УДК 519.63 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-41-48

Разработка и реализация математической модели теплового воздействия на ограждающие конструкции, покрытые огнезащитным композитным материалом

А.С. Устинов[a], С.С. Рогозин[b], Е.А. Питухин[c]

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия
[a]anton-ustinov@psu.karelia.ru, [b]ppexa@mail.ru, [c]Eugene@petrsu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5254-0549, [b]https://orcid.org/0000-0002-8602-8930,
[c]https://orcid.org/0000-0002-7021-2995
Статья поступила 5.05.2018, принята 16.06.2018

Статья посвящена математическому моделированию воздействия высоких температур на композитный материал при использовании его в качестве покрытия для защитных ограждений, например, кабин тракторов для тушения лесных пожаров. Композитный материал включает наполнитель, связующее жидкое натриевое стекло, и отвердитель — кремнефтористый натрий. В качестве наполнителя используется графит размерами несколько микрометров. Тепловое воздействие носит пространственный (трехмерный) характер. Рассмотрены теплоотдача при ламинарном движении горячих газов около поверхности композитного материала, передача теплоты за счет излучения, а также теплопроводность внутри слоя композитного материала и ограждения кабины. Для описания рассматриваемых процессов использованы дифференциальные уравнения в частных производных, а именно уравнения Навье – Стокса, уравнение энергии, уравнение переноса излучения в прозрачной среде и уравнение теплопроводности для твердых тел. Данная система уравнений дополнена начальными и граничными условиями. Для численного анализа модели используется метод конечных объемов. Расчеты проводились в свободно распространяемом программном продукте OpenFOAM. В результате вычислительного эксперимента получены поля температур воздушной среды и исследуемого композитного материала. Математическая модель позволяет прогнозировать нестационарное распределение температуры в слое композитного материала и на стенках кабины, рассчитать время достижения предельного состояния огнезащитного материала, а также показать зависимость времени достижения этого состояния от толщины нанесенного слоя. Микрокомпозиция обеспечивает способность удерживать неизменными состав и структуру теплоизоляционного покрытия под воздействием высоких температур, сохранять несущие и ограждающие функции. Полученные результаты позволяют оценить возможность практического использования композитного материала для тепловой защиты кабин.

Ключевые слова: математическая модель; композитный материал; тепловое воздействие; тепловая защита.

Development and implementation of a mathematical model of the thermal effect on enclosing structures covered with fire-retardant composite material

A.S. Ustinov[a], S.S. Rogozin[b], E.A. Pitukhin[c]

Petrozavodsk State University; 33, Lenin Per., Petrozavodsk, Russia
[a]anton-ustinov@psu.karelia.ru, [b]ppexa@mail.ru, [c]Eugene@petrsu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5254-0549, [b]https://orcid.org/0000-0002-8602-8930,
[c]https://orcid.org/0000-0002-7021-2995
Received 5.05.2018, accepted 16.06.2018

The article is devoted to the mathematical modeling of high temperature impact on the composite material when it is used as a coating for protective barriers, for example, tractor cabs for forest fire extinguishing. The composite material includes a filler, a binder water sodium glass and a hardener silicon sodium. As a filler, graphite with dimensions of several micrometers is used. The thermal effect is spatial (three-dimensional). The heat transfer at laminar motion of hot gases near the surface of the composite material, heat transfer due to radiation, as well as thermal conductivity inside the layer of composite material and the enclosure of the cabin are considered. Differential equations in partial derivatives, namely, the Navier-Stokes equations, the energy equation, the radiation transfer equation in a transparent medium, and the heat equation for solids are used to describe the processes under consideration. This system of equations is supplemented by initial and boundary conditions. The finite volume method is used for numerical analysis of the model. The calculations were carried out in a free software product OpenFOAM. As a result of the computational experiment, the fields of air temperature and the studied composite material are obtained. The mathematical model makes it possible to predict the unsteady temperature distribution in the layer of composite material and on the walls of the cabin, to calculate the time of reaching the limit state of the fire-retardant material, and also to show the dependence of the time of reaching this state on the thickness of the deposited layer.

The microcomposition provides the ability to keep unchanged the composition and structure of the thermal insulation coating under the influence of high temperatures, to maintain the bearing and enclosing functions. The results allow to evaluate the possibility of practical use of composite material for thermal protection of cabins.

Keywords: mathematical model; composite material; thermal effect; thermal protection.

Введение

Лесные пожары, возникающие на территории Российской Федерации, ежегодно охватывают сотни тысяч га леса и приносят многомиллионные убытки. Одним из эффективных средств борьбы с лесными пожарами является использование специализированных пожарных тракторов, выпускаемых ОАО «Онежский тракторный завод» на базе гусеничных лесных машин «Онежец-300» и «Онежец-400». Защитные устройства операторов кабины и другие элементы конструкций таких машин во время тушения огня воспринимают повышенные тепловые нагрузки. Традиционные материалы, из которых они изготовлены, быстро нагреваются и недостаточно эффективно противостоят таким экстремальным режимам. Вследствие этого предполагается замена традиционных лакокрасочных покрытий защитных устройств новыми композиционными материалами, существенно улучшающими эргономические показатели кабин во время борьбы с огнем. Таким образом, встает задача математического моделирования теплового воздействия на новые композиционные материалы, решение которой позволит существенно улучшить защитные свойства кабин и повысить эффективность борьбы с лесными пожарами.

