

Скорость стационарной волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации

Кабилов М.М.*, Садриддинов П.Б.***, Гулбоев Б.Дж.*, Холов О.А.***

*Российско-Таджикский (славянский) университет, Душанбе

**Институт математики им. А.Джураева АН Республики Таджикистан, Душанбе

***Дангаринский государственный университет, Дангара

Рассмотрено горение водородо- и метановоздушной смеси газов в инертной пористой среде при подобии полей температуры среды и концентрации недостающего компонента смеси. Получена связь между функциями температуры и концентрации, а также уравнение для численного расчета распределения температуры. Численные расчеты проведены для различных составов водородо- и метановоздушной смеси газов и выяснено их влияние на скорость волны. Изучены зависимости скорости волны, равновесной температуры, характерного размера зоны горения и коэффициента диффузии недостающего компонента от скорости вдува газа.

Ключевые слова: температура среды, скорость волны, численный метод, скорость химической реакции, фильтрационное горение газов, волны горения, уравнение энергии, число Льюиса, пористая среда

1. Введение

Процессы фильтрационного горения газов (ФГГ) в инертных пористых средах представляют особый интерес в различных приложениях энергетики, химической и строительной технологий, экологии и пожаро-взрывобезопасности [1]. В связи с этим изучение таких процессов становится актуальным.

В теории горения для описания диффузионных процессов обычно применяется приближение так называемой независимой диффузии [2]. Приближение независимой диффузии оправданно в тех случаях, когда в горючей смеси имеется избыток инертного газа. Такой избыток, например, имеет место в широко используемых углеводородо-воздушных горючих смесях.

В работе [3] было показано, что для случая одного реагирующего компонента при числе Льюиса равном единице существует линейная связь

между распределениями температуры и концентрации — подобие полей температуры и концентрации. В частности, исследуется распространение пламени в прямоугольной трубе вблизи предела распространения при условии равенства коэффициентов диффузии недостающего реагента и температуропроводности. Это свойство может быть обобщено для случая сложной химической реакции многих компонентов с приближенно одинаковым молекулярным весом.

Отметим работы [4,5], в которых при определении соотношений для скорости стационарной волны ФГГ учтены коэффициенты диффузии компонентов смеси газов и рассмотрены подобию полей температуры среды и концентрации компонентов.

В статье [6] указывались причины, по которым процессы ФГГ чрезвычайно трудны для численного моделирования.

В настоящей работе предпринята попытка описать распространение стационарной волны ФГГ с позиции классической теории горения газов [3], то есть при подобии полей температуры и концентрации.

2. Постановка задачи

Рассматривается однотемпературная математическая модель распространения стационарной волны ФГГ [7], состоящая из уравнений балансов энергии среды (пористая среда и смеси газов) и массы недостающего компонента смеси газов, записанных в движущейся с постоянной скоростью u системе координат; а также из интеграла уравнения баланса массы смеси газов и уравнения состояния газа в предположении постоянства давления на фронте волны:

$$\begin{aligned} & (\rho_{10}(u + v_{10})c_p + \rho_2 u c_2) \frac{dT}{dx} = \\ & = (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2) \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho_1 Q \eta_0 J, \\ & \rho_{10}(u + v_{10}) \frac{dn}{dx} = \rho_1 D \frac{d^2 n}{dx^2} - \rho_1 J, \\ & J = nk_0 \exp(-E/RT), \\ & \rho_1(u + v_1) = \rho_{10}(u + v_{10}), \quad \rho_{10} T_0 = \rho_{1e} T_e. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь T — температура среды; n — относительная массовая концентрация недостающего компонента; ξ и τ — координата и время соответственно; v_1 — скорость потока газа в порах; ρ_2 , c_2 — приведенные плотности и теплоемкости пористой среды и ρ_1 , c_p — те же величины для смеси газов; λ_1 , λ_2 — коэффициенты теплопроводности газовой и твердой фаз; α_1 , α_2 — объемные содержания фаз; Q — тепловой эффект реакции; η_0 — первоначальная концентрация недостающего компонента; J — скорость химической реакции; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; k_0 — предэкспонент; ρ_{10} , v_{10} , T_0 — исходные значения плотности, скорости вдува и температуры газовой фазы.

