

Научная статья

УДК 533

doi: 10.17223/19988621/82/11

Особенности формирования пламени пропано-воздушной смеси в узком канале

Ксения Михайловна Моисеева¹, Аружан Ильясовна Кантарбаева²,
Алексей Юрьевич Крайнов³

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ Moiseeva_KM@t-sk.ru

² arukantar@gmail.com

³ akrainov@ftf.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты численного исследования особенностей распространения пламени пропано-воздушной смеси в узком цилиндрическом канале. Постановка задачи основана на подходах газовой динамики реагирующих сред. Метод решения построен на основе метода Ван-Леера для определения потоков на гранях расчетных ячеек. Из решения задачи получены закономерности формирования искривленного фронта горения. Определена видимая скорость распространения пламени в каналах различного радиуса. Полученные результаты качественно соответствуют данным экспериментальных исследований, описанным в научной литературе.

Ключевые слова: скорость горения, пропано-воздушная смесь, математическое моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента СП-134.2022.1.

Для цитирования: Моисеева К.М., Кантарбаева А.И., Крайнов А.Ю. Особенности формирования пламени пропано-воздушной смеси в узком канале // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 82. С. 141–149. doi: 10.17223/19988621/82/11

Original article

Peculiarities of the flame formation of a propane-air mixture in a narrow channel

Kseniya M. Moiseeva¹, Aruzhan I. Kantarbaeva², Aleksey Yu. Krainov³

^{1, 2, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ Moiseeva_KM@t-sk.ru

² arukantar@gmail.com

³ akrainov@ftf.tsu.ru

Abstract. This paper presents a numerical study of the features of propane-air mixture flame propagation in a narrow cylindrical channel. The main purpose of the study is to determine the effect of the channel width on the combustion characteristics of a propane-air mixture with a composition close to stoichiometric. The problem is formulated using the methods of reactive gas dynamics. The solution method is based on the Van Leer method for determining flows on the faces of computational cells. The peculiarities of the combustion front formation and its propagation along the channel are revealed and analyzed. The formation of the curved flame front is shown to have a cyclical nature. The visible flame velocity is obtained as a function of the channel radius. The proposed physical and mathematical model can be used to determine the thermal conditions of operating cylindrical burners.

Keywords: burning velocity, propane-air mixture, mathematical modeling

Acknowledgments: This work was financially supported by the Presidential Scholarship SP-134.2022.1.

For citation: Moiseeva, K.M., Kantarbaeva, A.I., Krainov, A.Yu. (2023) Peculiarities of the flame formation of a propane–air mixture in a narrow channel. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 82. pp. 141–149. doi: 10.17223/19988621/82/11

Введение

Вопросы устойчивого распространения пламени газовых смесей неоднократно исследовались как экспериментально, так и теоретически. Тем не менее остаются моменты, требующие изучения. В частности, одним из привлекающих внимание исследователя вопросов является формирование тюльпанообразных пламен, отличающихся сложной структурой фронта горения.

Такого рода задачи решались, например, в работах [1–11]. В [1] вопрос неоднородности фронта горения газовой смеси исследовался для описания перехода горения в детонацию. В [2] проведено экспериментальное исследование колебательного распространения пропано-воздушного пламени в длинной вертикальной трубе, закрытой с одного края. Сделаны аналитические оценки с определением областей различных режимов горения в зависимости от числа Фруда. В работе [3] проведены эксперименты по сжиганию водородо-воздушной и стехиометрической пропано-воздушной смеси в замкнутом канале, показано формирование тюльпанообразного пламени.

Вопрос причин возникновения пламен со сложной структурой фронта (тюльпанообразных пламен) исследовался неоднократно. Например, в работах [4–8] структура такого пламени объясняется эффектом Дарье–Ландау, вихревым движением продуктов горения, неустойчивостью Тейлора. В работе [3] в качестве объяснения эффекта образования тюльпанообразного пламени предложено совокупное влияние пограничного слоя, турбулентного потока, гидродинамической неустойчивости пламени. Указано, что причиной образования тюльпанообразного пламени не является повышение давления в объеме. В [9] показано, что фор-

мирование тюльпанообразного пламени происходит из-за взаимодействия между движением продуктов сгорания от закрытого торца канала и течением смеси в направлении распространения волны горения. При столкновении продуктов сгорания и несгоревшей смеси идет разрушение вытянутого вдоль стенок фронта горения с формированием тюльпанообразной формы фронта. В работе [10] отмечается, что волна давления, возникающая при расширении фронта пламени в сторону боковых стенок, отвечает за периодическое торможение пламени и играет важную роль в формировании тюльпанообразного пламени. Изменение формы тюльпанообразного фронта пламени исследовано в работе [11]. Показано, что при изменении фронта пламени резко уменьшается скорость движения газа в канале.

