Пожарная и промышленная безопасность (05.26.03, технические науки)

УДК 614.841

О скорости распространения теплового импульса для нелинейной задачи теплопроводности продуктов горения на пожаре

On the heat impulse propagation velocity for the nonlinear problem of heat conductivity of combustion products in the fire

А.А. Кузьмин,
канд.пед.наук, доцент,
Н.Н. Романов,
канд.техн.наук, доцент,
А.А. Пермяков,
канд.пед.наук
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

A.A. Kuzmin,
Ph.D. of Pedagogic Sciences, Docent,
N.N. Romanov,
Ph.D. of Engineering Sciences, Docent,
A.A. Permyakov,
Ph.D. of Pedagogic Sciences
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Аннотация:

Проанализированы свойства продуктов горения на пожаре, исходя из основных положений феноменологической теории теплопроводности. Исследованы условия учета нелинейности процесса переноса в решении уравнения энергии. Сформулированы граничные условия решения квазилинейного параболического уравнения теплопроводности с учетом влияния процессов конвективного тепломассопереноса. Проанализировано полученное решение, и сделаны необходимые выводы по распространению теплового импульса в продуктах горения при условии их представления неньютоновской жидкостью. Освещена область использования результатов исследования и направление для дальнейшего исследования в данной области

Ключевые слова: продукты горения, разряженная среда, вязкоупругая жидкость, коэффициент теплопроводности, тепловой импульс, скорость деформации, продолжительность релаксации, задача Коши.

Abstract:

We analyzed properties of combustion products in a fire on the base of the basic principles of the heat conduction phenomenological theory. The conditions of taking into account the nonlinearity of the transfer process in solving the energy equation are investigated. We formulated boundary conditions for solving a quasilinear parabolic heat equation taking into account the influence of convective heat and mass transfer processes. The obtained solution is analyzed and the necessary conclusions on the heat impulse propagation in the combustion products are made, in case that they are represented by a non-Newtonian fluid.

Key word: combustion products, rarefied medium, viscoelastic fluid, thermal conductivity coefficient, heat impulse, strain rate, relaxation duration, Cauchy's problem.

Изучение процессов переноса тепловой энергии на пожаре предполагает учет ряда особых свойств с высокотемпературными средами, которыми являются продукты горения. К таким свойствам относятся:

- зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры;
- влияние эндо- и экзотермических процессов ионизации молекул продуктов горения на лучистую составляющую теплопереноса;
- баланс теплопроводящей, конвективной и радиационной составляющих тепломассопереноса.

Исходя из основных положений феноменологической теории теплопроводности, предполагается, что скорость распространения тепла является бесконечно большой. Это предположение подтверждается результатами расчета температурных полей в различных телах при обычных условиях, встречающихся в практике пожарного дела. Однако в разреженных средах, которые образуют продукты горения при высокоинтенсивных процессах теплообмена, характерных для пожара, необходимо учитывать, что тепловая энергия распространяется не бесконечно быстро, а с некоторой, хотя и не очень большой скоростью w_r. Существует гипотеза о конечных скоростях распространения тепла и массы для теплопереноса в пространстве конечного размера [1]. В соответствии с ней скорость распространения теплой энергии равна

$$w_r = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot \tau_r}}, \tag{1}$$

где τ_r – временная константа, численно равная продолжительности релаксации;

λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность продуктов горения соответственно.

Для азота, составляющего существенный компонент в продуктах горения, продолжительность релаксации $\tau_r=10^{-9}$ с, а величина скорости распространения тепла $w_r\approx150$ м/с, для металлов это значение существенно больше, например, для алюминия продолжительность релаксации $\tau_r=10^{-11}$ с [2]. Поэтому опытное измерение продолжительности релаксации для конструкционных материалов пока не представляется возможным. Однако для продуктов горения в условиях пожара, влияние величины скорости распространения тепла на теплообмен может быть более заметным. В этих условиях закон, описывающий распространение тепла приобретает вид

$$q = -\lambda \cdot \nabla t - \tau_r \cdot \frac{\partial q}{\partial \tau}, \tag{2}$$