Современный этап развития техники, инженерных средств и устройств характеризуется использованием математического моделирования задач конвекции и теплопередачи. В моделировании нашли применение модели с дифференциальными уравнениями. Их точное или приближенное решение находится с использованием аналитических и численных методов [1; 2].

Аналитические методы решения краевых задач теплообмена и нестационарной теплопроводности с граничными условиями, методы интегральных преобразований рассматриваются во многих работах. Для решения поставленной задачи авторами использовались комбинации традиционных и приближенных методов решения задач теплопроводности и гидродинамики [3].

Существует опыт разработки физических и химических основ формирования композиционных материалов из оксидных форм магния и алюминия и других глиноземсодержащих компонентов [5], с полимерной матрицей и твердых растворов [6], сланцевых наполнителей, внутренних и внешних связующих продуктов [7]. Известны композиты, полученные на основе полипропилена и технического углерода [8], также рассматривается мировой опыт применения технологий на основе углеродных волокон [9–14].

Одним из путей решения данного вопроса является разработка технологии приготовления и применения композитных материалов. Авторами проводились исследования теплозащитных свойств, огнестойкости и термостойкости композитного материала на основе жидкого стекла с наполнителем — графитом микронных размеров [15–17].

Использование математического моделирования теплового воздействия на ограждающие конструкции, покрытые огнезащитным материалом, позволяет рассчитать теплоэнергетические параметры огнестойких и термостойких материалов и покрытий технических устройств для их пожарной безопасности.

Целью работы является построение и решение математической модели, позволяющей рассчитать тепловой режим эффективных огнестойких и термостойких материалов, устойчивых к воздействию высоких температур.

Уравнения теплообмена. Процессы, происходящие при эксплуатации инженерного объекта — как тепловые, так и подвижности воздуха, — описываются законами сохранения энергии и массы. Тепловое взаимодействие между поверхностью ограждения технического устройства и окружающей средой может носить нестационарный характер. Зададим тепловой поток q, *Вт/м²*, для элемента поверхности с учетом конвективного $q_{\text{К}}$, *Вт/м²*, и лучистого теплообмена $q_{\text{Л}}$, *Вт/м²*:

$$q = q_{\text{К}} + q_{\text{Л}} \, . \tag{1}$$

Уравнение движения описывает изменение скорости воздуха во времени и в пространстве [18]. В подвижной среде несжимаемой жидкости рассматривается элементарный объем с координатами (dx, dy, dz). Массовые силы, действующие на элементарный объем, характеризуются вектором $\vec{F} = \vec{g}$, м/с², где $\vec{g}$ — ускорение свободного падения. Поверхностные силы определяются равнодействующей силой давления p, Па, а также силами трения с учетом динамического коэффициента вязкости μ, *(Н·с)/м²*:

$$\rho \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \rho\vec{g} - \nabla p + \mu\Delta\vec{w} \, . \tag{2}$$

Здесь ρ, *кг/м³*, — плотность, $\vec{w}$; м/с — вектор скорости; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z} \right)$ — оператор Набла; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа; τ — время, *с*.

Уравнение энергии описывает температурное поле в движущейся среде. Через грани элементарного объема теплота переносится теплопроводностью и конвекцией:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \nabla \cdot (wt) = a\Delta t + \frac{q_v}{\rho c_p} \, , \tag{3}$$

где a — коэффициент температуропроводности, *м²/с*, c_p — удельная изобарная теплоемкость, *Дж/(кг·К)*. В рассматриваемом элементарном объеме теплота может выделяться внутренними источниками q_v, *Вт/м²*, за счет энергии, внешней по отношению к подвижной среде. В левой части уравнения представлена производная от температуры t, *°С*, по времени τ, *с*.

Уравнение теплопроводности в дифференциальной форме описывает температурное поле в твердом теле:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\Delta t + \frac{q_v}{\rho c_p}. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности определяется условием непрерывности изменения параметров потока по координатам и времени. Для несжимаемой жидкости оно имеет вид:

$$\nabla \cdot \vec{w} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) достаточно хорошо известны и широко применяются [1; 18].

Постановка задачи. Интерес к композитным материалам обоснован тем, что они обладают высокой механической прочностью, пожаро- и экологической безопасностью. Рассматривается тепловое воздействие на ограждающую конструкцию кабины транспортного средства, покрытую огнезащитным композитным материалом с целью повышения огнестойкости и термостойкости самой конструкции кабины в случае воздействия высоких температур с точки зрения эргономики и пожарной безопасности [19; 20]. Схема теплового воздействия изображена на рис. 1. Тепловое воздействие носит пространственный (трехмерный) характер, что показано на рис. 2. Перенос теплоты от источника описывается системой уравнений (1)–(5). Дополним данную систему начальными и граничными условиями.

