

*НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА*

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И СООБЩЕНИЙ

Том 2

*XV Минский международный форум по тепло- и массообмену
XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum
23 – 26 мая 2016 г.*

Минск 2016

4. Пат. 2219435 РФ. Способ бесплажного сжигания топлива / М. С. Вигриянов, В. В. Саломатов, С. В. Алексеенко. Оpubл. 20.12.2003, приоритет от 11.02.2002, патентообладатель ИТ СО РАН.

5. Onischuk A. A., Stasio S. di, Karasev V. V., Baklanov A. M., Makhov G. A., Vlasenko A. L., Sadykova A. R., Shipovalov A. V., Panfilov V. N. Evolution of structure and charge of soot aggregates during and after formation in a propane/air diffusion flame // J. of Aerosol Science. 2003. Vol. 34. Pp. 383–403.

6. Алексеенко С. В., Ануфриев И. С., Вигриянов М. С., Копьев Е. П., Шарыпов О. В. Характеристики сжигания дизельного топлива в автономном горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // ФГВ. 2016. (принята в печать).

7. Ishiguro T., Takatori Y., Akihama K. Microstructure of diesel soot particles probed by electron microscopy: First observation of inner core and outer shell // Combustion and Flame. 1997. Vol. 108, Iss.1-2. Pp. 231–234.

УДК 536.46

МЕТОД РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ В РАМКАХ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В. А. Архипов, С. С. Бондарчук, А. С. Жуков

*Научно исследовательский институт прикладной математики и механики
Национального исследовательского Томского государственного университета,
г. Томск, Россия*

В рамках феноменологической теории Зельдовича – Новожилова [1, 2] одномерное нестационарное уравнение энергии для k -фазы можно представить в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + u \frac{\partial T}{\partial x} + (1-c) Q z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где t – время; T , c – температура и доля разложившегося вещества k -фазы; $x \in [0, \infty)$ – координата по нормали к движущейся со скоростью u плоской поверхности; a – коэффициент температуропроводности; R , z , E – универсальная газовая постоянная, отношение предэкспонента к плотности материала, его энергия активации; Q – отношение тепловыделения к теплоемкости k -фазы.

Граничные условия при $x = 0$ формулируются в зависимости от конкретики задачи. При $x \rightarrow \infty$ ставится условие равенства температуры начальному значению T_0 : $T = T_0$.

Изменение концентрации c разложившегося вещества k -фазы описывается уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} = u \frac{\partial c}{\partial x} + (1-c) z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) ставится граничное условие: при $u > 0$ $c|_{x \rightarrow \infty} = 0$.

При формулировке модели кроме традиционных допущений (гомогенности, однородности, анизотропности, плоскости поверхности горения и др. [1–3]) привлекаются определенные полностью или частично экспериментально зависимости, например:

– зависимость линейной скорости горения от давления p и начальной температуры T_0 :

$$u = u_0(T_0) p^v; \quad (3)$$

– заданная величина температуры поверхности $T_s = T|_{x=0}$ вида $T_s = \text{const}$ или в зависимости от давления $T_s = T_s(p)$;

– скорость горения химического процесса разрушения k -фазы в виде функции Аррениуса

$$u = z_* \exp\left(-\frac{E_*}{RT_s}\right), \quad (4)$$

где z_* , E_* – некоторые константы.

Эти зависимости связаны с дополнительными предположениями о постоянстве температуры поверхности, баланса тепловыделения в газовой фазе и в k -фазе и пр.

В общем случае предполагается, что процесс горения «контролируется» тепловыделением в газовой фазе, а k -фаза рассматривается как частично или полностью инертное тело, тепловая инерционность которого определяет нестационарное горение вещества при резких изменениях давления. В истории исследований нестационарной скорости горения можно упомянуть одну из самых первых моделей [4], включающей уравнение (1) без функции Аррениуса, уравнение (3) и гипотезу $T_s = \text{const}$; модель [5] на основе уравнения (1) без функции Аррениуса и с привлечением соотношений (3), (4).

В данном сообщении представлена методика оценки нестационарной скорости горения, базирующаяся на следующих допущениях.

1. Температура горения не зависит от давления. Изменение давления, при котором происходит горение, обуславливают изменение теплового потока q из газовой в конденсированную фазу за счет изменения расстояния между поверхностью горения и зоной тепловыделения в газовой фазе, т. е. не вследствие изменения температуры горения.

2. При постоянном внешнем (внутрикамерном) давлении p на поверхности горения устанавливается тепловое равновесие, а именно: поток тепла $q(p)$ из газовой в конденсированную фазу равен потоку тепла от поверхности горения $x = 0$ вглубь k -фазы ($x > 0$) и определяется граничным условием

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0} = q(p), \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности конденсированного материала.

3. При изменении внутрикамерного давления тепловой поток из газовой в k -фазу определяется его значением для текущего «стационарного» уровня давления.

4. Температура поверхности горения есть заданная постоянная величина.

Математическая модель расчета нестационарной скорости горения включает уравнение (1) с граничными условиями (5) и $T|_{x \rightarrow \infty} = T_0$, и уравнение (2) с граничным условием $c|_{x \rightarrow \infty} = 0$.

