

УДК: 536.46+662.61

DOI 10.17223/19988621/74/10

А. Кантарбаева, К.М. Моисеева

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ
В УГЛЕ-ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ¹**

Представлена физико-математическая модель и результаты численного исследования особенностей горения пропано-воздушной смеси с примесью угольных частиц. В задаче определялась видимая скорость горения пропано-воздушной газовзвеси. Варьировались массовая концентрация пропана и частиц в смеси, а также радиус частиц угольной пыли. Задача решалась численно. Показано влияние радиуса частиц угольной пыли на видимую скорость горения газовзвеси.

Ключевые слова: *скорость горения, пропано-воздушная смесь, угольная пыль, математическое моделирование.*

Изучение особенностей горения реакционноспособных газовзвесей является актуальной задачей. Это обусловлено широким распространением углеводородных топлив во всех сферах промышленности. Определение скорости горения газовых смесей является важной проблемой пожаро-взрывобезопасности.

В работе [1] представлена модель горения пропано-воздушной смеси, в которой определялась зависимость скорости распространения ламинарного пламени от количества горючего в смеси. Расчеты проводились в широком диапазоне начальной температуры $T_0 = 680\text{--}1900$ К и давления $p_0 = 0.17\text{--}30$ атм. Коэффициент избытка горючего варьировался в диапазоне от 0.6 до 1.6. Достоверность результатов, полученных авторами, подтверждается экспериментальными данными из работы [2]. Исследование распространения пламени в богатых пропано-воздушных смесях приведено в работе [3]. Содержание пропана в смеси менялось от 5 до 10%. Было выбрано начальное значение температуры $T_0 = 298$ К и давления $p_0 = 0.1$ МПа. Авторы исследовали зависимость нормальной скорости горения смеси от содержания пропана. Было показано, что при увеличении концентрации пропана в смеси больше стехиометрического значения нормальная скорость падает. Установлено, что максимальная температура пламени может значительно превышать адиабатическое значение.

Авторы [4] экспериментально исследовали зависимость видимой скорости горения пропано-воздушной смеси от содержания пропана в смеси при различных давлениях. Эксперимент проводился при значениях начальной температуры $T_0 = 300, 325, 350$ К и давления $p_0 = 0.5, 1.0, 1.5$ атм. Коэффициент избытка горючего варьировался от 0.6 до 1.5. В ходе исследования было установлено, что видимая скорость горения пропано-воздушной смеси возрастает вместе с увеличением коэффициента избытка горючего, но после того, как содержание пропана достигало стехиометрического значения, скорость падала. Также было показано, что видимая скорость горения возрастает линейно с увеличением начальной температуры.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ р-мол-а 19-48-703006.

Добавка реакционноспособных частиц в газовую смесь может приводить к изменению скорости распространения пламени. Так, в работе [5] показано неоднозначное влияние присутствия частиц угольной пыли на скорость горения углеметано-воздушной газовзвеси. Отмечено снижение скорости распространения пламени по газовзвеси при высоких концентрациях частиц пыли и при малом содержании метана в смеси. Пропан на сегодняшний день является одним из распространенных типов горючего. Кроме того, пропан является одним из углеводородов, способных выделиться из угольного пласта. Температура самовоспламенения пропано-воздушной смеси мала и присутствие реакционноспособных частиц повышает вероятность воспламенения и горения газовзвеси.

Целью данной работы является определение видимой скорости горения пропано-воздушной газовзвеси угольной пыли в зависимости от содержания пропана и реакционноспособных частиц в газовзвеси.

Построение математической модели

Предполагается, что в пропано-воздушной смеси равномерно распределены частицы угольной пыли. Объемная доля частиц мала. Учитывается зависимость коэффициентов диффузии и теплопроводности газа от температуры. Между газом и частицами учитывается динамическое и тепловое взаимодействие. В газе протекает химическая реакция второго порядка между пропаном и кислородом. На поверхности частиц протекает гетерогенная химическая реакция первого порядка окислительно. Скорость реакции на частицах определяется с учетом массоотдачи [6]. Постановка задачи основана на работах [7, 8]. При сформулированных допущениях математическая постановка задачи принимает следующий вид:

Уравнение неразрывности для газа

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} = G_1; \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса газа