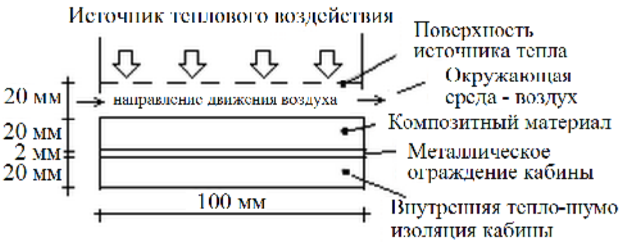

Рис. 1. Расчетная схема

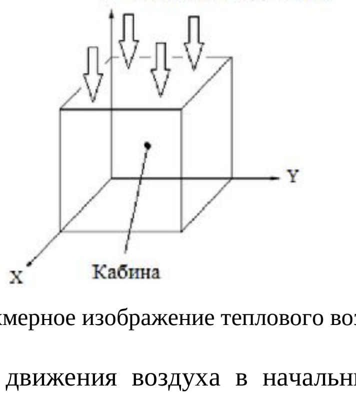

Рис. 2. Трехмерное изображение теплового воздействия

Скорость движения воздуха в начальный момент времени по всему объему задаем [20] $\vec{w}_0 = (0; 0{,}1; 0)$. На поверхности соприкосновения воздуха с композитным материалом скорость равна 0 м/с. Плотность воздуха вычисляется по закону Менделеева – Клапейрона с началом отсчета от 20 °С при атмосферном давлении. При этом начальная температура по всему объему воздуха и всей термодинамической системы, которая включает в себя непосредственно композитный материал, металлическое ограждение и теплошумоизоляцию, также принимается равной 20 °С. Принимаем: атмосферное давление по всему объему $p_0 = 10^5$ Па; динамический коэффициент вязкости для воздуха [21] $\mu = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ (Н·с)/м²; удельная теплоемкость $c_p = 1$ кДж/(кг·К); теплоемкость композитного материала $c_p = 1{,}2$ кДж/(кг·К); плотность композитного материала $\rho_к = 1172$ кг/м³; теплопроводность композитного материала $\lambda_к = 1$, Вт/(м·К) [15]. Толщина композитного материала составляет 20 мм [17].

В рассматриваемой задаче теплота внутренними источниками не выделяется. Таким образом, в системе уравнений (1)–(5) принимаем $q_v = 0$.

Систему уравнений (1)–(5) дополним граничными условиями. На неподвижной твердой поверхности для скорости используются условия прилипания: $\vec{w} = 0$. На поверхности источника тепла, а также на входе воздуха и по боковым граням воздушной среды (рис. 1) задаются условия $\vec{w} = (0; 0{,}1; 0)$. При этом для скорости воздуха на выходе задается граничное условие $\frac{\partial \vec{w}}{\partial y} = 0$.

Граничные условия для давления следуют из условия непротекания и имеют вид: $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$; $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$. При этом давление воздуха на входе и выходе все время поддерживается одинаковым $p_y = p_0$.

Граничные условия для температуры на поверхности источника тепла, а также на поверхности воздуха на входе во время проведения численного эксперимента характеризуются следующей зависимостью [20]:

$$t - t_0 = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1), \quad (6)$$

где t, *°С* — температура на поверхности источника тепла, соответствующая времени τ,с; t_0, *°С* — температура на поверхности источника тепла до начала теплового воздействия, равная температуре окружающей среды 20 °С. Для всех других поверхностей, в том числе твердых элементов конструкции, $\frac{\partial t}{\partial n} = 0$, где n — нормаль к поверхности.

Передача теплоты от воздуха к композитному материалу определяются граничными условиями III рода с учетом конвективного и радиационного тепловых потоков.

Вычислительный алгоритм. Для численного решения системы уравнений (1)–(5) используется метод конечных объемов [1]. Вводится прямоугольная расчетная сетка элементарных объемов с шагом по направлениям $h_x = 10$ мм, $h_y = 10$ мм, $h_z = 2$ м. Расчетная сетка показана на рис. 3. Все величины вычисляются в центрах элементарных объемов расчетной сетки. Граница пространственной области располагается в половине шага от центра элементарного объема расчетной сетки по всем направлениям. Система уравнений (1)–(5) переводится в интегральную форму по области контрольного объема. После перевода производных и других подынтегральных выражений получаем уравнения для элементарного объема, затем составляется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Для элементарного объема C проекция на ось Ox дифференциального уравнения движения в интегральной форме будет иметь вид:

$$\int_{V_C} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho w_x) dV + \int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w} w_x) dV =$$

$$= \int_{V_C} \frac{\partial p}{\partial x} dV + \int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \nu \nabla w_x) dV + \int_{V_C} \rho g_x dV$$

