

проф. д-р. техн. наук Пашковский П.С. / prof. Pashkovskiy P.S., Ph.D.¹
д-р техн. наук Греков С.П. / Grekov S.P., Ph.D.¹
канд. техн. наук Зинченко И.Н. / Zinchenko I.N., Ph.D.¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 24.02.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 25.11.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.12.2016;

Единый подход к решению задач теплогазообмена при пожарах на различных объектах²

Combined Approach to Solving Issues of Heat and Gas Exchange Caused by Fires in Different Locations

Wspólne podejście do rozwiązywania zagadnień wymiany masy i gazów zachodzącej podczas pożarów w różnych obiektach

АННОТАЦИЯ

Цель: Целью исследований является обобщение существующих математических моделей теплогазообмена и приведение их к одному уравнению переноса любой субстанции при пожарах в шахтах и на других объектах с учётом термического расширения газов.

Введение: При оценке пожароопасности необходимо знать время продолжительности пожара и время достижения величины опасного фактора, такого например, как величины токсичного газа и задымленности. Реальный пожар, как неконтролируемое горение, является сложным, до конца неизученным нестационарным процессом, протекающим в трёхмерном пространстве. Для описания этого процесса используются как основные: уравнение сохранения и превращения энергии, уравнение конвективно-диффузионного переноса компонентов различных газов и уравнение конвективно-диффузионного переноса дыма.

Методы: Для получения решений уравнения переноса любой субстанции использован численный метод центральных разностей явной и неявной схем с заданным удельным весом одной из них.

Результаты: Рассматривается дозвуковое течение воздуха со скоростями менее 10 м/с. При таких скоростях согласно уравнению Бернулли давление меняется незначительно по отношению к атмосферному. Поэтому уравнение состояния с достаточной степенью точности заменяется уравнением для нормальных условий. Это позволило в безразмерном виде представить систему уравнений сохранения и превращения

энергии, конвективно-диффузионного переноса компонентов различных газов и дыма одним универсальным уравнением. Разработан численный метод решения задачи. Дана расчетная схема, которая является комбинированной: явной и неявной.

Представленная схема расчета реализована на шеститочечном шаблоне «Медведица». На конкретных примерах показано сравнение предложенного численного метода с аналитическими кривыми изменения во времени и на различных расстояниях функции выделения тепла и газа в проветриваемом канале.

Выводы: Предложено универсальное уравнение в безразмерном виде, описывающее одним уравнением систему уравнений сохранения и превращения энергии, конвективно-диффузионного переноса компонентов различных газов и дыма. Дана расчетная схема «Медведица», позволяющая получать численным методом достоверные данные о динамике процессов теплогазообмена в каналах, коридорах и горных выработках.

Ключевые слова: пожары, теплогазообмен, уравнения переноса, численный метод, аналитические решения, сходимости, термическое расширение, единый подход

Вид статьи: оригинальная научная статья

ABSTRACT

Aim: The purpose of this study is to expose existing mathematical models dealing with heat and gas exchange, and reduce them to a single transfer equation, for any substance, during fire incidents in mines and other locations, by taking account of heated gas thermal expansion.

Introduction: In order to perform an assessment of a fire hazard it is necessary to know the duration of a fire and period in which the fire will reach dangerous levels such as: concentration of toxic gases and saturation by smoke. A fire, manifested by an uncontrolled burning activity is a difficult, unstable and ultimately not fully understood process, which occurs within a three dimensional expanse. This process is described,

¹ Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», Донецк / The “Respirator” Scientific Research Institute of Mine-rescue Work and Fire Safety, Donetsk, niigd@mail.ru;

² Процентное соотношение участия в подготовке статьи / Percentage contribution: Pashkovskiy P.S. – 25%, Grekov S.P. – 25%, Zinchenko I.N. – 50%;

in the main, by mathematical equations dealing with behaviour principles involving conservation and conversion of energy, convection and diffused transfer of various gas components as well as smoke.

Methods: In order to obtain an equation describing the transfer process for any substance, use is made of the central (finite) differences numerical method, for explicit and implicit conditions, using specific weighting appropriate to each.