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g^2 + p_g)}{\partial x} = -\tau_{tr} + G_1 u_p; \quad (2)$$

Уравнение энергии газа

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g (\epsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho_g u_g (\epsilon_g + 0.5 u_g^2) + p_g u_g]}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + Q_2 G_2 + G_1 (0.5 u_p^2 + c_p T_p) - u_p \tau_{tr} + \alpha_p n_p S_p (T_p - T_g); \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение баланса массы окислителя в смеси

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{ox} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_{ox}}{\partial x} \right) - \alpha_1 G_1 - \alpha_2 G_2; \quad (4)$$

Уравнение баланса массы горючей компоненты в газе

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_f}{\partial x} \right) - G_2; \quad (5)$$

Уравнения баланса массы частиц

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p}{\partial x} = -G_1; \quad (6)$$

Уравнение сохранения импульса частиц

$$\frac{\partial (\rho_p u_p)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p^2}{\partial x} = \tau_{tr} - G_1 u_p; \quad (7)$$

Уравнение энергии частиц

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_p (\varepsilon_p + 0.5 u_p^2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p (\varepsilon_p + 0.5 u_p^2)}{\partial x} = \\ = Q_1 G_1 - \alpha_p S_p n_p (T_p - T_g) - G_1 (c_p T_p + 0.5 u_p^2) + \tau_{tr} u_p; \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение счетной концентрации частиц

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial n_p u_p}{\partial x} = 0; \quad (9)$$

Уравнение состояния газа

$$p_g = \rho_g R_g T_g. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_g(x, t_z) = \begin{cases} T_0, & 0 \leq x \leq x_0 \\ T_{gb}, & x_0 < x \leq \infty \end{cases}; \quad T_p(x, t_z) = T_{gb}; \quad p_g(x, t_z) = p_{gb}; \\ \rho_p(x, t_z) = m_p; \quad \rho_{ox}(x, t_z) = a_{ox,b} \rho_{gb}; \quad \rho_f(x, t_z) = a_{f,b} \rho_{gb}; \\ u_g(x, t_z) = u_p(x, t_z) = 0; \quad n_p(x, t_z) = n_p^b. \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_p(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial n_p(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_p(0, t)}{\partial x} = 0; \quad u_p(0, t) = u_g(0, t) = 0; \\ \frac{\partial \rho_{ox}(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_f(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_g(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{ox}(\infty, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_f(\infty, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В уравнениях (1) – (9) использованы величины, определяемые следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \alpha_p = Nu_p \lambda_g / (2 r_p); \quad Nu_p = 2 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{1/2}; \quad Nu_l = 0.664 Re^{0.5}; \\ Nu_t = 0.037 Re^{0.8}; \quad \tau_{tr} = n_p F_{tr}; \quad F_{tr} = C_r S_m \rho_g (u_g - u_p) |u_g - u_p| / 2; \\ C_r = 24 (1 + 0.15 Re^{0.682}) / Re; \quad Re = 2 \rho_g |u_g - u_p| r_p / \eta; \quad \lambda_g = \lambda_b (T/T_b)^{2/3}; \\ D_g = \lambda_g / (c_{pg} \rho_g); \quad \varepsilon_g = p_g / (\rho_g (\gamma - 1)); \quad \varepsilon_p = c_p T_p; \quad r_p = \sqrt[3]{\frac{3 \rho_p}{4 \pi n_p \rho_p^0}}; \\ G_1 = n_p S_p j_1 \rho_{ox}; \quad j_1 = \frac{\beta_m k_{01} \exp(-E_{a,1} / (R_u T_p))}{\beta_m + k_{01} \exp(-E_{a,1} / (R_u T_p))}; \quad \beta_m = \frac{\lambda_g(T) Nu_D}{c_g \rho_g r_k}; \\ G_2 = \rho_f \rho_{ox} k_{02} \exp(-E_{a,2} / (R_u T_g)); \end{aligned}$$