Характеристики установившегося режима горения пропано-воздушной смеси известны. В частности, зависимость минимальной энергии искрового зажигания и нормальной скорости горения пропано-воздушной смеси от коэффициента избытка горючего приведена в [12, 13]. В области моделирования горения газовых смесей также существует ряд работ, позволяющих с достаточной точностью воспроизводить данные экспериментальных исследований. Приближения физико-математических моделей в последнее время включают детальную химическую кинетику, турбулизацию потока, вязкость газа. Однако для практических применений такие модели могут оказаться тяжелыми в силу длительности вычислительного алгоритма.

Использование подходов газовой динамики реагирующих сред помогает достаточно подробно описывать газодинамику течения и процессы, происходящие при изменении давления в газе. В частности, на подходе газовой динамики реагирующих сред основаны работы [14, 15], в которых были построены физико-математические модели, позволяющие воспроизвести экспериментальные данные [12, 13].

В настоящей работе поставлена задача исследования структуры пламени пропано-воздушной смеси при горении в узком цилиндрическом канале с использованием подходов газовой динамики. Цель работы – определение влияния ширины канала на особенности сгорания пропано-воздушной смеси с составом, близким к стехиометрическому.

Математическая модель и метод решения

Физико-математическая модель основана на работах [14, 16]. Решается задача воспламенения и горения пропано-воздушной смеси, записанная в цилиндрических координатах в двумерной постановке. Очаг воспламенения расположен в области $0 \leq x \leq x_0$, $0 \leq r \leq r_0$. В области очага задается повышенная температура газа при атмосферном давлении. В газе протекает экзотермическая химическая реакция суммарного 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. Газовая постоянная определяется составом смеси. Учитываются тепловое расширение и последующее движение газа. Рассматривается закрытый с торцов канал.

Физико-математическая постановка задачи включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии газа, сохранения массы горючей компоненты и окислителя в газе, записанные в двумерной осесимметричной постановке. На стенках канала задаются условия непротекания.

Задача решалась численно с использованием метода Ван-Леера [17]. Корректность решения была проверена сравнением решений тестовой задачи по методу Годунова и методу Ван-Леера. Отличие в результатах расчета было минимальным, при этом наблюдалась экономия времени расчета. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству вдоль осевого и радиального направлений задавался постоянным и равным $\Delta h_x = \Delta h_r = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости [14]:

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

c_g – скорость звука в газе, u_g – осевая составляющая скорости газа, v_g – радиальная составляющая скорости газа.

Метод решения и результаты

Расчет задачи был выполнен при следующих значениях исходных величин: $Q_{ch} = 42.45$ МДж/кг, $E_a = 171.16$ кДж/моль, $R_u = 8.31$ Дж/(моль·К), $r_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $T_0 = 1500$ К, $T_{gb} = 300$ К, $p_{gb} = 0.1$ МПа, $\lambda_0 = 0.025$ Вт/(м·К),

$$\mu_g = \frac{\rho_{air}^0 a_{air,b} + \rho_f^0 a_{f,b}}{\rho_{air}^0 a_{air,b} / \mu_{air} + \rho_f^0 a_{f,b} / \mu_f}, \quad \rho_f^0 = 1.83 \text{ кг/м}^3, \quad \alpha_{ch} = 3.6,$$

$$c_{pg} = 29.174 \mu_g^{-1} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_{vg} = 20.864 \mu_g^{-1} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad \mu_f = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль},$$

$$\mu_{air} = 29.04 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, \quad \rho_{air}^0 = 1.2 \text{ кг/м}^3, \quad k_0 = 3.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}).$$

Результаты расчета представлены на рис. 1–5. На рис. 1 показана картина развития горения пропано-воздушной смеси с составом, близким к стехиометрическому, при горении в закрытом канале протяженностью 0.2 м, радиусом 0.02 м.