Results: The study examined the flow of air at velocities below the speed of sound – at less than 10m/s. According to the Bernoulli equation pressure changes insignificantly in relation to atmospheric pressure at such speed. Therefore, an equation describing this condition can be satisfactorily interchanged with an equation for normal conditions. This made it possible to depict a system of equations, in a dimensionless form, to address the behaviour and transformation of energy as well as convective and diffused transfer of components for different gasses and smoke using one universal equation. A numeric approach was developed to address issues. The designed calculation diagram, incorporating explicit and implicit conditions is realised with the use of a “Miedwiedzica” template. Specific examples illustrate comparisons between proposed calculations and graph analysis of variations in time and range of heat, and gas release in a ventilated channel.

Conclusions: The article advocates a universal solution in a dimensionless form, which with the use of one equation describes a system of equations for conserving and transformation of energy, and transfer of different gas and smoke components by convective and diffused methods. The “Miedwiedzica” template facilitates the capture of data dealing with the dynamics of heat and gas transfer processes in channels, corridors and mines.

Keywords: fires, heat and gas exchange, transfer equations, numerical procedure, analytical solutions, convergence, thermal expansion, combined approach

Type of article: original scientific article

ABSTRAKT

Cel: Celem badań jest generalizacja istniejących modeli matematycznych wymiany masy i gazów oraz stworzenie na ich podstawie jednego równania transferu dowolnej substancji podczas pożarów w kopalniach i w innych obiektach z uwzględnieniem rozszerzenia cieplnego gazów.

Wprowadzenie: Aby przeprowadzić ocenę zagrożenia pożarowego, należy znać czas trwania pożaru oraz czas, w jakim osiągnięte on niebezpieczne wartości np. stężenia toksycznego gazu i zadymienia. Prawdziwy pożar, będący niekontrolowanym procesem spalania, jest złożonym i nie do końca poznanym procesem niestacjonarnym, który odbywa się w przestrzeni trójwymiarowej. W celu opisanego tego procesu wykorzystywane są głównie: równania zasady zachowania i przemiany energii, równanie konwekcyjno-dyfuzyjnego transferu składników różnych gazów i równanie konwekcyjno-dyfuzyjnego transferu dymu.

Metody: W celu otrzymania rozwiązania równania transportu dowolnej substancji wykorzystano metodę liczbową różnic skończonych schematów jawnych i niejawnych z określonym ciężarem właściwym jednej z nich.

Wyniki: Rozpatrywano przepływ powietrza z prędkością mniejszą niż prędkość dźwięku, poniżej 10 m/s. Przy takich prędkościach, zgodnie z równaniem Bernoulliego, ciśnienie zmienia się nieznacznie w stosunku do ciśnienia atmosferycznego. Dlatego też równanie stanu z dostatecznym stopniem dokładności można zamienić na równanie dla normalnych warunków. Pozwoliło to przedstawić w postaci bezwymiarowej system równań zachowania i przemiany energii oraz konwekcyjno-dyfuzyjnego transferu składników różnych gazów i dymu w jednym uniwersalnym równaniu. Opracowano metodę liczbową rozwiązywania zagadnienia. Przedstawiony łączony schemat obliczeniowy – jawny i niejawny jest realizowany na sześciopunktowym szablonie „Miedwiedzica”. Na konkretnych przykładach przedstawiono porównanie zaproponowanej metody liczbowej z analitycznymi krzywymi zmiany w czasie i w różnych odległościach funkcji wydzielenia ciepła i gazu w wentylowanym kanale.

Wnioski: Zaproponowano uniwersalne rozwiązanie w formie bezwymiarowej, które opisuje jednym równaniem system równań zachowania i przemiany energii, konwekcyjno-dyfuzyjny transfer składników różnych gazów i dymu. Przedstawiono schemat obliczeniowy „Miedwiedzica”, który dzięki zastosowaniu metody liczbowej pozwala otrzymać wiarygodne dane o dynamice procesów wymiany masy i gazów w kanałach, korytarzach i kopalniach.