где u – скорость; t – время; x – координата; r_p – радиус частицы; p – давление; Q – тепловой эффект реакции; T – температура; k_0 – константа скорости химической реакции; η – коэффициент динамической вязкости газа; μ – молярная масса; ρ_{ox} – парциальная плотность окислителя; ρ_f – парциальная плотность горючего; ρ_p^0 – собственная плотность частиц; Nu_D – диффузионный аналог числа Нуссельта, $Nu_D = Nu_p$; Re – число Рейнольдса; Nu_p – число Нуссельта; α_p – коэффициент теплообмена газа с частицами; λ – коэффициент теплопроводности; D – коэффициент диффузии; ε – внутренняя энергия; γ – показатель адиабаты; G_i – массовая скорость химической реакции; $S_p = 4\pi r_p^2$ – площадь поверхности частицы; $S_m = \pi r_p^2$ – площадь миделевого сечения частицы; E_a – энергия активации химической реакции; R_u – универсальная газовая постоянная; α_1, α_2 – стехиометрические коэффициенты реакции кислорода с частицами угольной пыли и пропаном; r – радиус частицы; β_m – коэффициент массоотдачи для частиц; C_r – коэффициент трения; τ_{ir} – сила трения, F_{ir} – сила взаимодействия одиночной частицы с газом; j_1 – скорость гетерогенной реакции на частицах, n_p – счетная концентрация частиц. Индексы: b – начальные значения; p – параметры частиц; g – параметры газа; ox – окислитель; C – углерод; f – горючая компонента; 1 – реакция на поверхности частиц; 2 – реакция в газе.

Метод решения и результаты

Система уравнений (1) – (5) решалась численно с использованием метода С.К. Годунова [9]. Поток энергии, массы и импульса находился из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния газа в соседних ячейках [9]. Поток энергии, массы и импульса для частиц в уравнениях (6) – (9) определялся с использованием решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния частиц в соседних ячейках по методу А.Н. Крайко (используется алгоритм распада произвольного разрыва в среде, без собственного давления) [10]. В расчетах минимальный шаг по пространству определен из исследования сеточной сходимости и равен $\Delta h = 10^{-5}$ м. Шаг по времени выбирался согласно условию устойчивости Куранта.

Расчет задачи был выполнен при следующих значениях исходных величин:

$$c_{pg} = 1350 \text{ Дж/кг·К}; k_{01} = 6 \cdot 10^{10} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}); k_{02} = 79000 \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с});$$

$$E_{a,1} = 171.16 \text{ кДж/моль}; E_{a,2} = 135 \text{ кДж/моль}; Q_1 = 42.45 \text{ МДж/кг};$$

$$Q_2 = 20 \text{ МДж/кг}; R_u = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}; a_{ox} = 0.21; p = 10^5 \text{ Па}; \alpha_1 = 2.67;$$

$$\alpha_2 = 3.64; \lambda_b = 0.025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}; T_0 = 3000 \text{ К}; T_b = 293 \text{ К}.$$

Начальная массовая доля пропана в смеси варьировалась в диапазоне $a_{f,b} = 0.02$ – 0.06 . Радиус частиц угольной пыли изменялся в диапазоне $r_p = 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-6}$ м. Начальная масса частиц в смеси на кубический метр варьировалась в диапазоне $m_p = 0.03$ – 0.05 кг/м^3 . Были проведены параметрические расчеты при различных составах смеси, в каждом из которых определялась видимая скорость горения. Видимая скорость горения определялась как скорость перемещения координаты, соответствующей выгоранию окислителя до половины от начального значения. Расчеты проведены для значений массовой концентрации пропана в пропано-воздушной смеси, меньших или равных стехиометрическому значению.

На рис. 1 представлена зависимость видимой скорости горения пропано-воздушной смеси с примесью частиц от содержания пропана в смеси при различных составах угольной пыли. Верхняя шкала на рис. 1 определяет величину $\phi = a_{ox,b} / a_{ox,n}$, где $a_{ox,n}$ – количество окислителя, которое потребовалось для полного сгорания заданной массы частиц и пропана, $a_{ox,n} = \alpha_1 m_p + \alpha_2 a_{f,b}$.

