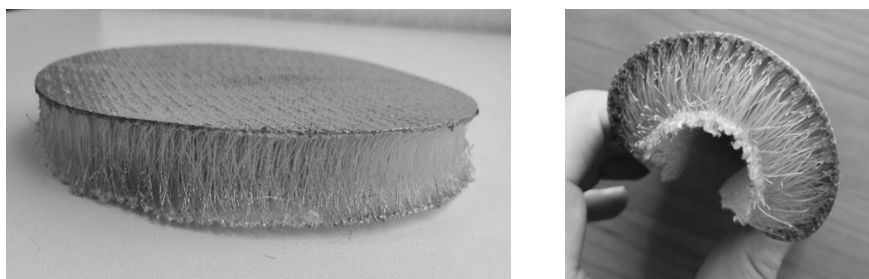


Рис. 1. Опытный образец композиционного полимерного материала

Для определения зависимости температуры в подкостюмном пространстве необходимо решить задачу теплопереноса в системе «окружающая среда – композиционный текстильный материал – человек». Поскольку толщина каждого слоя композиционного материала значительно меньше двух других линейных размеров, при решении поставленной задачи будем рассматривать облучаемую поверхность как неограниченную пластину. Так как исследуемый материал имеет сложную слоистую структуру, задача распределения температуры в любой момент времени для внешнего (слой 1) и внутрен-

Основным критерием оценки показателей теплозащитных свойств материала БОП от воздействия внешних источников тепла является температура подкостюмного пространства, или температура на внутренней поверхности пакета материалов, которая и определяет время защитного действия комплекта БОП [3, с. 18]. Следует отметить, что температура в подкостюмном пространстве зависит от двух основных показателей: от теплового потока, действующего на внешнюю поверхность материала, и от характеристик теплового сопротивления данного материала. При установившемся внешнем тепловом потоке температура в подкостюмном пространстве плавно нарастает и по истечении некоторого времени достигает критического значения, которое определяет продолжительность защитного действия БОП. Таким образом, увеличение продолжительности защитного действия БОП возможно только за счет улучшения теплоизолирующих свойств применяемых материалов. При этом экспериментальный подбор структуры и состава композиционного материала связан со значительными временными и материальными затратами при проведении испытаний по определению его соответствия нормативным требованиям. В связи с этим возникает необходимость разработки аналитических методов расчета температурного поля в композиционном материале для БОП при тепловом воздействии в ходе нормативных испытаний.

него (слой 3) слоев сводится к рассмотрению теплопереноса в многослойной пластине. Поскольку теплоизолирующий (слой 2) слой представляет собой две текстильные поверхности, объединенные между собой армирующими ортогональными мононитями в воздушной среде, то задачу распределения температуры в теплоизолирующем слое можно представить в виде теплопереноса через ограниченный стержень в воздушной среде [4, с. 404].

Схема процесса прогрева композиционного текстильного материала (далее – материал) приведена на рис. 2. На наружную поверхность

многослойной пластины воздействует тепловой поток $q_{п}$. На внутреннюю поверхность материала воздействует температура тела человека $T_{ч}$. Требуется найти распределение температуры по

толщине многослойной пластины в любой момент времени. Для каждого слоя известны численные значения коэффициента температуропроводности a_i и его толщина l_i ($i = 1, 2, 3$).

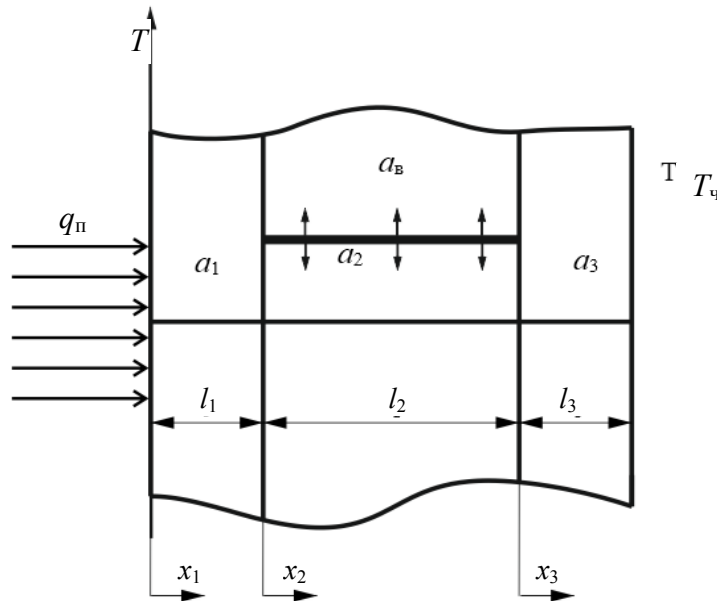


Рис. 2. Схема прогрева композиционного объемного материала

Согласно физическим представлениям о рассматриваемом процессе, математическая модель нестационарного теплопереноса для 1-го слоя материала может быть представлена в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial T_1(x_1, t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x_1, t)}{\partial x_1^2} \quad (1)$$