Słowa kluczowe: pożary, wymiana masy i ciepła, równania transferu, metoda liczbowa, rozwiązania analityczne, podobieństwo, rozszerzenie cieplne, wspólne podejście

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

Пожары среди различных аварий занимают первое место по числу гибели людей. В этих условиях особое место отводится задачам пожаротушения и обеспечения безопасной эвакуации людей.

При оценке пожароопасности необходимо знать время продолжительности пожара и время достижения величины опасного фактора, такого например, как величины токсичного газа и задымленности.

Существующие результаты исследований в этом направлении и нормативные документы, включающее в себя это время, базируются либо на упрощённых интегральных методах теплогазообмена при пожаре, либо на сложных методах, использующих полевые (трёхмерные) модели [1-3].

Реальный пожар, как неконтролируемое горение, является сложным, до конца неизученным нестационарным процессом, протекающим в трёхмерном пространстве.

Для описания этого процесса используются, как основные, уравнение сохранения и превращения энергии [3]

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q, \quad (1)$$

а также уравнение конвективно-диффузионного переноса компонентов различных газов

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\rho D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + m \quad (2)$$

и уравнение конвективно-диффузионного переноса дыма

$$\rho \left(\frac{\partial D}{\partial \tau} + u \frac{\partial D}{\partial x} + v \frac{\partial D}{\partial y} + w \frac{\partial D}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\rho D_x \frac{\partial D}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho D_y \frac{\partial D}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D_z \frac{\partial D}{\partial z}) + k \quad (3)$$

где T – абсолютная температура, К; ρ – плотность воздуха, кг/м³; c_p – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); u, v, w – продольная, вертикальная и поперечная составляющие скорости движения воздуха, м/с; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коэффициенты теплопроводности в трёх направлениях, Вт/м²; q – интенсивность источника или стока тепла, Вт/(кг·м²);

C – концентрация какого-либо компонента газа, об. доли; D_x, D_y, D_z – коэффициенты диффузии какого-либо газа в трёх направлениях, м²/с; m – интенсивность источ-

ника или стока данного газа, кг/(с·м³); D – плотность дыма, об. доли; k – интенсивность источника или стока дыма, кг/(с·м³).

В отличие от [3] в уравнении (3) учтена диффузия дыма, потому что при отсутствии конвективного движения дым обязательно будет рассеиваться.

Как известно, закон состояния газовой среды описывается уравнением [3]

$$P = \rho VT, \tag{4}$$

где P – давление воздуха или газа, Па; V – газовая постоянная, м²/(К·с²).

2. Результаты исследований

Будем рассматривать дозвуковые течения воздуха, где его скорости менее 10 м/с. При таких скоростях согласно уравнению Бернулли давление меняется незначительно по отношению к атмосферному давлению $P_0 = 10^5$ Па и можно принять $P \approx P_0$. Поэтому уравнение состояния газовой среды вместо (4) можно с достаточной степенью точности заменить уравнением вида

$$\rho T = \rho_0 T_0, \tag{5}$$

где ρ_0 – плотность газозвушной смеси при нормальных условиях, кг/м³; T_0 – абсолютная температура при нормальных условиях, К.

Это позволяет в безразмерном виде представить систему уравнений (1) – (3) одним универсальным уравнением вида

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \bar{T} \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(A_i \frac{\partial F}{\partial x_i} - \tilde{u}_i F \right) + G \right) \right), \tag{6}$$

где F – универсальная функция, для первого уравнения равная $\bar{T} = T/T_0$, для второго уравнения равная $\bar{C} = C/C_0$, для третьего уравнения $\bar{D} = D/D_0$; A_i – обобщённый коэффициент диффузии какой-либо субстанции, равный для первого уравнения $\lambda_i/(\rho_0 c_p)$, для второго и третьего уравнения $\rho D_i/\rho_0$; $\tilde{u} = \rho u/\rho_0$ – приведенная массовая скорость, м/с; $G = q/(\rho_0 c_p T_0)$ – для первого уравнения, $G = m/(\rho_0 C_0)$ – для второго уравнения, $G = k/(\rho_0 D_0)$ – третьего уравнения, $1/c$: i – номер направления движения воздуха; C_0 – начальная или конечная концентрация какого-либо газа, об. доли; D_0 – конечная плотность дыма, об. доли.