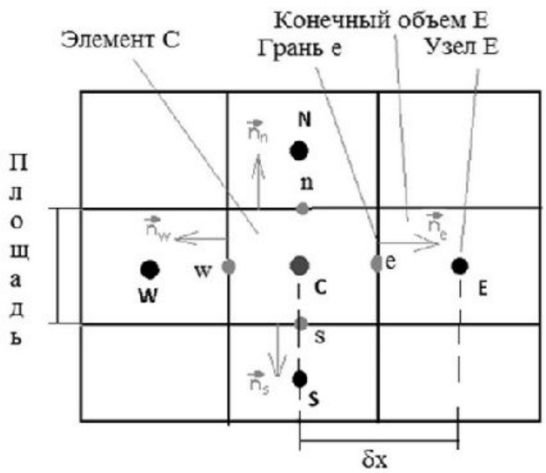

Рис. 3. Расчетная сетка

Все слагаемые переводятся в дискретную форму:

$$\int_{V_C} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho w_x) dV = \frac{w_x^c(\tau_i) - w_x^c(\tau_{i-1})}{\nabla \tau} \cdot \rho \cdot V_C \quad .$$

Здесь $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1} = 0{,}005$, c — шаг по времени при заданном i:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w} w_x) dV = \int_{\partial V_C} \left(\rho \vec{w} w_x \cdot \vec{n}\right) dS =$$

$$= \sum_{f \in nb} \rho \cdot \vec{w} \cdot S_f \cdot \vec{n}_f \cdot w_x^f = \sum_{f \in nb} \dot{m}_f \cdot w_x^f \quad ,$$

где ∂V_C — граница конечного объема C; nb — множество граней конечного объема; $f = 1...6$ — индекс множества nb; S_f — площадь грани f; $\vec{n}_f$ — вектор нормали к грани f; $\dot{m}_f$ — массовый поток через грань f:

$$\int_{V_C} \frac{\partial p}{\partial x} dV = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \cdot V_C$$

или:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \nu \nabla w_x) dS = \int_{\partial V_C} \left(\rho \nu \nabla w_x \cdot \vec{n}_f\right) dS =$$

$$= \sum_{f \in nb} \rho \cdot \vec{w} \cdot S_f \cdot \vec{n}_f \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial x}; \frac{\partial w_x}{\partial y}; \frac{\partial w_x}{\partial z}\right)_f \quad .$$

Все производные аппроксимируются центральными разностями.

Также в нашем случае вектор $\vec{g} = 0$. Таким образом, $\int_{V_C} \rho g_x dV = 0$.

Аналогичным образом интегрируются уравнения движения в проекции осей Oy и Oz.

Для уравнения неразрывности интегральная форма:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w}) dV = 0 \quad .$$

В дискретной форме:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w}) dV = \int_{\partial V_C} \left(\rho \vec{w} \cdot \vec{n}\right) dS = \sum_{f \in nb} \rho \cdot \vec{w} \cdot S_f \cdot \vec{n}_f = \sum_{f \in nb} \dot{m}_f \quad .$$

Таким образом, $\sum_{f \in nb} \dot{m}_f = 0$.

Интегральная форма уравнения энергии (3) для воздуха с учетом энтальпии H, *Дж/ГК*, при коэффициенте температуропроводности α, *м²/с*, будет:

$$\int_{V_C} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho H) dV + \int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w} H) dV = \int_{V_C} \nabla \cdot (\alpha \nabla H) dV \quad .$$

В дискретной форме:

$$\int_{V_C} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho H) dV = \frac{H^C(\tau_i) - H^C(\tau_{i-1})}{\nabla \tau} \cdot \rho \cdot V_C$$

или:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\rho \vec{w} H) dV = \int_{\partial V_C} \left(\rho \vec{w} H \cdot \vec{n}\right) dS =$$

$$= \sum_{f \in nb} \rho \cdot \vec{w}_f \cdot n_f \cdot S_f \cdot H^f = \sum_{f \in nb} \dot{m}_f \cdot H_f \quad ,$$

тогда:

$$\int_{V_C} \nabla \cdot (\alpha \nabla H) dV = \int_{\partial V_C} \left(\alpha \nabla H \cdot \vec{n}\right) dS =$$

$$= \sum_{f \in nb} \alpha \cdot S_f \cdot \vec{n}_f \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial x}; \frac{\partial H}{\partial y}; \frac{\partial H}{\partial z}\right)_f \quad .$$

Все производные также аппроксимируются центральными разностями.

Интегральная форма уравнения энергии (3) для твердого тела при коэффициенте температуропроводности α', *м²/с*:

$$\int_{V_C} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho H) dV = \int_{V_C} \nabla \cdot (\alpha' \nabla H) dV \, .$$

Дискретизация поводится аналогично уравнению энергии для воздуха.

Уравнение излучения. В рамках данной работы также рассматривается процесс лучистого теплообмена. Источник излучения совпадает с поверхностью теплового воздействия. Лучистый перенос для данной задачи сопровождается одновременно теплопроводностью и конвекцией. При этом воздух является прозрачной средой для излучения. Для решения задачи используется конечно объемный метод дискретных ординат. В данном методе уравнение переноса излучения решается для дискретного числа конечных телесных углов. Данный метод является консервативным и приводит к тепловому балансу для грубой дискретизации. Точность может быть увеличена за счет более мелкой дискретизации. Также эта модель является наиболее полной, учитываются полупрозрачные и прозрачные среды, отражаемость поверхности и зависимость от длины волны. Уравнение переноса тепла за счет излучения будет выглядеть следующим образом:

$$\nabla \cdot (\vec{d}_{AVE} I) = 0$$

или:

$$d_{AVEx} \frac{\partial I}{\partial x} + d_{AVEy} \frac{\partial I}{\partial y} + d_{AVEz} \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad , \qquad (7)$$

где I , *Вт/м²* — интенсивность излучения для заданного направления; d_{AVE} — среднее направление внутри телесного угла.

