

УДК 536.46

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

© 2023 К. М. Моисеева<sup>a</sup>, А. Ю. Крайнов<sup>b</sup>

*Томский государственный университет,  
просп. Ленина, 36, г. Томск 634050, Россия,*

E-mails: <sup>a</sup>MoiseevaKM@mail.tsu.ru, <sup>b</sup>akrainov@ftf.tsu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.; после доработки 01.08.2022 г.;  
принята к публикации 29.09.2022 г.

Представлены результаты исследования горения пропано-воздушной смеси в цилиндрическом канале. Актуальность исследования связана с необходимостью изучения процессов распространения пламени в газовых смесях в условиях закрытых объёмов. Решение задачи выполнено численно для двухмерной осесимметричной постановки. Метод решения основан на методе Ван-Леера для расчёта потоков массы, импульса и энергии на гранях расчётных ячеек. Показано формирование тюльпанообразного пламени. Показано, что результаты численного исследования соответствуют данным эксперимента: формирование тюльпанообразного пламени возможно для смесей с составом, близким к стехиометрическому. Стадии формирования пламени соответствуют описаниям из литературы: расширяющееся в сторону боковой стенки пламя, вытянутое в осевом направлении пламя, пламя с «юбкой», тюльпанообразное пламя.

**Ключевые слова:** горение, математическое моделирование, газовая динамика, пропан.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.110

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию процессов зажигания и горения газовых смесей посвящено много работ и публикаций в научной литературе. В исследованиях горения газовых смесей основными вопросами являются определение критических условий зажигания с последующим выходом на устойчивый режим горения и определение скорости распространения пламени по газовой смеси.

Скорость горения газовых смесей, в частности, исследовалась в работах [1–8]. В [1–3] определено влияние состава газовой смеси на скорость её горения. В работе [1] использованы детальные кинетические механизмы [2, 3] и показано, что разбавление метано-воздушной смеси этано- или пропано-воздушной смесью приводит к увеличению скорости распространения пламени.

Экспериментальные исследования скорости распространения пламени водородо-воздушной и пропано-воздушной смеси приведены в [4]; в работе показано возникновение тюльпанообразного пламени и проанализированы поля давлений. Сделан вывод, что давление не является первопричиной возникновения искажённой формы пламени пропано-воздушной смеси. Особенностью работы [4] является получение экспериментальных результатов по тюльпанообразному пламени для пропановых смесей. Ранее утверждалось, что такого рода неустойчивость характерна для водородо-воздушной смеси.

В работе [5] представлены зависимости скорости распространения пламени пропано-воздушной смеси от состава. Результаты получены экспериментально.

В [6, 7] решены задачи об искровом зажигании и горении пропано-воздушных смесей. Определена зависимость минимальной энергии искрового зажигания и нормальной скорости распространения пламени в смеси от состава. Сопоставление результатов расчёта с работами [5, 8] показывает хорошее согласие результатов с данными экспериментов [8] в диапазоне значений коэффициента избытка горючего от 0.8 до 1. Нижний предел воспламеняемости соответствует данным [5].

При распространении пламени в узком канале существенное влияние могут оказывать процессы газовой динамики. В частности, возникает тепловое расширение газа, и при распространении пламени в сторону стенок канала возникает поджатие смеси и ускорение пламени вдоль оси канала. Для водородо-воздушных и пропано-воздушных смесей возможно формирование тьюльпанообразного пламени.