Согласно рис. 1, в начале процесса имеет место расширение пламени в радиальном и осевом направлениях. При этом вдоль осевого направления пламя вытягивается из-за поджата боковыми стенками (0.5 мс, 1 мс). После достижения пламенем боковых стенок имеет место распространение пламени в сторону левого торца. Фронт пламени искривляется, формируются вытянутые «лепестки пламени» (2.1 мс, 2.3 мс). Далее неустойчивость гасится, «лепестки» сливаются (2.5 мс). После формирования практически однородного вдоль радиального направления пламени начинается следующий этап формирования неустойчивости. Пламя разделяется на два вытянутых лепестка (2.6 мс, 3.1 мс), далее на поверхности лепестков происходит дополнительное разделение (3.2 мс, 3.3 мс). После происходит очередное сглаживание неоднородности с последующим формированием структуры, состоящей из трех лепестков (3.5 мс, 3.6 мс). Наблюдаемая циклическая неустойчивость качественно близка к описаниям [2, 3].

Представленные результаты, как показало численное решение, не являются следствием возникновения ударных волн или волн разрежения. Скорее, следует

такой же вывод, как в работе [3], – искривление поверхности пламени влияет на давление газа в канале. Неоднородное распределение давления по объему канала вызывает неоднородное поле скоростей течения газа. Движение газа приводит к существенному искривлению фронта реакции. На рис. 2 представлены распределения давления газа, соответствующие распределениям температуры на рис. 1. Рисунок 2 построен для половины канала. Видно, что есть слабая зависимость давления в области фронта пламени от формы пламени.

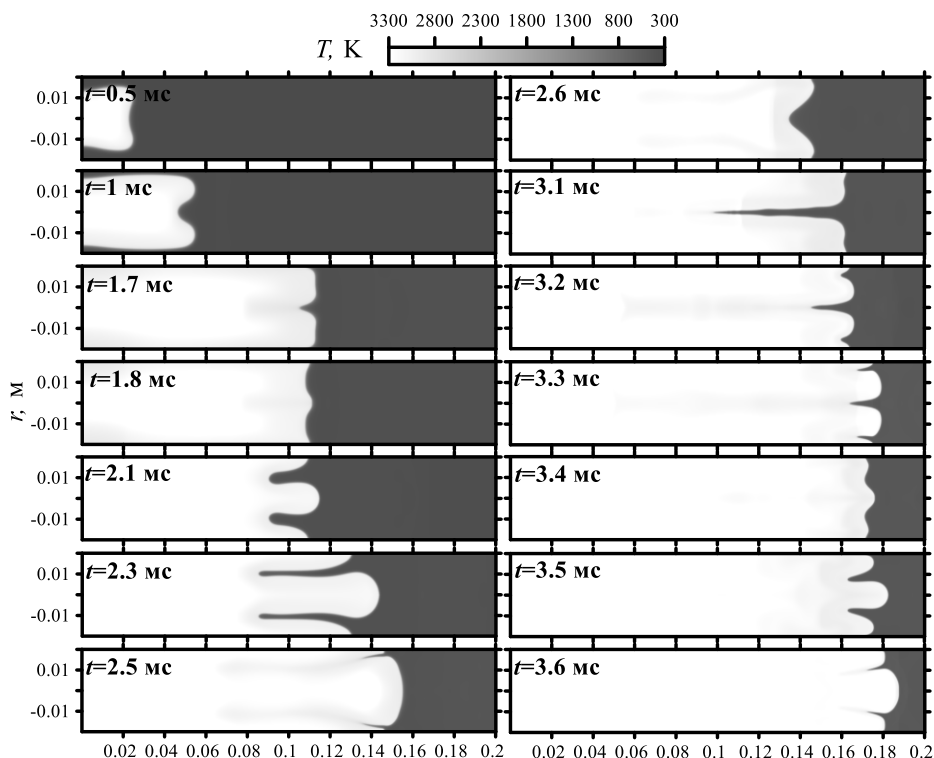


Рис. 1. Распределение температуры газа по пространству. Коэффициент избытка горючего 0.96

Fig. 1. Distribution of gas temperature in the region. The fuel–air equivalence ratio is 0.96

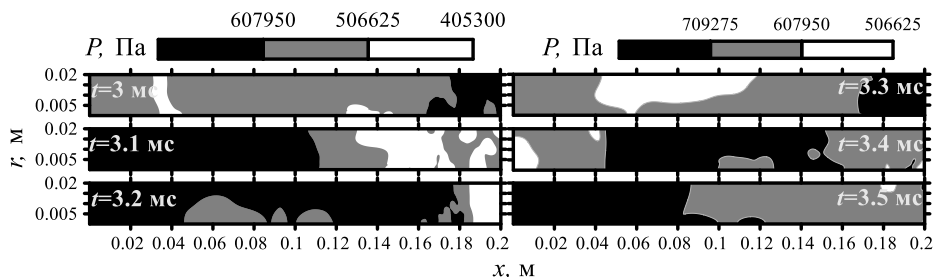


Рис. 2. Распределение давления газа по пространству. Коэффициент избытка горючего 0.96