Данное уравнение решается методом конечных объемов.

Граничные условия для уравнения переноса излучения задаются следующим образом. Рассматриваются два направления излучения, «вниз» и «вверх» (рис. 1):

– направление «вниз»: от поверхности источника тепла к границе «воздух – композитный материал»;

– направление «вверх»: от границы «воздух – композитный материал» к поверхности источника тепла.

Для тех граней элементарных объемов, которые составляют границу «поверхность источника тепла», задается условие 1-го рода: $I = \frac{1}{\pi} \cdot e_1 \cdot \sigma \cdot T^4$. Здесь π — число Пи; $e_1 = 1$, *м⁻¹* — коэффициент излучения на грани; $\sigma = 5{,}67$, *Вт/(м²·К⁴)* — постоянная Стефана – Больцмана; T , *К* — температура на грани (уравнение (6)). Для граней элементарных объемов, которые составляют другие границы, выполняется условие 2-го рода $\frac{\partial I}{\partial n} = 0$, где n — нормаль.

Для граней элементарных объемов, которые составляют границу «поверхность воздуха – композитный материал», выполняется условие 1-го рода: $I_k = \frac{1}{\pi} \cdot \left((1 - e_2) \cdot I_{\tau-1} + e_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \right)$,

где $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1} = 0{,}005$, *с* — шаг по времени при заданном i. Здесь слагаемое $(1 - e_2) \cdot I_{\tau-1}$ показывает составляющую отражения лучистого теплообмена, а слагаемое $e_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4$ — составляющую излучения при температуре на поверхности грани T_1, *К*. Задается $e_2 = 0{,}289$, *м⁻¹* — коэффициент излучения композитного материала. На остальных гранях элементарных объемов, которые составляют другие границы, выполняется условие 2-го рода $\frac{\partial I}{\partial n} = 0$, где n — нормаль.

В дальнейшем для каждого направления получаем СЛАУ, которая состоит из дискретизированных уравнений излучения всех конечных объемов воздуха.

Для элементарного объема C (рис. 3) получим:

$$\int_{Vc} \nabla \cdot (\vec{d}_{AVE} I) dV = 0 \ .$$

Рассмотрим левую часть уравнения:

$$\int_{Vc} \nabla \cdot (\vec{d}_{AVE} I) dV = \int_{\partial Vc} \left(\vec{d}_{AVE} I \cdot \vec{n} \right) dS$$
$$= \sum_{n \in nb} \vec{d}_{AVE} \cdot S_n \cdot \vec{n}_n \cdot I_n = 0$$

Здесь S_n — площадь грани n; n_n — нормаль к грани n; nb — множество граней конечного объема C. Интенсивность излучения I_n получается путем интерполяции значений в узлах соседних ячеек.

Аналогичным образом составляются уравнения для всех конечных объемов воздуха, в результате чего получается СЛАУ для заданного направления излучения.

Численный эксперимент. В дальнейшем производится численное решение системы уравнений (1)–(7). В рамках данной работы численное решение осуществляется на свободно распространенной платформе для численного моделирования задач механики сплошных сред OpenFOAM. Данный продукт написан на языке программирования С++ под операционные системы Linux и UNIX.

Сущность эксперимента заключается в определении времени от начала теплового воздействия до достижения температур, которые характеризуют наступление предельного состояния конструкции [20]. Предельное состояние по потере теплоизолирующей способности характеризуется повышением температуры на необогреваемой поверхности — поверхности соприкосновения композитного материала с металлическим ограждением более 220 °С, независимо от температуры материала до испытания.

В результате вычислительного эксперимента получены поля температур воздушной среды и исследуемого композитного материала (рис. 4).

На рис. 4 т. *a* располагается на поверхности нагрева, т. *b* — на поверхности композитного материала, т. *c* — на поверхности соприкосновения композитного материала и металлического ограждения кабины и точка *d* — на поверхности контакта металлического ограждения кабины с теплошумоизоляцией.

Так же получены температуры на различных поверхностях за нормативный интервал времени, равный 900 с [20]. Графики температур приведены на рис. 5.