Граничные условия системы (1) задаются на бесконечности:

$$\begin{aligned} x = -\infty : \quad & T = T_0, \quad n = 1, \\ x = +\infty : \quad & \frac{dT}{dx} = 0, \quad \frac{dn}{dx} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как из-за сильной зависимости скорости реакции от температуры вся реакция будет протекать при температурах близких к равновесной температуре

$$T_e = T_0 + \frac{Q \eta_0}{c_p \left(1 + \frac{\varphi}{1 + u_0}\right)},$$

где $\varphi = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_{10} c_p}$, $u_0 = \frac{v_{10}}{u}$, то из интеграла системы (1) получим связь между функциями температуры T и концентрации n :

$$n = \frac{c_p (T_e - T)}{Q \eta_0},$$

при условии, что число Льюиса равно единице:

$$Le = \frac{\rho_1 c_p D}{\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2}.$$

Воспользуемся этой связью и из первого уравнения системы (1) после преобразования имеем:

$$\begin{aligned} & a \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{dT}{dx} + a_1 \left(1 - \frac{T}{T_e}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = 0, \\ & a = \frac{\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2}{\rho_{10} c_p (u + v_{10}) + \rho_2 c_2 u}, \\ & a_1 = \frac{k_0 c_p \rho_{10} T_0}{\rho_{10} c_p (u + v_{10}) + \rho_2 c_2 u}. \end{aligned} \quad (3)$$

Численно уравнение (3) решалось методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Скорость стационарной волны u , входящую в коэффициент a и a_1 , подбирали из выполнения граничных условий:

$$x = -\infty, \quad T = 0, \quad x = +\infty, \quad T = T_e.$$

Численный расчет проводился для трёх составов водородо- и метановоздушных смесей. В каждом случае скорость вдува варьировали от 0,5 м/с до 7 м/с с интервалом 0,5 м/с. Все расчетные варианты распределения температуры имеют подобный вид (рис. 1).

На рис. 1 на оси абсцисс находится безразмерная продольная координата X' ($X = l \cdot N \cdot X'$, где $N = 1000$ — количество пропущенных шагов; $l = 0,1$ м — характерный размер). На оси ординат приводится температура системы в кельвинах, которая изменяется от начальной температуры T_0 до равновесной температуры T_e .

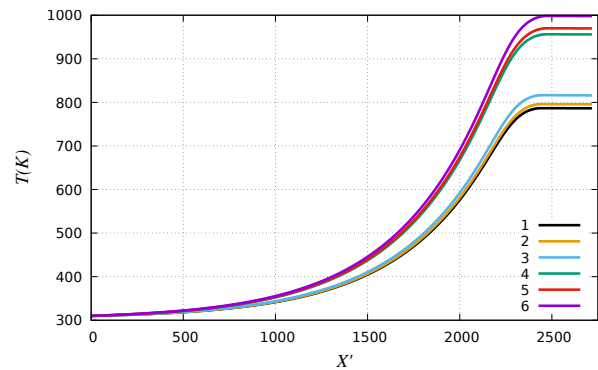


Рис. 1. Графики распределения температуры при различных составах водородо-воздушной смеси и скорости вдува газа $v_{10} = 1$ и 7 м/с, которые соответствуют кривым: 1, 4 — 64% H_2 +воздух; 2, 5 — 55% H_2 +воздух; 3, 6 — 23% H_2 +воздух