Представляет интерес исследование скорости распространения пламени в узком канале в зависимости от состава смеси и характеристик канала. Видимая скорость пламени определяется отношением площади фронта горения к площади канала. Искривление фронта горения приводит к существенному увеличению видимой скорости пламени. Целью настоящей работы является численное моделирование горения пропано-воздушной смеси в узком цилиндрическом канале, определение эволюции формы пламени в зависимости от ширины канала и коэффициента избытка горючего в газе.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Решается задача воспламенения и горения пропано-воздушной смеси, записанная в цилиндрических координатах в двухмерной постановке. Цилиндрический канал имеет протяжённость  $L$ , радиус  $R$ . Очаг воспламенения расположен в области  $0 \leq x \leq x_0$ ,  $-r_0 \leq r \leq r_0$ . В области очага задаётся повышенная температура газа при атмосферном давлении. В газе протекает экзотермическая химическая реакция второго порядка, первого по окислителю и по горючему. Теплоотдача излучением от продуктов сгорания не учитывается. Диссоциация молекул продуктов сгорания при высокой температуре также не учитывается. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры, число Льюиса равно единице. Газ вязкий. Учитывается тепловое расширение и последующее движение газа. Рассматривается канал, закрытый с торцов, и канал с открытым справа торцом.

Система уравнений физико-математической модели представляет собой:

— уравнение сохранения массы газа

$$\frac{\partial r \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_g v_g}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

— уравнения сохранения импульса газа

$$\frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial r (p_g + \rho_g u_g^2)}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_g u_g v_g}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial r \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g v_g}{\partial x} + \frac{\partial r (p_g + \rho_g v_g^2)}{\partial r} = p_g; \quad (3)$$

— уравнение баланса массы кислорода в газе

$$\frac{\partial r \rho_{\text{ox}}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{\text{ox}} u_g}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_{\text{ox}} v_g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( r D_g \rho_g \frac{\partial a_{\text{ox}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_g \rho_g \frac{\partial a_{\text{ox}}}{\partial r} \right) - r \alpha_{\text{ch}} W_{\text{ch}}; \quad (4)$$

— уравнение баланса массы горючего компонента в газе

$$\frac{\partial r \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_f u_g}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_f v_g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( r D_g \rho_g \frac{\partial a_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_g \rho_g \frac{\partial a_f}{\partial r} \right) - r W_{\text{ch}}; \quad (5)$$

— уравнение энергии газа

$$\frac{\partial r E_g}{\partial t} + \frac{\partial r u_g (E_g + p_g)}{\partial x} + \frac{\partial r v_g (E_g + p_g)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( r \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + r Q_{\text{ch}} W_{\text{ch}}; \quad (6)$$

— уравнение состояния идеального газа

$$p_g = \rho_g T_g R_g. \quad (7)$$

Начальные условия:

$$u_g(x, r, 0) = v_g(x, r, 0) = 0, \quad p_g(x, r, 0) = p_{gb},$$

$$T(x, r, 0) = \begin{cases} T_h, & 0 \leq x \leq x_0, \quad 0 \leq r \leq r_0, \\ T_b, & 0 < x \leq L, \quad r_0 < r \leq R, \\ T_b, & x_0 < x \leq L, \quad 0 \leq r \leq r_0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_g(x, r, 0) = \frac{p_{gb}}{R_g T_g(x, r, 0)}, \quad \rho_{\text{ox}}(x, r, 0) = a_{\text{ox},b} \rho_g(x, r, 0), \quad \rho_f(x, r, 0) = a_{f,b} \rho_g(x, r, 0).$$

Граничные условия на оси симметрии ( $r = 0$ ):

$$\frac{\partial u_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{\text{ox}}(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_f(x, 0, t)}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

Граничные условия при  $x = 0$ :

$$u_g(0, r, t) = \frac{\partial v_g(0, r, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_g(0, r, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_g(0, r, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_f(0, r, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{\text{ox}}(0, r, t)}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

На стенке канала при  $r = R$  задаются условия непротекания и адиабатики. При открытом справа канале при  $x = L$  задаются атмосферное давление и температура. При закрытом справа канале при  $x = L$  задаются условия, аналогичные (9).