Анализ полученного уравнения (6) показывает, что оно в точности с учётом (5) соответствует каждому уравнению системы (1) – (3). При этом множитель в правой части уравнения (6) говорит о том, какое огромное влияние на развитие процессов имеет повышение при пожаре абсолютной температуры, особенно в 4 – 5 раз, что ранее не учитывалось.

Уравнение (6) может быть решено только численным методом. С этой целью представим его в конечных разностях:

$$F_m^{n+1} = F_m^n + \Delta t \bar{T}_m^n \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[\frac{(\tilde{u}_i F)_{m-1}^n - (\tilde{u}_i F)_{m+1}^n}{2 \Delta x_i} + A_i \frac{(F_{m-1}^n - 2F_m^n + F_{m+1}^n)}{\Delta x_i^2} + p A_i \frac{(F_{m-1}^{n+1} + F_{m+1}^{n+1})}{\Delta x_i^2} + G_m^n \right] / (1 + 2p \Delta t / \Delta x_i^2) \right\}, \tag{7}$$

где Δx_i – шаг по пространственной координате, м; m – номер узла по пространственной координате; n – номер узла по времени; p – удельный вес неявной схемы.

Представленная расчётная схема является неявной из-за наличия в правой части значений функции F_{m+1}^{n+1} на искомом временном слое. Обычно такие задачи решаются методами прогонки в два этапа: предварительный поиск прогоночных коэффициентов с определением значений искомой функции. В связи с этим такой метод является громоздким и трудоёмким. Чтобы избежать этого, превратим неявную схему в явную, отыскав предварительно значения концентрации субстанции F_{m+1}^{n+1} на искомом временном слое при $p = 0$. В этом случае уравнение (7) при $p = 0$ примет вид

$$F_{m+1}^{n+1} = F_{m+1}^n + \Delta t \bar{T}_m^n \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[\frac{(\tilde{u}_i F)_{m-1}^n - (\tilde{u}_i F)_{m+1}^n}{2 \Delta x_i} + A_i \frac{(F_{m-1}^n - 2F_m^n + F_{m+1}^n)}{\Delta x_i^2} + G_m^n \right] \right\} \tag{8}$$

Находя предварительно по формуле (8) значение функции F_{m+1}^{n+1} и подставляя её в правую часть формулы (7), находим на новом временном слое значение искомой функции F_m^{n+1} .

Таким образом, предлагаемая схема расчёта может быть реализована на шеститочечном шаблоне «Медведица» [4] (рис. 1).

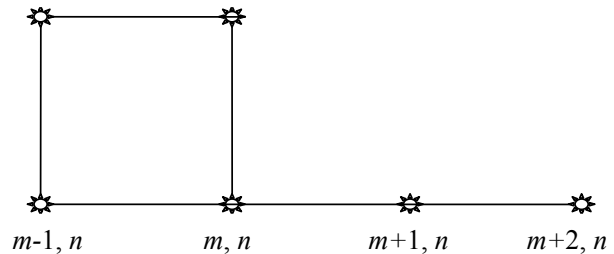


Рис. 1. Шеститочечный шаблон «Медведица»

Fig. 1. The “Medveditsa” six-point scheme

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

В соответствии с предложенной модифицированной схемой с центральными разностями разработана программа расчёта на ЭВМ теплогазообменных процессов в каналах, туннелях и горных выработках при заранее известных скоростях воздуха.

В качестве примера рассмотрим перенос тепла или газа вдоль канала при возникновении в его начале источника тепла или газа. При этом принято, что теплообмен идёт в одном направлении ($i = 1$), при одной массовой скорости и отсутствии внутренних источников тепла или массы ($G = 0$).

При расчётах в качестве начальных и граничных условий использованы условия:

$$1) F(x, 0) = 0; \quad 2) F(0, t) = 1; \quad 3) \frac{\partial(L, t)}{\partial x} = 0 \tag{9}$$

где L – длина канала, м.