$(t > 0, 0 \leq x_1 \leq l_1)$,

- где T_1 – температура 1-го слоя материала, °C;
- a_1 – коэффициент температуропроводности 1-го слоя материала, m^2/c ;
- l_1 – толщина 1-го слоя материала, м;
- x_1 – пространственная координата 1-го слоя в декартовой системе, м;
- t – время, с.

Как уже отмечалось, 2-й слой состоит из армирующих ортогональных мононитей в воздушной среде. Необходимо отметить, что нагрев воздуха внутри слоя осуществляется за счет теплоотдачи ограничивающих поверхно-

стей, а также армирующих мононитей. Именно поэтому теплоперенос в слое 2 необходимо рассматривать в двух взаимосвязанных системах: «воздух» и «мононить».

Рассмотрим процесс теплопереноса через мононить в воздушной среде.

Теплообмен между боковой поверхностью мононити и воздушной средой происходит по закону Ньютона. Поскольку воздушная прослойка замкнута, то температуру воздушной среды нельзя принимать за постоянную, она также будет изменяться во времени.

Поскольку высота и ширина мононити малы по сравнению с длиной рассматриваемой пластины, а коэффициент теплопроводности значителен, то принимаем, что перепад температур по высоте и ширине мононити равен нулю. Таким образом, задача сводится к одномерной задаче, когда перепад температуры происходит только в одном направлении.

Схематическое представление процесса прогрева 2-го слоя материала приведено на рис. 3.

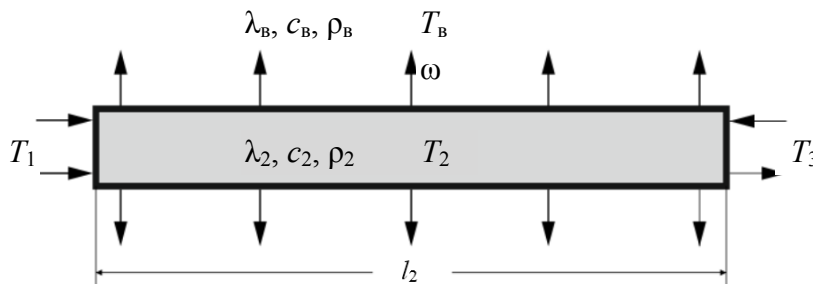


Рис. 3. Схема прогрева 2-го слоя материала

Математическую модель нестационарного теплопереноса через воздушную среду 2-го слоя материала можно представить в виде дифференциального уравнения, где теплоотдачу с боковой поверхности мононити необходимо учитывать в качестве положительного источника тепла. Процесс теплопередачи во 2-м слое будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2(x_2, t)}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x_2, t)}{\partial x_2^2} - \omega, \\ c_B \rho_B \frac{\partial T_B(x_2, t)}{\partial t} = \lambda_B \frac{\partial^2 T_B(x_2, t)}{\partial x_2^2} + \omega \end{cases} \quad (t > 0, 0 \leq x_2 \leq l_2), \quad (2)$$

где T_2 – температура мононити, °C;
 T_B – температура воздушной среды, °C;
 λ_2 – коэффициент теплопроводности мононити, Вт/(м·°C);
 c_2 – удельная теплоемкость мононити, кДж/(кг·°C);
 ρ_2 – плотность мононити, кг/м³;
 λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);
 c_B – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C);
 ρ_B – плотность воздуха, кг/м³;
 l_2 – толщина 2-го слоя материала, м;
 x_2 – пространственная координата 2-го слоя в декартовой системе, м;
 ω – количество тепла, отдаваемого единицей объема мононити в единицу времени в окружающую среду.

Математическая модель нестационарного теплопереноса для 3-го слоя материала может быть представлена в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial T_3(x_3, t)}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x_3, t)}{\partial x_3^2} \quad (t > 0, 0 \leq x_3 \leq l_3), \quad (3)$$

где T_3 – температура 3-го слоя материала, °C;
 a_3 – коэффициент температуропроводности 3-го слоя материала, м²/с;
 l_3 – толщина 3-го слоя материала, м;
 x_3 – пространственная координата 3-го слоя, м.