Fig. 2. Distribution of gas pressure in the region. The fuel–air equivalence ratio is 0.96

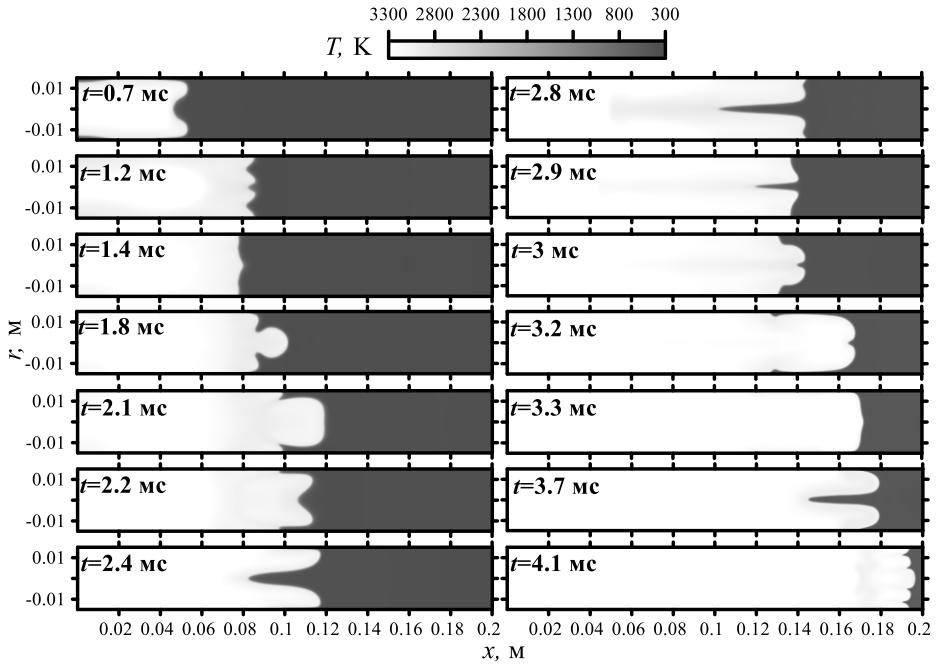


Рис. 3. Распределение температуры газа по пространству. Коэффициент избытка горючего 0.96

Fig. 3. Distribution of gas temperature in the region. The fuel–air equivalence ratio is 0.96

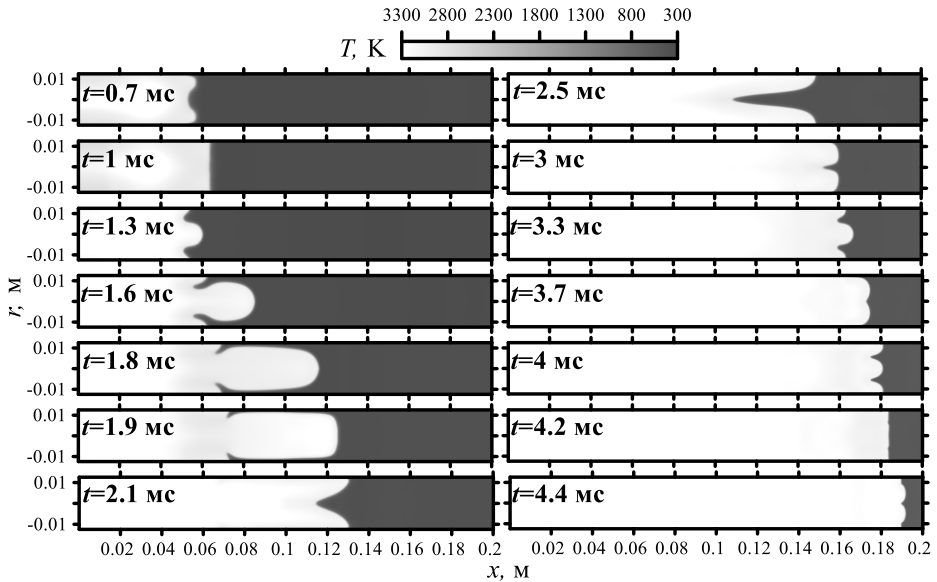


Рис. 4. Распределение температуры газа по пространству. Коэффициент избытка горючего 0.96

Fig. 4. Distribution of gas temperature in the region. The fuel–air equivalence ratio is 0.96

Изменение радиуса канала может повлиять на форму фронта пламени, в том числе снизить или же, наоборот, увеличить кривизну фронта пламени. На рис. 3, 4 представлены результаты исследования закономерностей формирования и распространения пламени пропано-воздушной смеси в узком цилиндрическом канале радиуса 0.015 м (рис. 3) и 0.0125 м (рис. 4).