На рис. 2 представлены результаты расчёта по предложенной расчётной схеме заполнения канала при появлении в его начале постоянного источника тепла или газа.

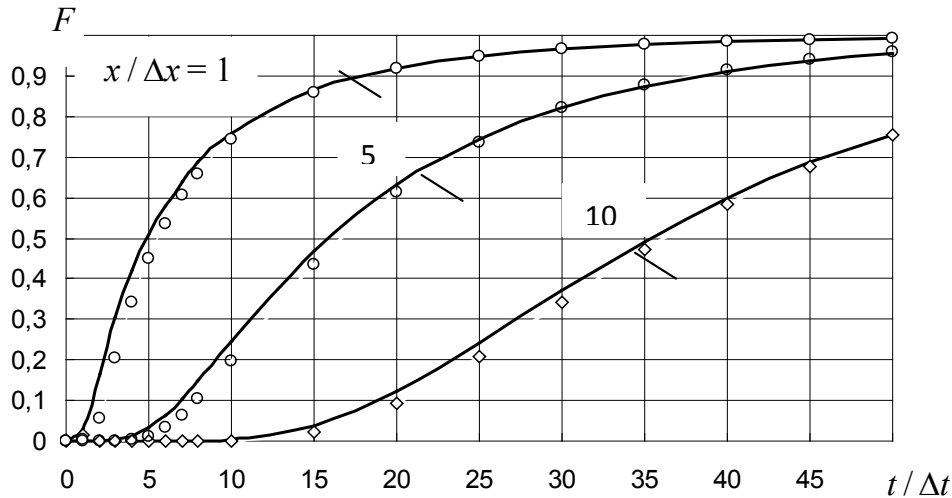


Рис. 2. Результаты сравнения численных расчётов (маркеры) с аналитическими кривыми изменения функции во времени на различных расстояниях от источника выделения тепла или газа в проветриваемом канале

Fig. 2. Results of the comparison of numerical calculations (markers) with analytical curves of functions versus time for different distances to the heat and gas release sources in the ventilated channel

Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

Анализируя полученные данные, приходим к выводу, что предложенная расчётная схема правильно отражает процессы переноса. Так, например, газовая волна, двигаясь вдоль канала не стеной, а растекаясь за счёт диффузии, постепенно заполняет всё пространство.

Здесь же (рис. 2) для проверки точности предлагаемого численного метода расчёта приведена аналитическая кривая, полученная при расчёте по формуле (10) [4]:

$$F(x, t) = 0,5 \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{ut - x}{2\sqrt{A_x t}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{A_x} \right) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{ut + x}{2\sqrt{A_x t}} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

где erf – функция интеграла вероятности.

Результаты численного моделирования и расчётов по формуле (10) показали (рис. 2), что наилучшего приближения можно достичь, принимая схемные числа Пекле $Pe = A_x \Delta t / \Delta x^2 = 1/3$ и Куранта $Cu = u \Delta t / \Delta x = 0,5$, а удельный вес неявной схемы $p = 0,25$.

Как видно из результатов сравнения численных расчётов с точными данными, предлагаемая схема достоверно отражает процессы переноса газов вдоль канала.

Рассмотрим ещё один пример, имеющий реальное приложение при пожаре ($F = \bar{T}$). При интегральном подходе уравнение (6) в зоне горения можно представить в виде

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = [(\tilde{u} / \Delta x + \bar{\alpha})(1 - \bar{T}) + \bar{q}] \bar{T}, \quad (11)$$

где $\bar{\alpha} = \frac{\alpha \Pi}{c_p \rho_0 S}$ – удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки, 1/с;

$\bar{q} = \frac{q}{c_p \rho_0 T_0}$ – удельная интенсивность тепловыделения в зоне горения, 1/с;

α – коэффициент теплообмена смеси газов со стенками выработки, Вт/(м²К); Π – периметр поперечного сечения канала, м; S – площадь поперечного сечения канала, м².