В уравнениях (1)–(10) приняты следующие обозначения:

$$W_{\text{ch}} = k_0 \rho_{\text{ox}} \rho_f \exp(-E_a / (R_u T_g))$$

— скорость изменения массы компонентов смеси за счёт химического реагирования,  $\alpha_{\text{ch}}$  — коэффициент расхода кислорода в реакции с пропаном,

$$E_g = \rho_g (p_g / (\rho_g (\gamma - 1)) + 0.5 (u_g^2 + v_g^2))$$

— полная энергия газа,  $\lambda_g$  — коэффициент теплопроводности газа,  $\rho_g$  — плотность газа,  $\rho_{\text{ox}}$  — парциальная плотность кислорода в газе,  $\rho_f$  — парциальная плотность пропана в газе,  $D_g$  — коэффициент диффузии газа,  $E_a$  — энергия активации,  $k_0$  — константа скорости химической реакции,  $v$  — скорость вдоль радиального направления,  $Q_{\text{ch}}$  — тепловой эффект реакции,  $R_u$  — универсальная газовая постоянная,  $r$  — координата вдоль радиального направления,  $T$  — температура,  $p$  — давление,  $t$  — время,  $u$  — скорость вдоль осевого направления,  $x$  — координата вдоль осевого направления. Индексом  $b$  отмечены начальные значения параметров состояния,  $g$  — параметры газа,  $\text{ox}$  — кислород,  $f$  — горючий газ (пропан).

Связь между относительной массовой концентрацией горючего компонента  $a_f$  и окислителя  $a_{\text{ox}}$  в газе и объёмным содержанием горючего компонента  $a_{\text{vol}}$  в смеси определяется из соотношений

$$a_{\text{ox}} = \frac{0.23(100 - a_{\text{vol}})\mu_{\text{air}}}{(100 - a_{\text{vol}})\mu_{\text{air}} + a_{\text{vol}}\mu_f}, \quad a_f = \frac{a_{\text{vol}}\mu_f}{(100 - a_{\text{vol}})\mu_{\text{air}} + a_{\text{vol}}\mu_f}.$$

Здесь  $a_{vol}$  — объёмная процентная концентрация пропана в смеси,  $\mu_f$  — молярная масса пропана,  $\mu_{air}$  — молярная масса воздуха.

Коэффициенты теплопроводности и диффузии газа (с учётом, что число Льюиса равно единице) определяются выражениями:  $\lambda_g = \lambda_0(T_g/T_0)^{2/3}$ ,  $D_g = \lambda_g/(c_g\rho_g)$ , где  $\lambda_0$  — значение коэффициента теплопроводности при  $T_g = 300$  К. Газовая постоянная  $R_g$  рассчитывалась в зависимости от состава смеси из соотношения  $R_g = R_u/(a_{ox}\mu_{ox} + a_f\mu_f + (1 - a_{ox} - a_f)\mu_{N_2})$ , где  $\mu_{N_2}$ ,  $\mu_{ox}$  — молярная масса азота и окислителя. Коэффициент избытка горючего определялся из выражения  $\varphi = \frac{\rho_{f,b}/\rho_{ox,b}}{\rho_{f,st}/\rho_{ox,st}}$ .

Задача (1)–(10) решалась численно с использованием метода Ван-Леера [9]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счёт теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству вдоль осевого и радиального направлений задавался постоянным и равным  $\Delta h_x = \Delta h_r = 10^{-4}$  м. Величина шага по пространству выбиралась таким образом, чтобы схемная диффузия была много меньше диффузии в газе [7]. Шаг по времени определялся из условия устойчивости [10]:

$$\frac{1}{\Delta t} < \frac{1}{\Delta t_x} + \frac{1}{\Delta t_r}, \quad \Delta t_x = \frac{\Delta h_x}{\max\{|u_g| + c_g\}}, \quad \Delta t_r = \frac{\Delta h_r}{\max\{|v_g| + c_g\}},$$

где  $c_g$  — скорость звука в газе.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЯ

Расчёты проводились при следующих значениях размерных величин [6, 7]:

$$\begin{aligned} Q_{ch} &= 42.45 \text{ МДж/кг}, & E_a &= 171.16 \text{ кДж/моль}, & R_u &= 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \\ r_0 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, & T_h &= 1500 \text{ К}, & T_b &= 300 \text{ К}, & p_{gb} &= 0.1 \text{ МПа}, & \lambda_0 &= 0.025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ \mu_g &= (\rho_{air}^0 a_{air,b} + \rho_f^0 a_{f,b}) / (\rho_{air}^0 a_{air,b} / \mu_{air} + \rho_f^0 a_{f,b} / \mu_f), \\ \alpha_{ch} &= 3.64, & \mu_f &= 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, & \rho_{air}^0 &= 1.2 \text{ кг/м}^3, \\ \mu_{air} &= 29.04 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, & \rho_f^0 &= 1.83 \text{ кг/м}^3, & k_0 &= 3.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

Согласно работам [4, 11] для пропано-воздушного пламени могут наблюдаться режимы тюльпанообразного пламени при распространении пламени в закрытом канале. Для исследования была взята пропано-воздушная смесь с содержанием пропана 3–4 процента по объёму, что соответствует коэффициенту избытка горючего  $\phi = 0.77 \div 1$ . Режимы тюльпанообразного пламени в [4] наблюдались для смесей стехиометрического состава,  $\phi = 1$ .

На рис. 1 представлена динамика распространения волны горения пропано-воздушной смеси в закрытом канале радиусом 2.5 см, протяжённостью 20 см при горении стехиометрической пропано-воздушной смеси. На рисунке видны стадии развития горения, соответствующие описанию [4]. Вначале развивается пламя почти полусферической формы, когда пламя ещё не дошло до боковых стенок канала. Затем формируется вытянутый вдоль оси канала фронт пламени. Наблюдается быстрый рост видимой скорости пламени (моменты времени 1.1 и 1.4 мс). Далее возникает удлинённый фронт пламя с «юбкой», касающейся боковых стенок (момент времени 1.4 мс). На следующем этапе развивается форма пламени в виде «тюльпана». При этом последующая эволюция формы «тюльпана» сопровождалась быстрым догоранием языка свежей смеси на оси канала.

Для открытого канала характер перемещения фронта горения меняется. Отсутствуют отражённые волны давления, поджата газ вблизи правой границы не происходит. Видимая скорость распространения пламени увеличивается. Распределения температуры газа в канале представлены на рис. 2.