Положим, что в начальный момент времени температура материала по всей толщине постоянна и равна T_0 :

$$T_1(x_1, 0) = T_2(x_2, 0) = T_B(x_2, 0) = T_3(x_3, 0) = T_0. \quad (4)$$

Граничные условия:

– на левой границе (наружной поверхности) с учетом отражения части падающего потока:

$$Aq_n - \alpha_1 T_1(0, t) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x_1}, \quad (5)$$

где A – интегральная поглощательная способность 1-го слоя;

q_n – тепловой поток на левой границе материала, Вт/м²;

α_1 – коэффициент теплоотдачи с наружного слоя, Вт/(м²·°C);

λ_1 – теплопроводность 1-го слоя материала, Вт/(м·°C);

– на правой границе (внутренней поверхности) происходит процесс теплообмена с телом человека, таким образом, граничные условия третьего рода запишутся как

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(l_3, t)}{\partial x_3} = \alpha_3 (T_3(l_3, t) - T_ч), \quad (6)$$

где λ_3 – теплопроводность 3-го слоя материала, Вт/(м·°C);

α_3 – коэффициент теплоотдачи с 3-го слоя, Вт/(м²·°C);

$T_ч$ – температура тела человека, °C.

Учитывая равенство тепловых потоков и температур на границах сопрягаемых слоев, граничные условия четвертого рода запишутся:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(l_1, t)}{\partial x_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial x_2}, \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(l_1, t)}{\partial x_1} = \lambda_B \frac{\partial T_B(0, t)}{\partial x_2}, \quad (8)$$

$$T_1(l_1, t) = T_B(0, t), \quad (9)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(l_2, t)}{\partial x_2} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(0, t)}{\partial x_3}, \quad (10)$$

$$T_2(l_2, t) = T_3(0, t). \quad (11)$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_B(l_2, t)}{\partial x_2} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(0, t)}{\partial x_3}, \quad (12)$$

$$T_B(l_2, t) = T_3(0, t). \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) вместе с начальными условиями (4) и граничными условиями (5)–(13) является мо-

делью нестационарного теплопереноса в материале в условиях пожара.

Поле температур рассчитывалось с применением явной конечно-разностной схемы с использованием неравномерной сетки [5, с. 11].

Дифференциальные уравнения теплопереноса (1), (2), (3) в конечно-разностной схеме примут вид:

$$T_{1i}^{k+1} = \frac{a_1 \tau (T_{1i-1}^k - T_{1i}^k)}{h_1^2} + T_{1i}^k \quad (i = 1, \dots, n_1); \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{2i}^{k+1} &= \frac{a_2 \tau (T_{2i-1}^k - T_{2i}^k)}{h_2^2} - \\ &\quad - \frac{2\alpha_2 \tau (T_{2i}^k - T_{Bi}^k)}{c_2 \rho_2 R} + T_{2i}^k, \\ T_{Bi}^{k+1} &= \frac{a_B \tau (T_{Bi-1}^k - T_{Bi}^k)}{h_2^2} + \\ &\quad + \frac{2\alpha_2 \tau (T_{2i}^k - T_{Bi}^k)}{c_2 \rho_2 R} + T_{Bi}^k \end{aligned} \right. \quad (i = 1, \dots, n_2); \quad (15)$$

$$T_{3i}^{k+1} = \frac{a_3 \tau (T_{3i-1}^k - T_{3i}^k)}{h_3^2} + T_{3i}^k \quad (i = 1, \dots, n_3), \quad (16)$$

где a_2 – коэффициент температуропроводности мононити 2-го слоя материала, м²/с;

a_B – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с;
 α_2 – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С);
 R – радиус сечения мононити, м;
 τ – шаг по времени, с.

Алгоритм математического расчета процесса теплопередачи в слоях композиционного текстильного материала реализован в виде программы для ПЭВМ.

Разработанная на основе математической модели программа позволяет получить распределение температуры по слоям композиционного текстильного материала для БОП в процессе практически любого теплового воздействия и провести всесторонний анализ процесса теплопередачи (рис. 4).

ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель нестационарного теплообмена в многослойном композиционном материале.

2. Использование результатов расчетов, выполненных с помощью предлагаемой математической модели, позволяет осуществлять подбор состава и толщины слоев, количества и толщины армирующих нитей для производства материалов с требуемыми свойствами и заменить их экспериментальный подбор при проектировании защитной одежды.