Согласно рис. 3, 4, при уменьшении радиуса канала фронт пламени по мере распространения в канале меняет свою форму. В отличие от рис. 1, на рис. 3, 4 появляется пальцеобразное пламя, растягивающееся вдоль оси канала (1.8 мс, рис. 3; 1.6–1.9 мс, рис. 4). Кроме того, на рис. 3 видно формирование неустойчивости с пятью «лепестками» при достижении пламенем окрестностей правого торца канала. В канале радиуса 0.0125 неустойчивость слабая, периодически структура фронта пламени становится однородной вдоль радиуса канала.

Сравнивая рис. 1, 3, 4 можно заметить, что уменьшение радиуса канала приводит к уменьшению видимой скорости распространения пламени.

Наблюдаемые закономерности развития неустойчивости, а также снижения скорости пламени с уменьшением радиуса канала соответствуют данным из научной литературы. В частности, этапы развития неустойчивого горения соответствуют [3]. Механизм ускорения пламени в узких каналах аналитически объяснен в [18].

Заключение

Проведено численное исследование особенностей формирования и распространения фронта горения пропано-воздушной смеси в узком цилиндрическом канале. Показан циклический характер формирования искривленного фронта пламени. Показано, что видимая скорость пламени зависит от радиуса канала. Дано объяснение неустойчивости, возникающей при горении газа с составом, близким к стехиометрическому, в узком цилиндрическом канале.

Список источников

1. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Самоподдерживаемый режим ускорения пламени в канале и механизм формирования детонации // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 8 (20). С. 1–15.
2. Алексеев М.М., Семенов О.Ю. Физическое моделирование тюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // Вестник кибернетики. 2021. № 1 (41). С. 63–70.
3. 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. doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.043
4. Bychkov V., Akkerman V., Fru G., Petchenko A., Eriksson L.E. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes // Combustion and Flame. 2007. V. 150 (4). P. 263–76. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.01.004
5. Dunn-Rankin D., Barr P.K., Sawyer R.F. Numerical and experimental study of “tulip” flame formation in a closed vessel // Symposium (International) on Combustion. 1988. V. 21 (1). P. 1291–301. doi: 10.1016/S0082-0784(88)80360-6
6. Dunn-Rankin D., Sawyer R.F. Tulip flames: changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes // Experiments in Fluids. 1998. V. 24. P. 130–40. doi: 10.1007/s003480050160
7. Hackert C.L., Ellzey J.L., Ezekoye O.A. Effects of thermal boundary conditions on flame shape and quenching in ducts // Combustion and Flame. 1998. V. 112 (1-2). P. 73–84. doi: 10.1016/S0010-2180(97)81758-0.

8. Xiao H., Houim R.W., Oran E.S. Formation and evolution of distorted tulip flames // *Combustion and Flame*. 2015. V. 162 (11). P. 4084–4101. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.08.020
9. Ponizy B., Claverie A., Veyssière B. Tulip flame – the mechanism of flame front inversion // *Combustion and Flame*. 2014. V. 161 (12). P. 3051–3062. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.06.001
10. Xiao H., Wang O., Shen X., Guo S., Sun J. An experimental study of distorted tulip flame formation in a closed duct // *Combustion and Flame*. 2013. V. 160 (9). P. 1725–1728. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.03.011
11. Xiao H., Makarov D., Suna J., Molkov V. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159 (4). P. 1523–1538. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003
12. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / пер. с англ. под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова. М. : Мир, 1968.
13. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М. : Наука, 1965.
14. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Krainov D.A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 696. Art. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/696/1/012011
15. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Искровое зажигание горючих газов и газовзвесей. Томск : STT, 2020.
16. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. Simulation of combustion of methane-air mixture in two-dimensional approximation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Art. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/2150/1/012013
17. van Leer B. Flux-vector splitting for the Euler equations // Eighth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics: Proceedings of the Conference, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany, June 28 – July 2, 1982 / ed. E. Krause. P. 507–512. (Lecture Notes in Physics; v. 170).
18. Семёнов В.Н. Физика быстропотекающих процессов. Горение и детонация газовых смесей. М. : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергии, 2006.