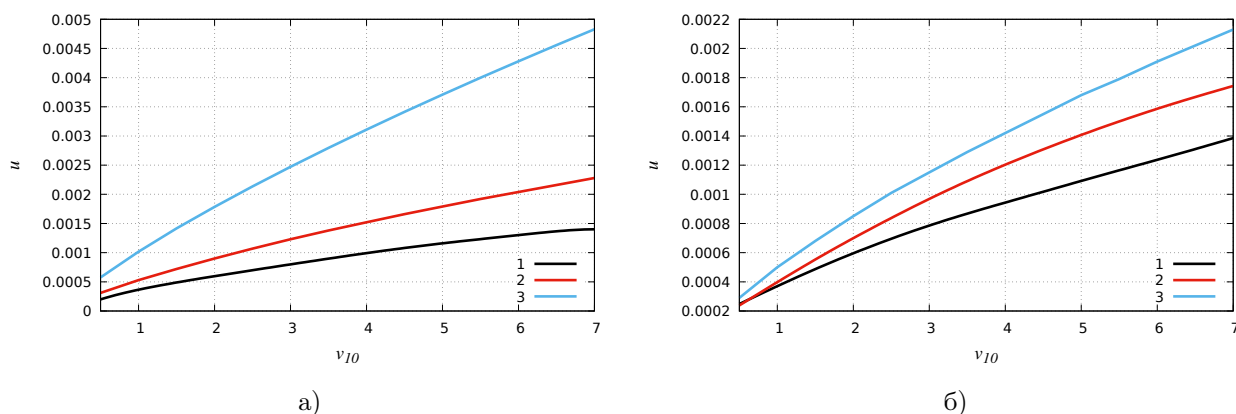


Рис. 2. Графики зависимости скорости волны u (м/с) от скорости вдува газа v_{10} (м/с) при различных составах следующих смесей: а) 1 – 65% H_2 +воздух, 2 – 55% H_2 +воздух, 3 – 23% H_2 +воздух; б) 1 – 7,5% CH_4 +воздух, 2 – 8,5% CH_4 +воздух, 3 – 9,5% CH_4 +воздух

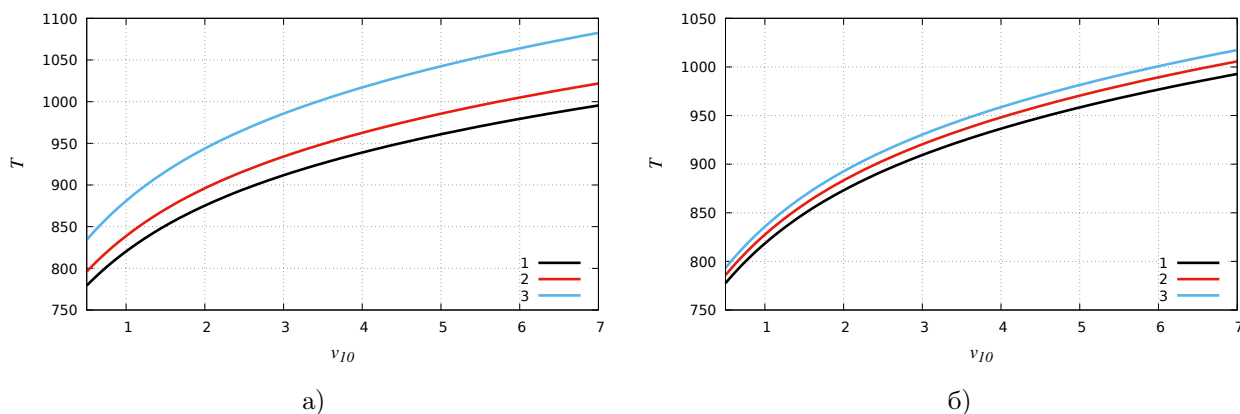


Рис. 3. Графики зависимости равновесной температуры T_e (K) от скорости вдува газа v_{10} (м/с) при различных составах смесей: а) 1 – 65% H_2 +воздух, 2 – 55% H_2 +воздух, 3 – 23% H_2 +воздух; б) 1 – 7,5% CH_4 +воздух, 2 – 8,5% CH_4 +воздух, 3 – 9,5% CH_4 +воздух

Кривые 1–6 на рис. 1 показывают распределения температуры при различных составах водородо-воздушной смеси и скорости вдува газа $v_{10} = 1$ и 7 м/с соответственно: 1, 4 – 65% H_2 +воздух; 2, 5 – 55% H_2 +воздух; 3, 6 – 23% H_2 +воздух.

3. Результаты

Результаты численных расчётов при соответствующих значениях физико-химических параметров системы приведены в виде графиков на рис. 2–5.

Кривые расчётных зависимостей скорости волны от скорости вдува газа в пористую среду при различных составах водородо- и метановоздушных смесей монотонно возрастающие (рис. 2).

Значения скорости волны на рис. 2 соответствуют второму режиму низких скоростей (РНС2) $10^{-3} - 10^{-1}$ м/с [8].

На рис. 3 приведены кривые зависимости равновесной температуры T_e от скорости вдува газа при различных составах водородо- и метановоздушных смесей. На рисунке показано, что увеличение доли недостающего компонента смеси и относительно большие скорости вдува приводят к увеличению равновесной температуры и этому соответствует возрастание скорости волны (рис. 2).

На рис. 4 приведены кривые зависимости характерного размера зоны горения L (м) от скорости вдува газа v_{10} (м/с) при различных составах водородо- и метановоздушных смесей. Сравнение кривых на рис. 4 показывает, что увеличение доли недостающего компонента приводит к уменьшению размера зоны горения для обеих смесей. Толщина зоны горения метановоздушной смеси больше по сравнению с толщиной при горении водородо-воздушной смеси.