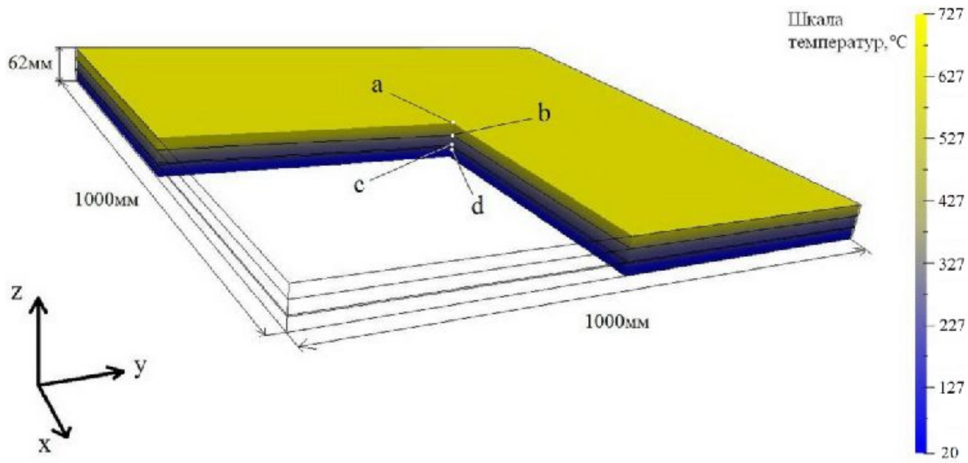

Рис. 4. Поля температур

Расчеты показали, что температура на поверхности теплового воздействия, рассчитанная по уравнению (6), за требуемый интервал времени, 900 с, достигает 738 °C. Температура на внешней по отношению к конструкции кабины поверхности композитного материала со стороны соприкосновения с воздухом соответствует 391 °C. При этом температура 391 °C не является разрушающей для самого композитного материала [17]. В работе [17] авторами было установлено, что разрушение композитного материала начинается при 900 °C. Температура на поверхности соприкосновения «композитный материал – металлическое ограждение конструкции» равна 211 °C.

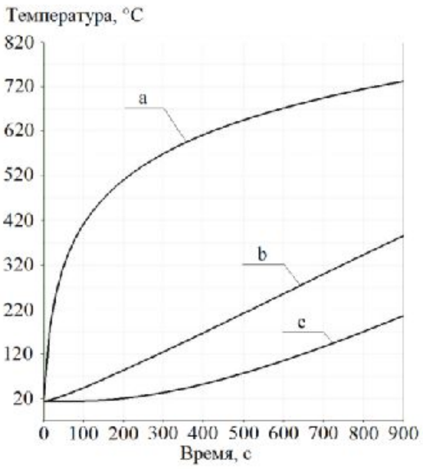

Рис. 5. Графики температуры на различных поверхностях за нормативный интервал времени: *a* — температура на поверхности источника тепла от времени; *b* — температура на поверхности соприкосновения «воздух – композитный материал» от времени; *c* — температура на поверхности соприкосновения «композитный материал – металлическое ограждение конструкции кабины» от времени

Таким образом, в рамках реализации модели установлено, что температура на необогреваемой поверхности композитного материала за рассматриваемый промежуток времени, 900 с, не достигла предельного значения, которое составляет 220 °C.

В результате моделирования получена временная зависимость (рис. 6). Зависимость показывает, за какой промежуток времени на металлической поверхности ограждения кабины будет достигнуто значение предельной температуры в случае, если толщина нанесенного на нее композитного материала будет различной. При этом условия теплового воздействия сохраняются. Зависимость носит линейный характер. Время возрастает и к окончанию численного эксперимента достигает значения 930 с при толщине слоя композитного материала 20 мм, что соответствует требованиям нормативных документов [20]. Приведенный график может использоваться для количественной оценки временной зависимости тепловой защиты конструкции кабины.

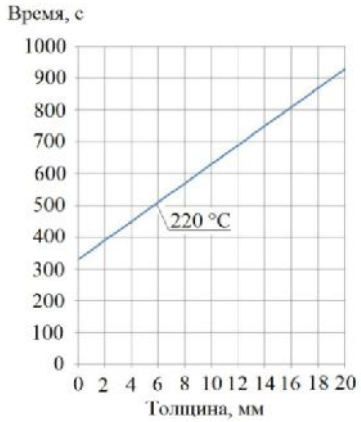

Рис. 6. Зависимость времени нагрева композитного материала до температуры 220 °C от его толщины

Для более полной оценки возможности практического использования композитного материала для тепловой защиты кабин транспортных средств приводится сравнительный анализ времени достижения температуры самовоспламенения теплошумоизоляционного материала, которым облицовано металлическое ограждение кабины изнутри, с использованием композитного материала и без него. На рис. 7 показано, что время достижения температуры самовоспламенения теплошумоизоляционного материала, которая равна 287 °C [21], при нанесении композитного материала толщиной 20 мм составляет 1 104 с. При этом без использования композитного материала время будет равным 381 с.