References

1. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. (2013) Samopodderzhivaemyy rezhim uskoreniya plameni v kanale i mekhanizm formirovaniya detonatsii [Self-sustaining regime of flame acceleration in channel and mechanism of detonation formation]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*. 8(20). pp. 1–15.
2. Alekseev M.M., Semenov O.Yu. (2021) Fizicheskoe modelirovaniye tyul'panoobraznogo plameni pri gorenii gazov v tsilindricheskoy vertikal'noy trube [Tulip flame physical modeling during gaseous combustion in a cylindrical vertical pipe]. *Vestnik kibernetiki – Proceedings in Cybernetics*. 1(41). pp. 63–70. doi: 10.34822/1999-7604-2021-1-63-70
3. Shen X., He X., Sun J. (2015) A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct. *Fuel*. 161. pp. 248–253. doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.043
4. Bychkov V., Akkerman V., Fru G., Petchenko A., Eriksson L.E. (2007) Flame acceleration in the early stages of burning in tubes. *Combustion and Flame*. 150(4). pp. 263–76. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.01.004
5. Dunn-Rankin D., Barr P.K., Sawyer R.F. (1988) Numerical and experimental study of “tulip” flame formation in a closed vessel. *Symposium (International) on Combustion*. 21(1). pp. 1291–301. doi: 10.1016/S0082-0784(88)80360-6
6. Dunn-Rankin D., Sawyer R.F. (1998) Tulip flames: changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes. *Experiments in Fluids*. 24. pp.130–40. doi: 10.1007/s003480050160
7. Hackert C.L., Ellzey J.L., Ezekoye O.A. (1998) Effects of thermal boundary conditions on flame shape and quenching in ducts. *Combustion and Flame*. 112(1–2). pp. 73–84. doi: 10.1016/S0010-2180(97)81758-0

8. Xiao H., Houim R.W., Oran E.S. (2015) Formation and evolution of distorted tulip flames. *Combustion and Flame*. 162(11). pp. 4084–4101. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.08.020
9. Ponizy B., Claverie A., Veyssière B. (2014) Tulip flame – the mechanism of flame front inversion. *Combustion and Flame*. 161(12). pp. 3051–3062. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.06.001
10. Xiao H., Wang O., Shen X., Guo S., Sun J. (2013) An experimental study of distorted tulip flame formation in a closed duct. *Combustion and Flame*. 160(9). pp. 1725–1728. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.03.011
11. Xiao H., Makarov D., Suna J., Molkov V. (2012) Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct. *Combustion and Flame*. 159(4). pp. 1523–1538. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003
12. Lewis B., von Elbe G. (1987) *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. New York–London: Academic Press.
13. Shchetnikov E.S. (1965) *Fizika goreniya gazov* [Gas burning physics]. Moscow: Nauka.
14. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Krainov D.A. (2019) Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 696. Article 012011. doi: 10.1088/1757-899X/696/1/012011
15. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2020) *Iskrovoe zazhiganiye goryuchikh gazov i gazovzvesey: monografiya*. [Spark ignition of combustible gases and gas suspensions: a monograph]. Tomsk: STT.
16. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2022) Simulation of combustion of methane-air mixture in two-dimensional approximation. *Journal of Physics: Conference Series*. Article 012013. doi: 10.1088/1742-6596/2150/1/012013
17. van Leer B. (1982) Flux-vector splitting for the Euler equations. *Proceedings of the Eighth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics. Lecture Notes in Physics*. 170. pp. 507–512. doi: 10.1007/3-540-11948-5_66
18. Semyonov V.N. (2006) *Fizika bystroprotekayushchikh protsessov. Gorenie i detonatsiya gazovykh smesey* [Physics of high-speed processes. Combustion and detonation of gas mixtures]. Moscow: Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences.

Сведения об авторах:

Моисеева Ксения Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Кантарбаева Аружан Ильясовна – магистрант физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: arukantar@gmail.com

Крайнов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Moiseeva Kseniya M. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Kantarbaeva Aruzhan I. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: arukantar@gmail.com

Krainov Aleksey Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 16.10.2022; принята к публикации 31.03.2023

The article was submitted 16.10.2022; accepted for publication 31.03.2023