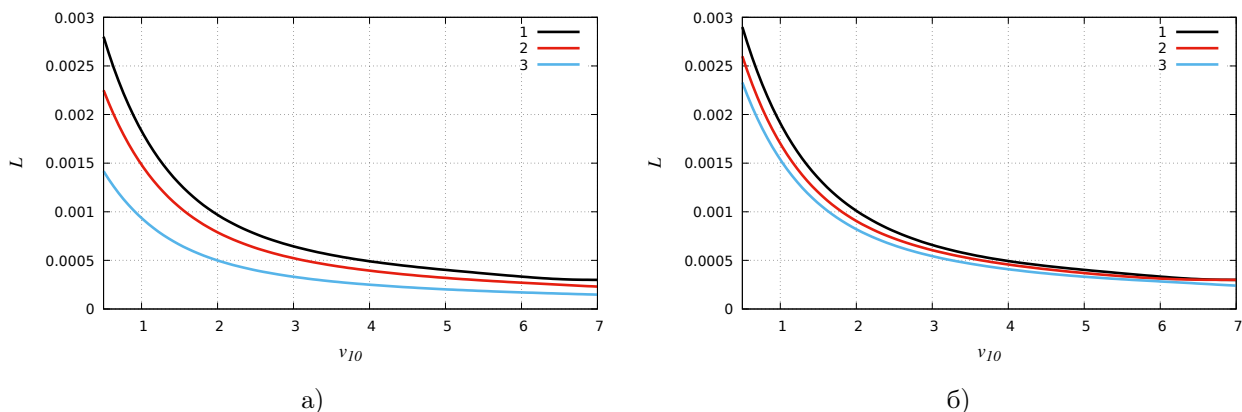


Рис. 4. Графики зависимости характерного размера зоны горения L (м) от скорости вдува газа v_{10} (м/с): а) 1 — 65% H_2 +воздух, 2 — 55% H_2 +воздух, 3 — 23% H_2 +воздух; б) 1 — 7,5% CH_4 +воздух, 2 — 8,5% CH_4 +воздух, 3 — 9,5% CH_4 +воздух

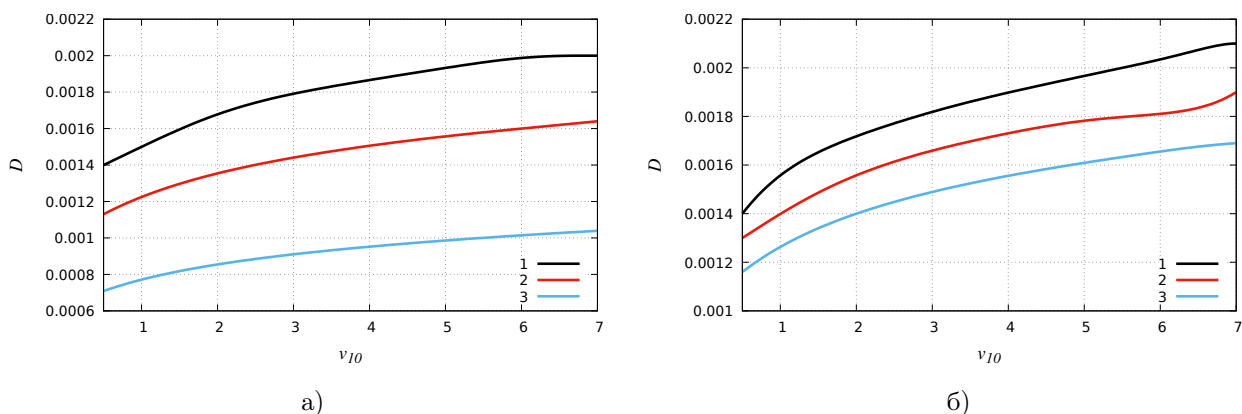


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента диффузии D ($\text{м}^2/\text{с}$) от скорости вдува газа v_{10} (м/с): а) 1 — 65% H_2 +воздух, 2 — 55% H_2 +воздух, 3 — 23% H_2 +воздух; б) 1 — 7,5% CH_4 +воздух, 2 — 8,5% CH_4 +воздух, 3 — 9,5% CH_4 +воздух

На рис. 5 приведены кривые зависимости коэффициента диффузии недостающего компонента смеси D от скорости вдува газа v_{10} (м/с) при различных составах водородо- и метановоздушных смесей. Расчеты соответствуют интуитивному представлению о том, что коэффициент диффузии D возрастает с увеличением скорости вдува и доли недостающего компонента смеси.