Вид уравнения (2) аналогичен виду уравнения для вязкого течения неньютоновских (вязкоупругих) жидкостей [3]. Еще Дж. Максвелл предположил, что процессы релаксации обуславливают относительную амбивалентность механических свойств твердых тел и жидкостей. Процесс релаксации относится к явлению перманентной диссипации рассасывания упругих напряжений сдвига в условиях постоянно заданной деформации, сопровождающая рассеиванием упругой энергии, которая содержится в деформируемом теле при превращении этой упругой энергии в ее тепловую форму. Протекание процессов релаксации в условиях пожара, как и процессы диффузии, неразрывно связаны с беспорядочным движением молекул продуктов горения:

- если продолжительность релаксации существенно больше обычного времени процесса наблюдения за ним, то поведение жидкости аналогично поведению твердого тела;
- если продолжительность процесса релаксации не велика, то поведение твердого тела эквивалентно поведению очень вязкой жидкости.

Состояния реальных тел имеют в большинстве своем промежуточный характер, которые в своем многообразии находятся в промежутке предельных состояний ньютоновских жидкостей и упругих твердых тел и составляют непрерывный ряд таких переходов.

Применительно к вязкоупругим (ненютоновским) жидкостям (например, продуктам горения) величина напряжения сдвига p определяется мерой величины деформации сдвига ε. Применительно к слоям, прилежащим к поверхности ограждающей конструкции соотношение между ними записывается как:

$$p = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{d\tau} - \frac{\eta}{G} \cdot \frac{dp}{d\tau}, \tag{3}$$

где η – коэффициент динамической вязкости;

G – модуль упругости на сдвиг;

dε/dτ – скорость деформации сдвига.

Значение η/G равно продолжительности релаксации $\tau_r = \eta/G$. Если обозначить величину скорости деформации через $\varepsilon^* = d\varepsilon/d\tau$. Тогда:

$$p = \eta \cdot \varepsilon^* - \tau_r \cdot \frac{dp}{d\tau}, \tag{4}$$

поскольку,

$$\varepsilon^* = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = -\frac{d}{d\tau}\left(\frac{dl_x}{dy}\right) = -\frac{dw_x}{dy}, \quad (5)$$

где y – нормаль к направлению движения по оси абсцисс x;

w_x – скорость движения жидкости.

Указанные обстоятельства предполагают учет нелинейности процесса переноса в решении уравнения энергии, тем более что результаты исследования физики плазмы в области нелинейной теории тепломассопереноса [4,5] позволили обнаружить несколько нелинейных эффектов, связанных с инерционными свойствами при локализации процессов тепломассопереноса в условиях пожара.

Анализируя задачу Коши в нелинейной среде продуктов горения и газообразных компонентов пожарной нагрузки, а также предполагая:

- наличие степенной температурной зависимости коэффициента теплопроводности;
- температурную зависимость интенсивности поглощения тепловой энергии объемом продуктов горения;
- интенсификацию процессов конвективного тепломассопереноса по мере выгорания пожарной нагрузки.

С учетом вышеприведенных условий квазилинейное параболическое уравнение процесса теплопроводности в продуктах горения описывается дифференциальным уравнением (6)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla\left(u^{m-1}\nabla u\right) + div\left[v(t)\cdot u\right] - b(t)\cdot u^q,$$
$$u_o(x) = u(0,x), \left(t>0, x\in R^n\right), \quad (6)$$

где $U(0,x)=Q_o\cdot\delta(x)$ – внутренняя энергия сосредоточенного источника теплой энергии в нелинейной среде продуктов горения и газообразных компонентов пожарной нагрузки, мощность которого определяется степенной температурной зависимостью и возрастает во времени;

Q_o – тепловая мощность внутреннего источника тепла, обусловленного выгоранием газообразных компонентов пожарной нагрузки.

Точное аналитическое решение подобной задачи, граничные условия которой предполагают наличие точечного источника тепла, но не учитывают влияние процессов конвективного тепломассопереноса [6].

Аналогично можно показать, что существует также и точное аналитическое решение уравнения (6) с учетом влияния процессов конвективного тепломассопереноса, имеющих существенное проявление в условиях пожара.