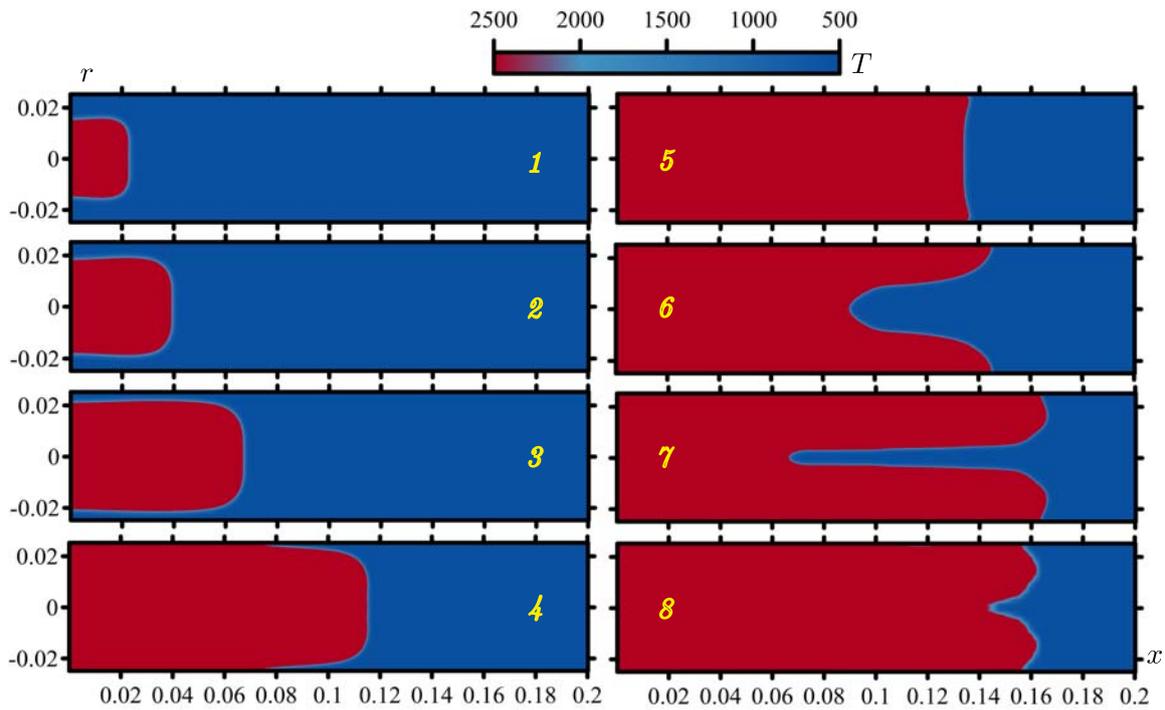


Рис. 1. Распределения температуры газа в закрытом канале при  $\phi = 1$  в моменты времени: 0.5 мс (1), 0.8 мс (2), 1.1 мс (3), 1.4 мс (4), 1.7 мс (5), 2 мс (6), 2.3 мс (7), 2.4 мс (8)

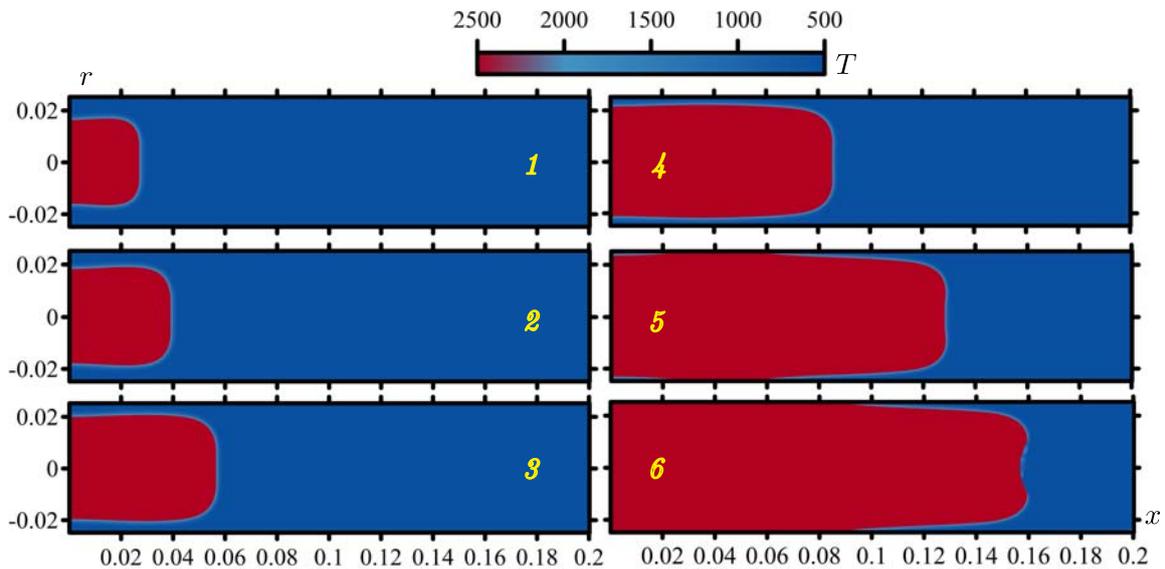


Рис. 2. Распределения температуры газа в открытом канале при  $\phi = 1$  в моменты времени: 0.6 мс (1), 0.8 мс (2), 1.1 мс (3), 1.2 мс (4), 1.4 мс (5), 1.6 мс (6)

Из сравнения рис. 1 и рис. 2 видно, что видимая скорость распространения пламени в открытом канале выше скорости в закрытом канале. Кроме того, в открытом канале тюльпанообразное пламя не формируется. При приближении пламени к открытому торцу имеет место ускорение пламени.