Далее, зная зависимости толщины зоны горения L и скорости распространения u от скорости вдува смеси v_{10} при различных составах смесей, подсчитано время горения топлива t (сек) (табл. 1). Из таблицы заключаем, что для всех составов смесей время горения топлива уменьшается с увеличением скорости вдува. Кроме того, с уменьшением процентного содержания водорода в смеси время горения уменьшается. В случае метановоздушной смеси увеличение процентного содержания метана также приводит к уменьшению времени горе-

ния при всех фиксированных значениях скорости вдува.

4. Заключение

Режим распространения стационарной волны горения водородо- и метановоздушных смесей в инертной пористой среде при подобию полей температуры среды и концентрации недостающего компонента соответствует РНС2 фильтрационного горения газов. Увеличение доли недостающего компонента приводит к относительному уменьшению размера зоны горения в обеих смесях. Время горения смесей уменьшается с увеличением скорости вдува и доли недостающего компонента смеси. Бóльшее значение коэффициента диффузии недостающего компонента при фильтрационном горении смесей газов по сравнению с его значением при горении этих же смесей в отсутствие пористой среды объясняется бóльшим значением отношения объемных

Таблица 1

| v_{10} , м/с | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 65% H_2 | 4.18965 | 1.39015 | 0.73559 | 0.4722 | 0.33587 | 0.255 | 0.2025 |
| 55% H_2 | 2,344821 | 0,756817 | 0,393457 | 0,248583 | 0,174291 | 0,130733 | 0,102652 |
| 23% H_2 | 0,767518 | 0,24147 | 0,123331 | 0,076755 | 0,053222 | 0,039499 | 0,03071 |
| 7,5% CH_4 | 4,4638 | 1,4878 | 0,7902 | 0,5074 | 0,3622 | 0,2686 | 0,2192 |
| 8,5% CH_4 | 3,284 | 1,0728 | 0,5698 | 0,3627 | 0,2561 | 0,1911 | 0,1524 |
| 9,5% CH_4 | 2,5617 | 0,8314 | 0,4338 | 0,2744 | 0,1928 | 0,1498 | 0,1136 |

теплоёмкостей пористой среды и смеси газов, а также их теплопроводностей.

Список литературы

- [1] Babkin V.S., Korzhavin A.A., Bunev V.A. Propagation of premixed explosion flames in porous media // *Combust. Flame*. 1991. V. 87. P. 182–190 .
- [2] Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд. М.: Наука, 1967. 491 с.
- [3] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 480 с.
- [4] Кабилов М.М., Гулбоев Б.Дж. ФГГ при симметричности профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов газовой смеси // *Доклады АН РТ*. 2013. Т. 56, № 1. С. 35–43.
- [5] Кабилов М.М., Гулбоев Б.Дж., Садриддинов П.Б., Халимов И.Х. Численное моделирование ФГГ при симметричности профилей температуры и концентрации компонентов // *Известия АН РТ*. 2013. № 1(150). С. 67–75.
- [6] Лаевский Ю.М., Яушева Л.В. Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуровневых полу-явных разностных схем // *Вычислительные технологии*. 2007. Т. 12, № 2. С. 90–103.
- [7] Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю.Ш. Матроса. Новосибирск. 1988. С. 108–145.
- [8] Бабкин В.С., Коржавин А.А., Лаевский Ю.М. О множественности режимов фильтрационного горения газов // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 436, № 6. С. 756–759.

The speed of stationary wave of filtration combustion of gases in the same fields of temperature and concentration

M.M.Kabilov*, P.B.Sadriddinov**, B.J.Gulboev*, O.A.Kholov***

* Russian-Tajik (slavic) University,

** Dzhuraev Institute of Mathematics, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan

*** Dangara state University

Combustion of hydrogen-methane-air mixtures of gases in an inert porous medium is considered when the temperature fields of the medium and the concentration of the missing component of the mixture are similar. The relationship between the functions of temperature and concentration, as well as the equation for the numerical calculation of the temperature distribution, are obtained. Numerical calculations were made for different compositions of the hydrogen-methane-air mixture of gases and their effects on the wave velocity were determined. Dependences of the wave velocity, the equilibrium temperature, the characteristic size of the combustion zone, and the diffusion coefficient of the missing component on the gas injection rate are studied.

Keywords: the temperature of the environment, wave speed, numerical method, the rate of chemical reactions, filtration combustion of gases, the combustion wave, the energy equation, the number of Lewis, porous medium



Многофазные системы:
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации
Программным комитетом VI Российской конференции
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»