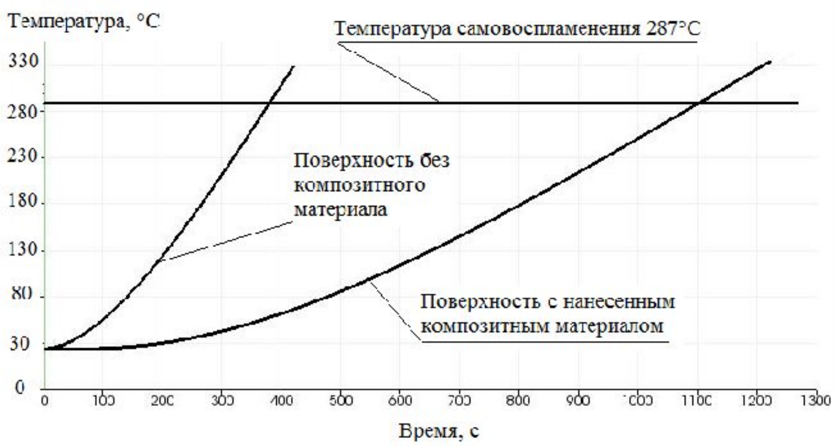

Рис. 7. График зависимости времени достижения температуры самовоспламенения теплошумоизоляционного материала кабины транспортного средства

Заключение

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования воздействия высоких температур на композитный материал при использовании данного материала в качестве покрытия для тепловой защиты ограждения кабин. При построении модели учитывались теплоотдача при ламинарном движении горячих газов около поверхности композитного материала, передача теплоты за счет излучения, а также теплопроводность внутри слоя композитного материала и ограждения кабины. Для описания рассматриваемых процессов использованы дифференциальные уравнения в частных производных, а именно уравнения Навье – Стокса, уравнение энергии, уравнение переноса излучения в прозрачной среде и теплопроводности для твердых тел. Для численного решения модели использован метод конечных объемов. Расчеты проводились в свободно распространяемом программном продукте OpenFOAM. Математическая модель позволяет прогнозировать нестационарное распределение температуры в слое композитного материала и на стенках ограждения кабины, рассчитать время достижения предельного состояния огнезащитного материала, а также показать зависимость этого времени от толщины нанесенного слоя огнезащитного материала. Полученные результаты позволяют оценить возможность практического использования композитного материала для тепловой защиты кабин транспортных средств, используемых при тушении пожаров в условиях повышенных температур, и техники, применяемой в чрезвычайных ситуациях.

Литература

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: УРСС, 2003. 782 с.

2. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Регуляризованные уравнения для численного моделирования течений в приближении двухслойной мелкой воды // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. Т. 58, № 5. С. 741–761.

3. Елизарова Т.Г., Милюкова О.Ю. Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в кубической каверне // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2003. Т.43, № 3. С. 453-466.

4. Еремина Н.В. Огнезащитные композиции на основе жидкого стекла и механически активированных оксидов алюминия и магния: канд. дис. … техн. наук. Томск, 2007. 156 с.

5. Волкова В.К. Теплофизические свойства композиционных материалов с полимерной матрицей и твердых растворов. М.: Изд-во Наука и образование, 2011. 101 с.

6. Ромаденкина С.Б. Физико-химические основы получения функциональных материалов из горючих сланцев: канд. дис. … хим. наук. Саратов, 2004. 170 с.

7. Глухова О.Е., Колесникова А.С., Слепченков М.М., Савостьянов Г.В., Шмыгин Д.С.Перспективный композитный материал на основе нанотрубок и графена для эмиссионной электроники // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. 2015. Т. 7, № 3. С. 35-41.

8. Степашкина А.С., Цобкалло Е.С., Алешин А.Н. Моделирование электропроводности композитных материалов, полученных на основе полипропилена и технического углерода // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2014. Т. 25, № 3. С. 51-54.

9. Maluk C., Terrasi G.P., Bisbya L., Stutz A. Erich Hugi Fire resistance tests on thin CFRP prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 101. Part 1.2015. P. 558–571.

10. Yue W.W., Tam W.C., Chow W.K. Assessment of radiative heat transfer characteristics of a combustion mixture in a three–dimensional enclosure using RAD–NETT (with application to a fire resistance test furnace) // International Journal of Heat and Mass Transfer.68. 2014. P. 383–390.

11. Schmid J., Klippel M., Just A., Frangi A. Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced. Cross–Section Method // Fire Safety Journal. 2014. Vol. 68. P. 81–99.

12. Das A., Kasaliwal G.R., René Jurk R. Composites based on graphene nanoplatelets, expanded graphite, carbon nanotubes and their combination: A comparative study // Composites Science and Technology, 2012. Vol.72, Is. 16. 2012. P. 1961-1967.

13. Barreto C., Proppe J., Fredriksen S., Hansen E., Rodney W. Rychwalski Graphite nanoplatelet/pyromellitic dianhydride melt modified PPC composites: Preparation and characterization // Polymer. 2013. Vol. 54, Is. 14. P. 3574-3585.

14. Wang B., Jiao Y., Gu A., Liang G., Li Y. Dielectric properties and mechanism of composites by superposing expanded graphite/cyanate ester layer with carbon nanotube/cyanate ester layer // Composites Science and Technology. 2014. Vol. 91. P. 8-15.

15. Gostev V. A., Pitukhin E.A., UstinovA.S., Shelestov A.S. Thermal Insulation Properties Research of the Composite Material "Water Glass – Graphite Microparticles" // IOP Conference series: Materials science and engineering. 2016 1757-899X 123 012018 doi:10.1088/1757-899X/123/1/012018.

16. Ustinov A., Eugene Pitukhin E., Pitukhin A. Research of Thermal Stability and Fire-Resistance Properties of the Composite Material "Water Glass-Graphite Microparticles" // Key Engineering Materials. Submitted: 2016. Vol. 744. P. 27-31 doi:10.4028/www.scientific.net / KEM. 744. 27.