Изменение радиуса канала также меняет характер распространения пламени. На рис. 3 представлены поля температуры газа при горении стехиометрической пропано-воздушной смеси в открытом справа канале радиусом 1.5 см. Из сравнения рис. 2 и 3, определяющих горение

стехиометрической смеси в открытом узком канале различного радиуса, можно видеть, что сужение канала приводит к формированию тюльпанообразного пламени.

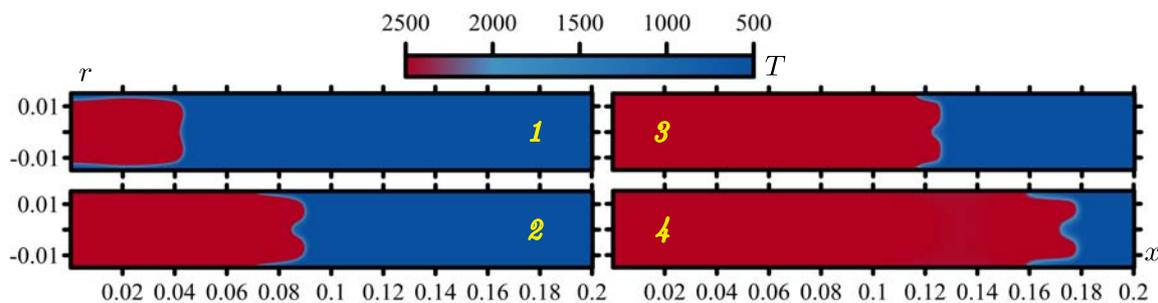


Рис. 3. Распределения температуры газа в открытом канале при  $\phi = 1$  в моменты времени: 0.5 мс (1), 0.75 мс (2), 1 мс (3), 1.25 мс (4)

В закрытом узком канале (рис. 4) согласно результатам расчёта формировалась сложная структура пламени, в которой неоднородность температуры на фронте горения была выражена достаточно существенно. Качественно формирование «тюльпана» соответствовало результатам [4, 11]. Отметим, что фронт пламени перемещается по каналу с пульсирующей скоростью. Пульсации скорости объясняются тепловым расширением газа вдоль оси канала и действием отражённых от стенок канала волн давления.

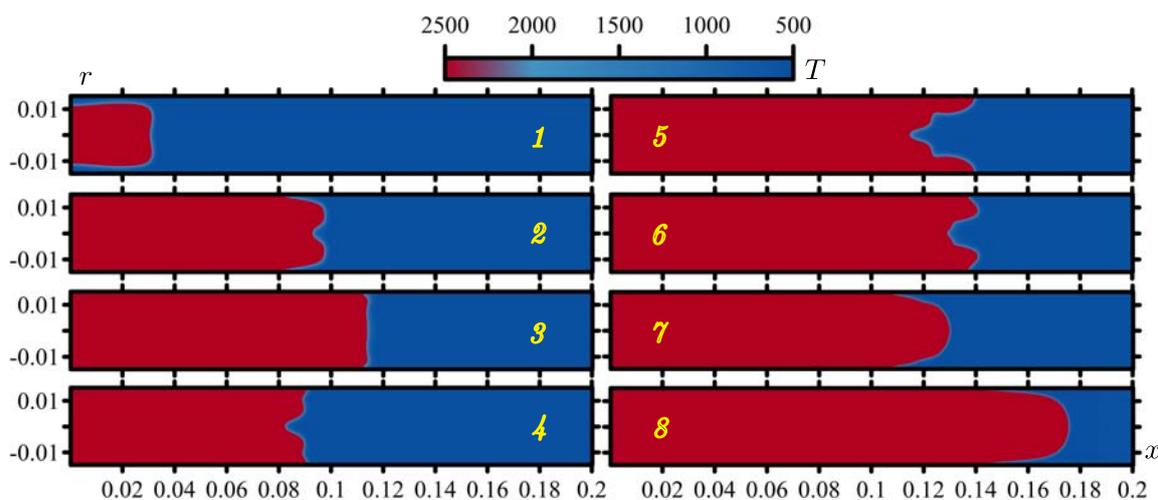


Рис. 4. Распределения температуры газа в закрытом канале при  $\phi = 1$  в моменты времени: 0.4 мс (1), 0.8 мс (2), 1.2 мс (3), 1.4 мс (4), 1.6 мс (5), 1.8 мс (6), 2 мс (7), 2.2 мс (8)