3. Внедрение предлагаемого метода оптимизации проектирования теплоизолирующих материалов позволит существенно снизить материальные, временные и трудовые затраты на данный процесс.

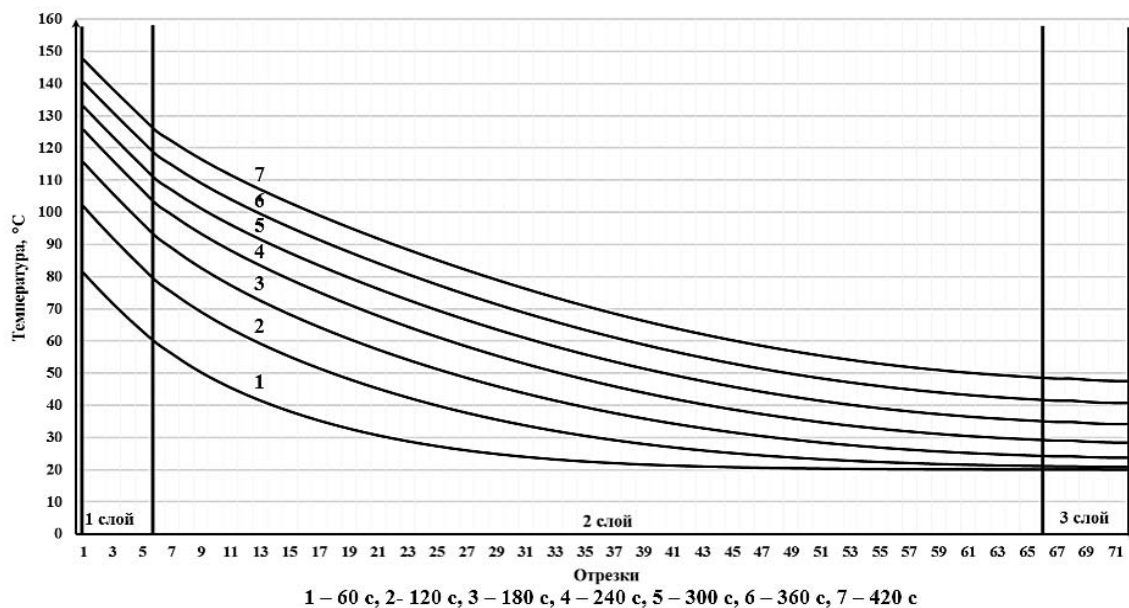


Рис. 4. График распределения температуры в материале

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полезная модель РФ № 191460. Объемный тканый огне-теплозащитный материал / Сорокин Д. В., Никифоров А. Л., Циркина О. Г., Ульява С. Н., Шарабанова И. Ю. ; заявитель и правообладатель Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Оpubл. 06.05.2019, Бюл. № 22. 3 с.
2. Композиционный полимерный материал для боевой одежды пожарного с улучшенными эксплуатационными характеристиками / Д. В. Сорокин, А. Л. Никифоров, О. Г. Циркина, С. Н. Ульява // SMARTEX – 2019 : сборник материалов XXII Международного научно-практического форума. Иваново : ИВГПУ. 2019. С. 47–51.
3. ГОСТ Р 53264–2009. Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2009. 37 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967. 600 с.
5. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

REFERENCES

1. Poleznaya model' RF № 191460. Ob'emnyj tkanyj ogne-teplozashchitnyj material / Sorokin D. V., Nikiforov A. L., Cirкина O. G., Ul'eva S. N., SHarabanova I. Yu. ; zayavitel' i pravoobladatel' Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii. Opubl. 06.05.2019, Byul. № 22. 3 s.
2. Kompozicionnyj polimernyj material dlya boevoj odezhdy pozharnogo s uluchshennymi ekspluatacionnymi harakteristikami / D. V. Sorokin, A. L. Nikiforov, O. G. Cirкина, S. N. Ul'eva // SMARTEX – 2019 : sbornik materialov XXII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma. – Ivanovo : IVGPU. 2019. S. 47–51.
3. GOST R 53264–2009. Tekhnika pozharnaya. Special'naya zashchitnaya odezhdа pozharnogo. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. M. : Standartinform, 2009. 37 s.
4. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti. M. : Vyssh. shk., 1967. 600 s.
5. Kuznecov G. V., Sheremet M. A. Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti : ucheb. posobie. Tomsk : Izd-vo TPU, 2007. 172 s.

Статья поступила в редакцию 26.02.2021
Принята к публикации 11.03.2021