Согласно рис. 1, при всех массовых концентрациях частиц увеличение содержания пропана в смеси приводит к увеличению видимой скорости горения газозвеси. При малой массовой концентрации частиц (рис. 1, а) наибольшая скорость горения наблюдается для частиц радиусом 3 мкм. Для частиц радиусом 1 и 2 мкм в области $a_{f,b} = 0.04$ наблюдается изменение поведения кривых, определяющих зависимость видимой скорости горения газозвеси от содержания пропана в смеси. До значения $a_{f,b} = 0.04$ большую видимую скорость горения имеет газозвесь с частицами радиуса 1 мкм, выше $a_{f,b} = 0.04$ большую скорость горения имеет газозвесь с частицами радиуса 2 мкм (рис. 1, а). На рис. 1, б показано, что при массовой концентрации частиц 0.04 кг/м^3 в диапазоне массовых концентраций пропана $a_{f,b} > 0.045$ скорость распространения пламени в газозвеси пропано-воздушной смеси слабо зависит от радиуса частиц.

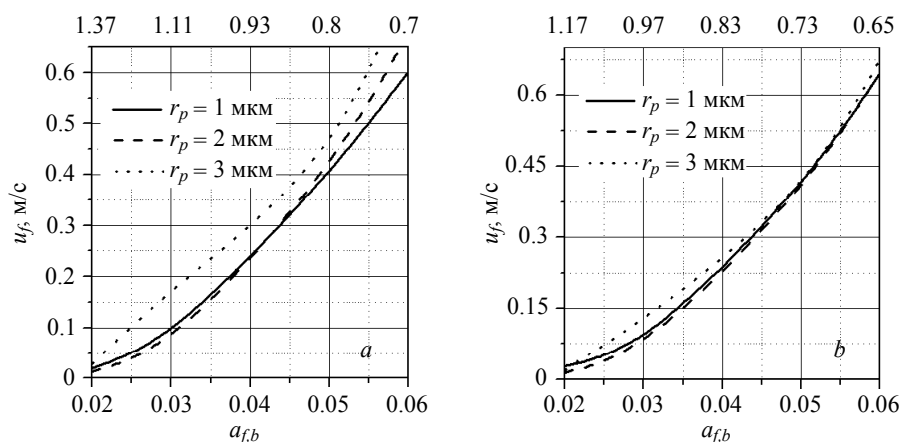


Рис. 1. Зависимость видимой скорости горения угле-пропано-воздушной газозвеси от массовой концентрации пропана в газе. $m_p = 0.03 \text{ кг/м}^3$ (а), 0.04 кг/м^3 (б)

Fig. 1. The observed burning velocity of a coal-propane-air gas suspension as a function of propane mass concentration in the gas. $m_p =$ (а) 0.03 and (б) 0.04 kg/m^3

На рис. 2 представлена зависимость видимой скорости горения пропано-воздушной газозвеси от радиуса частиц. Согласно кривой 1, рис. 2, видимая скорость горения снижается при возрастании радиуса частиц. Однако при увеличении массовой доли пропана в газозвеси и одинаковом содержании частиц наблюдается обратная зависимость. В этом случае видимая скорость горения возрастает с увеличением радиуса частиц, это видно на кривых 2 и 3. Стоит отметить, что при массе частиц в смеси $m_p = 0.03 \text{ кг/м}^3$ видимая скорость горения газозвеси выше, чем при массе $m_p = 0.05 \text{ кг/м}^3$.

Поведение кривых на рис. 1 и 2 объясняется следующим образом. Реакция окисления частиц конкурирует с реакцией окисления пропана. Снижение скорости реакции на частицах при увеличении их радиуса позволяет большему количе-

ству пропана прореагировать с кислородом. Таким образом, увеличение радиуса частиц ведет к возрастанию видимой скорости горения газовозвеси, что видно на кривых 2 и 3, рис. 2. В газовозвесах с небольшим содержанием пропана уменьшение видимой скорости горения с увеличением радиуса частиц можно объяснить снижением коэффициента массоотдачи. Так как пропан успевает полностью прореагировать с кислородом, а скорость реакции на частицах снижается, наблюдается уменьшение видимой скорости горения газовозвеси.