Снижение доли горючего в газе приводит к уменьшению скорости распространения пламени. На рис. 5 представлено распределение температуры газа при горении смеси с коэффициентом избытка горючего 0.78 в закрытом канале радиусом 0.015 м, протяжённостью 0.3 м. В случае горения обеднённой пропано-воздушной смеси наблюдается неоднородность формы пламени вдоль радиуса на начальном этапе развития горения (2–8 мс). С течением времени фронт пламени выравнивается.

Можно заметить, что скорость распространения пламени на рис. 5 по мере продвижения фронта горения стремится к стационарному значению. Для коротких каналов пламя не успевало выйти на стационарный режим распространения (рис. 1, 4). В протяжённых каналах существует участок близки правого торца, где скорость пламени стремится к установившемуся значению.

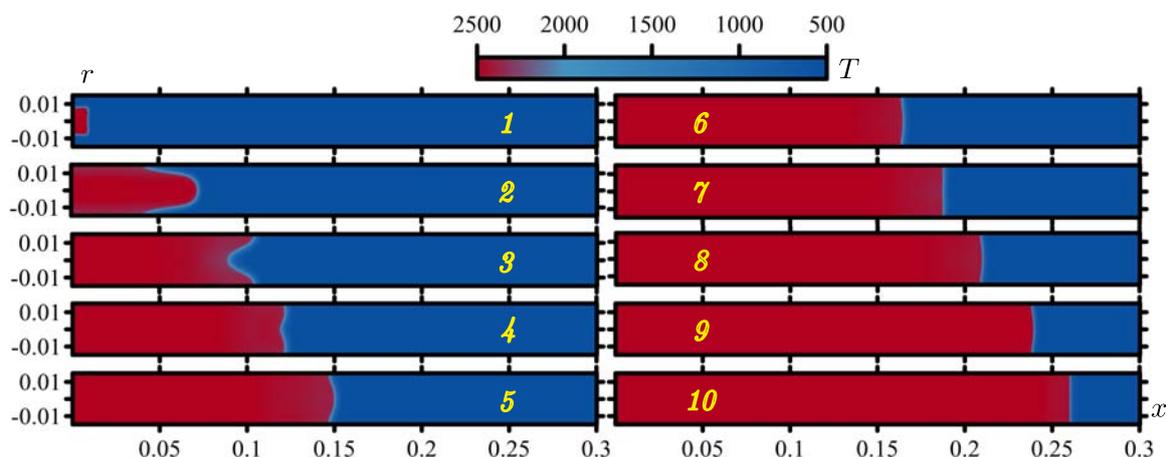


Рис. 5. Распределения температуры газа в закрытом канале при  $\phi = 0.78$  в моменты времени: 0 мс (1), 2 мс (2), 4 мс (3), 6 мс (4), 8 мс (5), 10 мс (6), 12 мс (7), 14 мс (8), 16 мс (9), 18 мс (10)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено численное исследование закономерностей распространения пламени пропановоздушной смеси в узком цилиндрическом канале. Показано формирование тюльпанообразного пламени при горении смесей с составом, близким к стехиометрическому. Результаты численного исследования качественно соответствуют данным эксперимента: формирование тюльпанообразного пламени возможно для смесей с составом, близким к стехиометрическому [4]. Стадии формирования пламени соответствуют наблюдениям из эксперимента: сперва реализуется расширяющееся в сторону боковой стенки пламя, далее пламя вытягивается вдоль оси канала, после формируется пламя с «юбкой», наконец неустойчивость приводит к формированию тюльпанообразного пламени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nilsson E.J.K, van Sprang A., Larfeldt J., Konnov A.A. Effect of natural gas composition on the laminar burning velocities at elevated temperatures // *Fuel*. 2019. V. 253. P. 904–909.
2. Li Y., Zhou C.-W., Somers K.P., et al. The oxidation of 2-butene: a high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene // *Proc. Combustion Institute*. 2017. V. 36. P. 403–411.
3. Konnov A.A. Implementation of the NCN pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism // *Combustion and Flame*. 2009. V. 156. P. 2093–2105.
4. Shen X., He X., Sun J. A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct // *Fuel*. 2015. V. 161. P. 248–253.
5. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
6. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Krainov D.A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // *IOP Conf. Ser. Materials Sci. Engrg*. 2019. V. 696. Article 012011.
7. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Искровое зажигание горючих газов и газозвесей. Томск: изд. СТТ, 2020.
8. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
9. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method // *J. Comput. Phys*. 1979. V. 32, N 1. P. 101–136.
10. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.