Полагая удельное тепловыделение в зоне горения постоянным на некотором промежутке времени, выделим стационарную часть из уравнения (11) и найдём предельную температуру в зоне горения

$$\bar{T}_n = 1 + \frac{\bar{q}l}{\tilde{u} + \bar{\alpha}l}, \quad (12)$$

где l – длина зоны горения, м.

Аналитическое решение уравнения (11), если принять, что в начале горения температура $T(0) = T_0$, имеет вид

$$\bar{T} = \frac{T_n}{1 + (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{T}_n \bar{\tau})}. \quad (13)$$

Сравним полученное решение (13), с другим решением, если пренебречь расширением воздуха. В этом случае уравнение (11) примет вид

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = (\tilde{u}l + \bar{\alpha})(1 - \bar{T}) + \bar{q}. \quad (14)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\bar{T} = \bar{T}_n - (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau}). \quad (15)$$

При остывании будет наблюдаться обратная картина: температура станет снижаться от T_n до T_0 . Тогда решения (13) и (15), учитывающие и не учитывающие расширение газов при остывании можно представить соответственно в виде

$$\bar{T} = \frac{T_n}{\bar{T}_n - (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau})}; \bar{T} = 1 + (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau}). \quad (16)$$

На рис. 3 представлены результаты расчёта нагревания и остывания очага пожара по формулам (13), (15) и (16) при времени горения $\bar{\tau} = \bar{\tau}_1 = 3$ и при максимальной температуре $\bar{T}_n = 4$. Здесь же (рис. 2) приведена кривая (прерывистая линия), если учитывать расширение газов постоянным коэффициентом, как множителем перед параметром времени, равным

$$k = \frac{1 + \bar{T}_n}{2}. \quad (17)$$

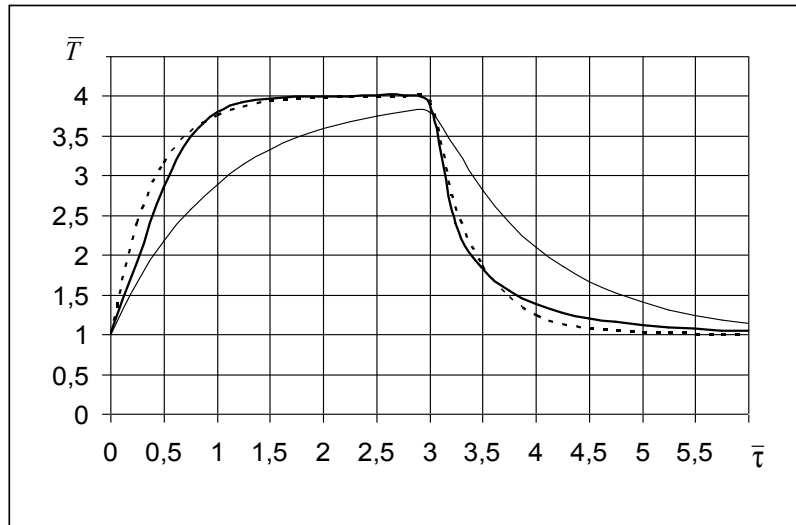


Рис. 3. Кривые нагревания и остывания очага пожара с учётом термического расширения (жирная линия) и без учёта расширения воздуха (тонкая линия)

Fig. 3. Heating and cooling curves of the fire source with the account of the thermal expansion (thick line) and without taking into account the air expansion (thin line)

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Как показывают результаты расчёта, представленные на рисунке 3, если время представить в часах, то без учёта расширения газов увеличение в три раза температуры в очаге пожара произойдёт через 1 час, а с учётом расширения – через полчаса. Ещё большие расхождения наблюдаются при дальнейшем развитии пожара, что нельзя не учитывать.

Как видно на рисунке 3, учёт термического расширения газов приводит к быстрому нагреванию и к быстрому остыванию очага пожара, если не учитывать нагретые стенки канала. Учёт нагревания стенок будет способствовать медленному остыванию потока воздуха

и будет отражать термодинамические свойства окружающего массива.