Линейная скорость горения, представляющая скорость перемещения изотермической поверхности $T_s = \text{const}$ вглубь k -фазы, определяется из уравнения теплового баланса на поверхности горения $x = 0$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x=0} + u \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + (1 - c|_{x=0}) Q z \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) = 0.$$

Требуемая для решения сформулированной задачи зависимость $q(p)$ определяется через расчетное значение поверхностного градиента температуры k -фазы (соотношение (5)) решением серии стационарных аналогов уравнений (1) и (2) при граничных условиях

$$T|_{x=0} = T_s; \quad T|_{x \rightarrow \infty} = T_0; \quad c|_{x \rightarrow \infty} = 0$$

для скорости горения $u = u_0 p^v$ в диапазоне давлений $p \in [p_1; p_2]$. Отметим, что зависимость $q(p)$ строится для закона скорости горения для конкретной начальной температуры T_0 при $u = \text{const}$ и $v = \text{const}$.

Изменение внутриваллистических параметров в камере сгорания объемом V , снабженной соплом с площадью критического сечения S_* , определяется из осредненных уравнений баланса массы и энергии:

$$V \frac{d\rho}{dt} = \rho_p S u - S_* \Gamma(\gamma) \sqrt{p\rho},$$

$$\frac{V}{\gamma-1} \frac{dp}{dt} = Q_p \rho_p S u - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} S_* \Gamma(\gamma) \sqrt{p\rho}, \quad \Gamma(\gamma) = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}},$$

где ρ , ρ_p – плотности газа и конденсированного материала; S – поверхность горения; Q_p – теплота сгорания; γ – отношение теплоемкостей.

Результаты расчетов нестационарной скорости горения при резком (скачкообразном) сбросе давления представлены на рис. 1 в безразмерных переменных u/u_s , $\tau = t/(a/u_s^2)$, где a/u_s^2 – время релаксации прогретого слоя k -фазы. При расчетах варьировался параметр χ – отношение времени релаксации свободного объема камеры сгорания к времени релаксации прогретого слоя k -фазы:

$$\chi = \frac{p_0 u_s}{RT a \rho_p} \frac{V}{S},$$

где p_0 , u_s – стационарные значения давления и скорости горения перед сбросом давления.

Расчеты проведены для системы, физические характеристики которой приведены в [2, 5] для близких условий. На рис. 2 представлены результаты аналогичных расчетов в рамках феноменологической теории с переменной температурой поверхности горения [5].

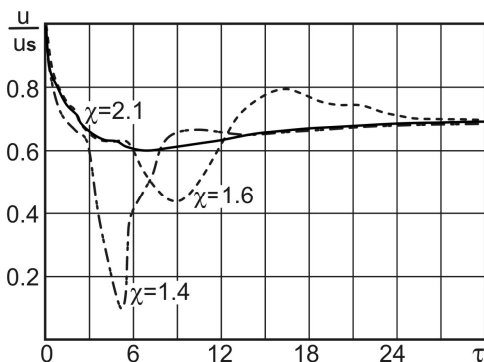


Рис. 1. Зависимость скорости стационарного горения от времени при резком сбросе давления

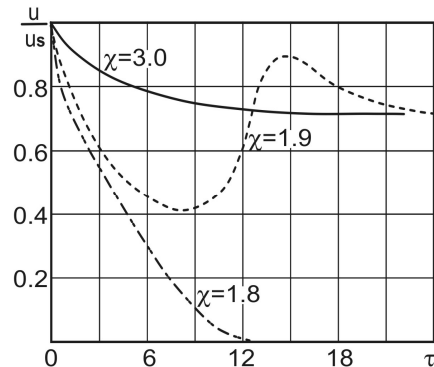


Рис. 2. Зависимость скорости стационарного горения от времени [5]

Таким образом, предложен новый алгоритм оценки нестационарной скорости горения в рамках феноменологической теории Зельдовича – Новожилова. Сравнение полученных результатов с параметрами вычислений по ZN-модели показали их удовлетворительное качественное совпадение. Преимущество предложенного подхода заключается в сокращении объема привлекаемой для замыкания задачи экспериментальной информации.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.578.21.0034, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI57814X0034.

Литература

1. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975. – 131 с.
 2. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973. – 176 с.
 3. Гусаченко Л. К., Зарко В. Е. Анализ нестационарных моделей горения твердых топлив (обзор) // ФГВ. 2008. Т. 44, № 1. С. 35–48.
 4. Новожилов Б. В. Переходные процессы при горении порохов // ПМТФ. 1962. № 5. С. 83–88.
 5. Земских В. И., Новожилов Б. В., Тимченко А. В. Переходные режимы горения конденсированных систем в полужамкнутом объеме // Химическая физика. 1988. Т. 7, № 10. С. 1392–1398.
-

УДК 621.43.05-62/-64

СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ПРИ РАБОТЕ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

М. С. Ассад, В. В. Грушевский, О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

В последние годы большое внимание уделяется решению одной из наиболее острых экологических проблем, связанной с загрязнением окружающей среды канцерогенными углеводородами в продуктах сгорания автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. Среди канцерогенных углеводородов наибольшую опасность представляют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), такие как бензо(б)флуорантен, бензо(ж)флуорантен, фенантрен $C_{14}H_{10}$ и особенно бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$ [2].

Содержание ПАУ в отработавших газах ДВС зависит от многих факторов: режима работы ДВС, состава используемого топлива, типа ДВС и др. В данной работе выполнено сравнение содержания основных ПАУ в отработавших газах ДВС при вариации трех марок бензина и некоторых режимов работы ДВС. Определение ПАУ производилось методом хроматографического анализа. Концентрации некоторых ПАУ в отработавших газах бензина до и после каталитического нейтрализатора при работе ДВС в режиме нагрузки показаны на рис. 1 и 2.