11. *Clanet C., Searby G.* On the «tulip flame» phenomenon // *Combustion and Flame*. 1996. V. 105. P. 225–238.

UDC 536.46

**REGULARITIES OF PROPANE-AIR MIXTURE FLAME  
PROPAGATION IN A CYLINDRICAL CHANNEL**© 2023 K. M. Moiseeva<sup>a</sup>, A. Yu. Krainov<sup>b</sup>*Tomsk State University,  
ul. Lenina 36, Tomsk 634050, Russia*E-mails: <sup>a</sup>MoiseevaKM@mail.tsu.ru, <sup>b</sup>akrainov@ftf.tsu.ru

Received 01.08.2022, revised 01.08.2022, accepted 29.09.2022

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the combustion of a propane-air mixture in a cylindrical channel. The relevance of the study is related to the need to study the processes of flame propagation in gas mixtures in closed volumes. The problem is solved numerically for a two-dimensional axisymmetric formulation. The solution method is based on the Van Leer method for calculating mass, momentum, and energy fluxes on the faces of computational cells. The formation of a tulip-shaped flame is shown. It is shown that the results of the numerical study correspond to the experimental data - the formation of a tulip-shaped flame is possible for mixtures with a composition close to stoichiometric. The stages of flame formation correspond to the descriptions from the literature: a flame expanding towards the side wall, an axially elongated flame, a skirted flame, a tulip-shaped flame.

**Keywords:** combustion, mathematical modeling, gas dynamics, propane.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.110

## REFERENCES

1. Nilsson E.J.K, van Sprang A., Larfeldt J., Konnov A.A. Effect of natural gas composition on the laminar burning velocities at elevated temperatures. *Fuel*, 2019, Vol. 253, pp. 904–909.
2. Li Y., Zhou C.-W., Somers K.P., et al. The oxidation of 2-butene: a high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene. *Proc. Combustion Institute*, 2017, Vol. 36, pp. 403–411.
3. Konnov A.A. Implementation of the NCN pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism. *Combustion and Flame*, 2009, Vol. 156, pp. 2093–2105.
4. Shen X., He X., Sun J. A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct. *Fuel*, 2015, Vol. 161, pp. 248–253.
5. Lewis B., Von Elbe G. Gorenje, plamya i vzryvy v gazakh [Combustion, flames and explosions of gases]. Moscow: Mir, 1968 (in Russian).
6. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Krainov D.A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture. *IOP Conf. Ser. Materials Sci. Engrg.*, 2019, Vol. 696, article 012011.
7. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. Iskrovoe zazhiganie goryuchikh gazov i gazovzvesei [Spark ignition of combustible gases and gas suspensions]. Tomsk: STT Press, 2020 (in Russian).
8. E. S. Shchetinkov Fizika gorenija gazov [The physics of the combustion of gases]. Moscow: Nauka, 1965 (in Russian).
9. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method. *J. Comput. Phys.*, 1979, Vol. 32, No. 1, pp. 101–136.

10. Godunov S.K. , Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., et al. Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki [Numerical solution of multidimensional gas-dynamics problems]. Moscow: Nauka, 1976 (in Russian).
11. Clanet C., Searby G. On the «tulip flame» phenomenon. *Combustion and Flame*, 1996, Vol. 105, pp. 225–238.