17. Устинов А.С., Питухин Е.А. Исследование композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» методом термогравиметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 5. С. 826–833.

18. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С Сукомел М.: Энергия, 1975. 488 с.

19. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1) М.: Стандартинформ, 2008.

20. ISO 834–12:2012 Fire resistance tests. Elements of building construction. Part 12: Specific requirements for separating elements evaluated on less than full scale furnaces.

21. Химическая энциклопедия: В 5 т. / гл. ред. И.Л. Кнунянц, Н.С. Зефиров. М.: Советская энциклопедия. 1998. Т. 4. 300 с.

References

1. Samarskij A.A., Vabishchevich P.N. Computational heat transfer. M.: URSS, 2003. 782 p.

2. Elizarova T.G., Ivanov A.V. Regularized equations for numerical simulation of flows in the two-layer shallow water approximation // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2018. T. 58, № 5. P. 741-761.

3. Elizarova T.G., Milyukova O.Yu. Numerical simulation of viscous incompressible fluid flow in a cubic cavity // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2003. T.43, № 3. P. 453-466.

4. Eremina N.V. Flame retardant compositions based on liquid glass and mechanically activated oxides of aluminum and magnesium: kand. dis. … tekhn. nauk. Tomsk, 2007. 156 p.

5. Volkova V.K. Thermophysical properties of composite materials with polymer matrix and solid solutions. M.: Izd-vo Nauka i obrazovanie, 2011. 101 p.

6. Romadenkina S.B. Physico-chemical bases of functional materials from oil shale: kand. dis. … him. nauk. Saratov, 2004. 170 p.

7. Gluhova O.E., Kolesnikova A.S., Slepchenkov M.M., Savost'yanov G.V., Shmygin D.S. Promising composite material based on nanotubes and graphene for emission electronics // Nanotekhnologii: razrabotka, primenenie - XXI vek. 2015. T. 7, № 3. P. 35-41.

8. Stepashkina A.S., Cobkallo E.S., Aleshin A.N. Modeling of electrical conductivity of composite materials based on polypropylene and carbon black // The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry. 2014. T. 25, № 3. P. 51-54.

9. Maluk C., Terrasi G.P., Bisbya L., Stutz A. Erich Hugi Fire resistance tests on thin CFRP prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 101. Part 1. 2015. P. 558-571.

10. Yue W.W., Tam W.C., Chow W.K. Assessment of radiative heat transfer characteristics of a combustion mixture in a three-dimensional enclosure using RAD-NETT (with application to a fire resistance test furnace) // International Journal of Heat and Mass Transfer.68. 2014. P. 383-390.

11. Schmid J., Klippel M., Just A., Frangi A. Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced. Cross-Section Method // Fire Safety Journal. 2014. Vol. 68. P. 81-99.

12. Das A., Kasaliwal G.R., René Jurk R. Composites based on graphene nanoplatelets, expanded graphite, carbon nanotubes and their combination: A comparative study // Composites Science and Technology, 2012. Vol.72, Is. 16. 2012. P. 1961-1967.

13. Barreto C., Proppe J., Fredriksen S., Hansen E., Rodney W. Rychwalski Graphite nanoplatelet/pyromellitic dianhydride melt modified PPC composites: Preparation and characterization // Polymer. 2013. Vol. 54, Is. 14. P. 3574-3585.

14. Wang B., JiaoY., Gu A., Liang G., Li Y. Dielectric properties and mechanism of composites by superposing expanded graphite/cyanate ester layer with carbon nanotube/cyanate ester layer // Composites Science and Technology. 2014. Vol. 91. P. 8-15.

15. Gostev V. A., Pitukhin E.A., UstinovA.S., Shelestov A.S. Thermal Insulation Properties Research of the Composite Material "Water Glass - Graphite Microparticles" // IOP Conference series: Materials science and engineering. 2016 1757-899X 123 012018 doi:10.1088/1757-899X/123/1/012018.

16. Ustinov A., Pitukhin E., Pitukhin A. Research of Thermal Stability and Fire-Resistance Properties of the Composite Material "Water Glass-Graphite Microparticles" // Key Engineering Materials. Submitted: 2016. Vol. 744. P. 27-31 doi:10.4028/www.scientific.net/ KEM.744.27.

17. Ustinov A.S., Pituhin E.A. Research of "water glass - graphite microparticles" composite material on the method of thermogravimetry // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2017. T. 17, № 5. P. 826-833.

18. Isachenko V.P. Heat transfer / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S Sukomel. M.: Energiya, 1975. 488p.

19. GOST 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air (s Izmeneniem N 1). M.: Standartinform, 2008.

20. ISO 834-12:2012. Fire resistance tests. Elements of building construction. Part 12: Specific requirements for separating elements evaluated on less than full scale furnaces.

21. Chemical encyclopedia: V 5 t. / gl. red. I.L. Kn unyanc, N.S. Zefirov. M.: Sovetskaya encyclopedia. 1998. T. 4. 300 p.