На рис. 3 представлено сравнение видимой скорости горения пропано-воздушной смеси без частиц и с угольными частицами. При расчете видимой скорости горения газовозвеси пропано-воздушной смеси была взята масса частиц в смеси $m_p = 0.04 \text{ кг/м}^3$ и радиус частиц $r = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Согласно рисунку, видимая скорость горения угле-пропано-воздушной смеси в диапазоне $a_{fb} = 0.03\text{--}0.06$ значительно ниже видимой скорости горения смеси без частиц. Пропано-воздушная смесь с массовой концентрацией $a_{fb} < 0.03$ не горит, так как содержание пропана меньше нижнего предела воспламеняемости пропано-воздушных смесей. Снижение скорости распространения пламени в газовозвеси угле-пропано-воздушной смеси по сравнению с чистой пропано-воздушной смесью объясняется тем, что частицы угольной пыли обладают меньшей удельной теплотой сгорания. Добавка частиц приводит к возрастанию коэффициента избытка горючего, который будет превышать стехиометрическое значение. Этим и объясняется снижение видимой скорости горения пропано-воздушной газовозвеси с частицами. В то же время примесь частиц в бедную пропано-воздушную смесь приводит к горению газовозвеси пропано-воздушной смеси с малой скоростью.

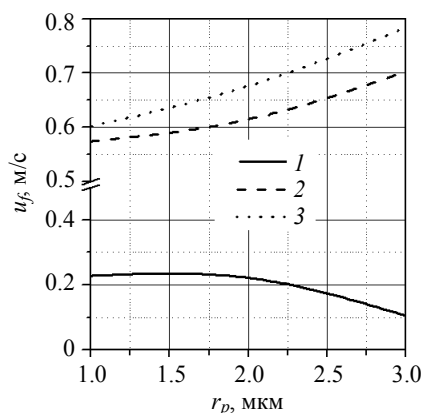


Рис. 2. Зависимость видимой скорости горения угле-пропано-воздушной газовозвеси от радиуса частиц. Кривые: 1 — $a_{fb} = 0.02$, $m_p = 0.05 \text{ кг/м}^3$ ($\phi = 1.02$), 2 — $a_{fb} = 0.06$, $m_p = 0.05 \text{ кг/м}^3$ ($\phi = 0.6$), 3 — $a_{fb} = 0.06$, $m_p = 0.03 \text{ кг/м}^3$ ($\phi = 0.7$)

Fig. 2. The observed burning velocity of the coal-propane-air suspension as a function of the radius of particles. Curves: 1 — $a_{fb} = 0.02$, $m_p = 0.05 \text{ kg/m}^3$ ($\phi = 1.02$), 2 — $a_{fb} = 0.06$, $m_p = 0.05 \text{ kg/m}^3$ ($\phi = 0.6$), 3 — $a_{fb} = 0.06$, $m_p = 0.03 \text{ kg/m}^3$ ($\phi = 0.7$)

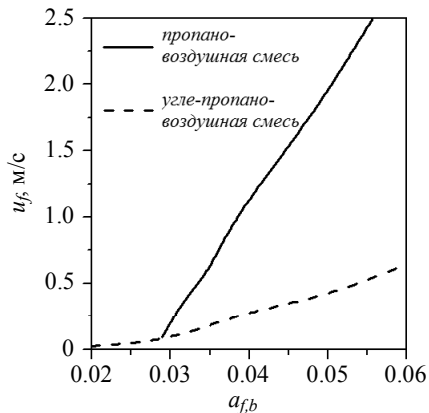


Рис. 3. Зависимость видимой скорости горения смеси от массовой доли горючего в пропано-воздушной смеси

Fig. 3. The observed burning velocity of the mixture as a function of the fuel mass fraction in the propane-air mixture