3. Выводы

В статье предложено универсальное уравнение в безразмерном виде, описывающее одним уравнением систему уравнений сохранения и превращения энергии, конвективно-диффузионного переноса компонентов различных газов и дыма. Дана расчетная схема «Медведица», позволяющая получить численным методом достоверные данные о динамике процессов теплогазообмена в каналах, коридорах и горных выработках.

Аббревиатура

T	абсолютная температура	К
ρ	плотность воздуха	кг/м ³
c_p	удельная теплоёмкость	Дж/(кг·К)
u, v, w	продольная, вертикальная и поперечная составляющие скорости движения воздуха	м/с
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	коэффициенты теплопроводности в трёх направлениях	Вт/м ³
q	интенсивность источника или стока тепла	Вт/(кг·м ³);
C	концентрация какого-либо компонента газа	об. доли
D_x, D_y, D_z	коэффициенты диффузии какого-либо газа в трёх направлениях	м ² /с
m	интенсивность источника или стока данного газа	кг/(с·м ³)
D	плотность дыма	об. доли
k	интенсивность источника или стока дыма	кг/(с·м ³)
P	давление воздуха или газа	Па
B	газовая постоянная	м ² /(К·с ²)
ρ_0	плотность газовой смеси при нормальных условиях	кг/м ³
T_0	абсолютная температура при нормальных условиях	К
F	универсальная функция, для первого уравнения равная $\bar{D} = \bar{D}/\bar{D}_0$, для второго уравнения равная $\bar{N} = \bar{N}/\bar{N}_0$, для третьего уравнения $\bar{D} = D/D_0$	-

A_i	обобщённый коэффициент диффузии какой-либо субстанции, равный для первого уравнения $\lambda_i/(\rho_0 c_p)$, для второго и третьего уравнения $\rho D_i/\rho_0$	-
$\tilde{u} = \rho u / \rho_0$	приведенная массовая скорость для уравнений:	м/с
	$G = q/(\rho_0 c_p T_0)$ – для первого уравнения, $G = m/(\rho_0 C_0)$ – для второго уравнения, $G = k/(\rho_0 D_0)$ – третьего уравнения	1/с
i	номер направления движения воздуха	-
C_0	начальная или конечная концентрация какого-либо газа	об. доли
D_0	конечная плотность дыма	об. доли
Δx_i	шаг по пространственной координате	м
m	номер узла по пространственной координате	-
n	номер узла по времени	-
p	удельный вес неявной схемы	-
L	длина канала	м
l	длина зоны горения	м
erf	функция интеграла вероятности	-
$\bar{\alpha} = \frac{\alpha \bar{l}}{\tilde{n}_0 \rho_0 S}$	удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки	1/с
$\bar{q} = \frac{q}{c_p \rho_0 T_0}$	удельная интенсивность тепловыделения в зоне горения	1/с
α	коэффициент теплообмена смеси газов со стенками выработки	Вт/(м ² К)
Π	периметр поперечного сечения канала	м
S	площадь поперечного сечения канала	м ²

Литература

1. Tsvetkov F.F., Grigoriev B.A., *Teplomassoobmen. Uchebnoye posobiye dlya vuzov*, MEI, Moskva 2005, 550.
2. Paskonov V.M., Polezhayev V.I., Chudov L.A., *Chislennoye modelirovaniye protsessov teplomassoobmena*, Nauka, Moskva 1984, 288.
3. Puzach S.V., *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezопасnosti*, Akademiia GPS MChS Rossii, Moskva 2005, 336.
4. Zinchenko I.N., Kumpan I.E., *Chislennoye modelirovaniye raspredeleniya tepla ili gaza po gornym vyrabotkam pri ikh vnezapnykh vydeleniyakh*, "Gornospasatel'noye delo" 1993, 60-65.

* * *

Пашковский Петр Семенович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, первый заместитель директора НИИГД «Респиратор», основатель научной школы борьбы с пожарами на угольных шахтах.

Греков Святослав Павлович – доктор технических наук, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы, Начальник научно-исследовательского отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах, специалист в области тепломассопереноса в горных выработках и пористых средах.

Зинченко Игорь Николаевич – кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах, специалист в области тепломассопереноса при пожарах.