Условием решения задачи является предположение, что q=2-m; 1<m<2, тогда производя в уравнении (6) замену

$$u(t,x) = w(t,|\xi|=r), |\xi| = \left(\sum_{i=1}^{N}\xi_i^2\right)^{1/2}, \xi = \int_0^t v(y)\cdot dy - x, \quad (7)$$

уравнение (6) можно преобразовать в симметрично-радиальную форму:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = r^{1-N}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{N-1}\cdot w^{m-1}\cdot\frac{\partial w}{\partial r}\right) - b(t)\cdot w^q, w(o,|x|) = u_o(x), \quad (8)$$

где r – радиальная координата.

Далее предположим:

$$w(t,r) = a(t)\cdot\left[f(t)-r^2\right]^{\gamma_1}, \gamma_1 = \frac{1}{m-1}, \quad (9)$$

где a(t) – коэффициент температуропроводности продуктов горения в зависимости от средней температуры;

b(t) – температурный коэффициент теплопроводности;

γ_1 – постоянная адиабаты смеси продуктов горения и выгорающих газообразных компонентов пожарной нагрузки;

f(t) – функция температуры, значение которой необходимо определить.

После дифференцирования уравнения (9) получаем следующие соотношения:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{da}{dt}\left[f(t)-r^2\right]^{\gamma_1} - \gamma_1\cdot\frac{df}{dt}\left[f(t)-r^2\right]^{n-1}, \quad (10)$$

$$r^{N-1}\cdot w^{m-1}\cdot\frac{\partial w}{\partial r} + 2\gamma_1\cdot a^m\cdot r^N\left[f(t)-r^2\right]^{\frac{m-1}{\gamma_1-1}} =$$
$$= -a^m\cdot r^N\cdot w(t,r)\in c(Q), \quad (11)$$

Поскольку $m\cdot\gamma_1$-1=γ_1 после несложных преобразований уравнение (11) приобретает вид:

$$r^{1-N}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{N-1}\cdot w^{m-1}\cdot\frac{\partial w}{\partial r}\right) = -2\cdot\gamma_1\cdot N\cdot a^m\left[f(t)-r^2\right]^{\gamma_1} +$$
$$+2\cdot\gamma_1\cdot r^2\cdot a^m\cdot\left[f(t)-r^2\right]^{\gamma_1-1} \quad (12)$$

Если предположить, что постоянная m изменяется в пределах 1÷2, то получаем:

$$r^{1-N} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r^{N-1} \cdot w^{m-1} \left| \frac{\partial w}{\partial r} \right|^{p-2} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} \right) \in c(Q), \tag{13}$$

После интегрирования уравнения (13) с учетом (9) выражение для функции температуры f(t) приобретает вид:

$$f(t) = t^{2N} \cdot \left[f_o + \int_{t_1}^{t} b_1(t) \cdot t^{2N} \cdot dt \right], \tag{14}$$

Раскрывая выражение для температурного коэффициента теплопроводности $b_1(t)$:

$$f(t) = (c + 2N \cdot t)^{2N} \left[f_o - \frac{4 \cdot (m-1) \cdot N^{\frac{1}{1-m}}}{2} \int_0^t b(t) \cdot (c + 2N \cdot t)^{\frac{1}{m-1} + 2N} dt \right], \tag{15}$$

Анализ полученного выражения позволяет сделать следующие выводы при условии представления продуктов горения на пожаре неньютоновской (вязкоупругой) жидкостью:

- распространение фронта теплового импульса в продуктах горения происходит с конечной скоростью;
- ширина фронта теплового импульса происходит монотонно за счет объемного тепловыделения в процессе сгорания пожарной нагрузки, при этом его амплитуда возрастает;
- газовая среда на пожаре охватывается тепловым импульсом полностью.

Литература

1. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука,1970. – 512 с.
2. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопередачи // Региональная энергетика: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып.9. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. —2013. – С. 128–144.
3. Курдюмов С.П., Змитренко Х.В. PMTF, 1977, № 1, 3-6. Курдюмов С.П. Москва, ИФМ АН СССР в 1979 г., 302 с.
4. Л. К. Мартинсон, К. Б. Павлов. Вычислительная математика и математическая физика, 1972, вып. 12, № 4, с. 1048.
5. Л. К. Мартинсон, Эволюция проводящего импульса в нелинейной среде с объемным поглощением. ТНТ, 1983, V. 21, Issue 4, 801-803
6. Арипов М. Метод стандартного уравнения для решения нелинейной краевой задачи. Ташкент 1986 137 с.