Выводы

Разработана физико-математическая модель горения реакционноспособной газозвеси угольной пыли в пропано-воздушной смеси. Проведено параметрическое исследование задачи, определена видимая скорость горения пропано-воздушной смеси с примесью угольных частиц. Определены зависимости видимой скорости горения пропано-воздушной газозвеси от коэффициента избытка горючего и от радиуса частиц. Показано, что в смесях с небольшим содержанием пропана видимая скорость горения снижается при увеличении радиуса частиц. Напротив, в смесях с большим содержанием пропана при увеличении радиуса частиц наблюдается возрастание видимой скорости горения. Также видимую скорость горения газозвеси с большим содержанием пропана можно повысить если уменьшить массу частиц в смеси. Видимая скорость горения пропано-воздушной смеси с угольными частицами значительно меньше скорости горения смеси без частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титова Н.С., Кулешов П.С., Старик А.М. Кинетический механизм воспламенения и горения пропана в воздухе // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47. № 3. С. 3 – 19.
2. Gerstein M., Levine O., Wong E.L. Flame propagation. II. The determination of fundamental burning velocities of hydrocarbons by a revised tube method // Journal of the American Chemical Society. 1951. V. 73. No. 1. P. 418–422.
3. Kwon S., Tseng L.-K., Faeth G.M. Laminar burning velocities and transition to unstable flames in H₂/O₂/N₂ and C₃H₈/O₂/N₂ mixtures // Combustion and Flame. 1992. V. 90. No. 3–4. P. 230–246.
4. Palm-Leis A., Strehlow R.A. On the propagation of turbulent flames // Combustion and Flame. 1969. V. 13. No 2. P. 111–129.
5. Rockwell S.R., Rangwala A.S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames // Combustion and Flame. 2013. V. 160(3). P. 635–640.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
7. 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. 012011.
8. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Моисеев Д.М. Устойчивость горения полидисперсной угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 48. С. 82–90.
9. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
10. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.

Статья поступила 13.07.2021

Kantarbaeva A., Moiseeva K.M. (2021) FEATURES OF FLAME PROPAGATION IN A PROPANE-AIR GAS SUSPENSION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 74. pp. 95–102

DOI 10.17223/19988621/74/10

Keywords: burning velocity, propane-air mixture, coal dust, mathematical modeling.

The mathematical model of combustion for a reactive gas suspension of coal dust in a propane-air mixture is developed. The parametric study of the problem is carried out. The observed burning velocity of the propane-air mixture with an admixture of coal particles is

determined. Dependences of the observed burning velocity of the propane-air gas suspension on the equivalence ratio and on the radius of the particles are obtained. It is shown that, the observed burning velocity decreases with an increase in the radius of the particles. On the contrary, with an increase in the radius of the particle, the observed burning velocity increases for high-propane mixtures. Moreover, in the case of high-propane mixtures, the observed burning velocity of the gas suspension can be increased by reducing the mass of the particles. The observed burning velocity for a propane-air mixture with particles is significantly less than that for a mixture without particles.

Financial support. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-48-703006 r_mol_a).

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

Aruzhan KANTARBAEVA (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

REFERENCES

1. Titova N.S., Kuleshov P.S., Starik A.M. (2011) Kinetic mechanism of propane ignition and combustion in air. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 47(3). pp. 249–264. DOI: 10.1134/S0010508211030014.
2. Gerstein M., Levine O., Wong E.L. (1951) Flame propagation. II. The determination of fundamental burning velocities of hydrocarbons by a revised tube method. *Journal of the American Chemical Society*. 73(1). pp. 418–422. DOI: 10.1021/ja01145a136.
3. Kwon S., Tseng L.-K., Faeth G.M. (1992) Laminar burning velocities and transition to unstable flames in $H_2/O_2/N_2$ and $C_3H_8/O_2/N_2$ mixtures. *Combustion and Flame*. 90(3–4). pp. 230–246. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90085-4.
4. Palm-Leis A., Strehlow R.A. (1969) On the propagation of turbulent flames. *Combustion and Flame*. 13(2). pp. 111–129. DOI: 10.1016/0010-2180(69)90042-X.
5. Rockwell S.R., Rangwala A. S. (2013) Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames. *Combustion and Flame*. 160(3). pp. 635–640. DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.10.025.
6. Frank-Kamenetskiy D.A. (1987) *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka.
7. 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.
8. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Moiseev D.M. (2017) Ustoychivost' goreniya polidispersnoy ugle-metano-vozdushnoy smesi v gorelke s rekuperatsiey tepla [Stability of the combustion of polydisperse coal-methane-air mixture in the heat recovery burner]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 48. pp. 82–90. DOI: 10.17223/19988621/48/8.
9. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.I., Kraiko A.N., Prokopov G.P. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems in gas dynamics]. Moscow: Nauka.
10. Kraiko A.N. (1979) On discontinuity surfaces in a medium devoid of "proper" pressure. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 43(3). pp. 539–549. DOI: 10.1016/0021-8928(79)90102-3.

Received: July 13, 2021