

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ И СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЗВЕСИ ПОРОШКА БОРА В ПРОПАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Представлена физико-математическая модель искрового зажигания и горения взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси. Получены зависимости критической энергии искрового зажигания от радиуса и массовой концентрации частиц, содержания пропана в газовзвеси бора. Установлены зависимости стационарной скорости распространения пламени во взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси от радиуса и массовой концентрации частиц, содержания пропана в газовзвеси бора. Получено количественное соответствие расчетно-теоретических значений скорости распространения пламени во взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: двухфазный поток, порошок бора, искровое зажигание, скорость горения, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20220305

ВВЕДЕНИЕ

Исследование вопросов воспламенения и горения порошков бора является актуальным в силу существующих гипотез о повышении энергоэффективности смесевых твердых топлив и порошковых металлических горючих при добавлении в них частиц бора. Изучение горения газовзвесей порошка бора проводится как экспериментально, так и теоретически. При моделировании горения частиц бора в основном используют подход [1] или его модификации. Основная идея модели [1] заключается в учете особенностей низкотемпературного и высокотемпературного окисления частиц бора.

В работе [2] экспериментально исследовано горение частиц бора радиусом 2 мкм в диапазоне давления $1 \div 10$ атм. Согласно полученным результатам можно выделить две стадии в горении мелкодисперсных частиц. Первая охватывает промежуток времени от начала видимого свечения до начала возникновения яркого свечения из зоны реакции. Вторая стадия — это горение частиц с ярким свечением. Согласно данным эксперимента при увеличении давления время первой стадии уменьшается. Продолжительность второй стадии также зависит от давления газа и уменьшается

с его ростом. Согласно результатам эксперимента стадия горения с ярким свечением доминирует в общем времени сгорания частиц. В [2] проведен анализ полученных результатов и их сопоставление с данными [1, 3]. По мнению авторов [2], первая стадия горения, наблюдаемая в экспериментах, соответствует процессам формирования и испарения оксидной пленки с поверхности частиц. Сопоставление с результатами расчетов по моделям [1, 3] показало, что прогноз времени формирования и испарения оксидной пленки по модели [3] хорошо согласуется с результатами эксперимента при субатмосферном давлении, но существенно завышает это время при высоком давлении.

В [4] представлена модель, учитывающая реакции бора с молекулярным кислородом, водяным паром, фтористым водородом и атомарным фтором. В [5] эта модель модифицирована путем использования более подробной схемы химических превращений. Модель воспламенения и горения частиц бора [5] учитывает испарение оксидного слоя, плавление частицы, горение частицы бора в гетерогенном режиме. В работе [6], являющейся продолжением [5], проведено сопоставление расчетов по новой модели с данными других авторов. Хорошее согласие между результатами расчетов получено для мелкодисперсных частиц диаметром менее 10 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК 421.2020.8.

© Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., 2022.

Несмотря на попытки уйти от модели Кинга, авторы исследований [1, 5, 6] придерживаются мнения о двухстадийном горении частиц бора: стадия накопления и исчезновения оксидного слоя и стадия сгорания оголившейся частицы.

В работе [7] выполнено численное исследование горения монодисперсной и бидисперсной аэровзвеси порошка бора, а также аэровзвеси смеси порошков алюминия и бора. Показано влияние массовой концентрации и дисперсности частиц бора на видимую и нормальную скорости распространения пламени в газозвеси. Видимая скорость горения — это скорость перемещения координаты фронта горения, нормальная скорость — разность между видимой скоростью горения и скоростью движения газозвеси.

В работах [8, 9] представлены результаты по горению газозвеси порошка бора в энергетических установках: в монографии [8] — по распространению пламени в полидисперсной аэровзвеси бора в турбулентном потоке, в работе [9] — экспериментов на бунзеновской горелке по скорости распространения пламени во взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси (для создания пилотного пламени использовалась смесь пропана с воздухом). В работах [10, 11] приведены результаты численного исследования горения газозвеси бора в воздухе с использованием модели [1].

Присутствие горючего компонента в газе, как в [9], изменяет характер воспламенения газозвеси порошка бора и влияет на скорость окисления частиц и характер протекания химических реакций. При горении смесевых твердых топлив с добавлением порошка бора над поверхностью топлива образуется газозвесь с реакционноспособным газовым компонентом и частицами бора [12]. Для понимания процессов развития пламени требуется исследовать режимы горения газозвеси порошка бора с конкурирующими газовой и гетерогенной реакциями. В связи с этим была поставлена задача численного исследования закономерностей воспламенения и горения газозвеси порошка бора в пропановоздушной смеси. Модель горения пропановоздушной смеси представлена в [13], полученные по ней скорости распространения пламени хорошо согласуются с данными экспериментов [14]. Модель горения аэровзвеси порошка бора приведена в [7] и демонстрирует хорошее согласие расчетов скорости го-

рения аэровзвеси с результатами работы [15]. Воспламенение газозвеси порошка бора моделировалось с использованием модели искрового зажигания [16].

В настоящей работе представлена физико-математическая модель искрового зажигания и развития устойчивого горения газозвеси порошка бора в пропановоздушной смеси, а также результаты численного исследования критических условий искрового зажигания и скорости распространения пламени в газозвеси порошка бора в пропановоздушной смеси.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагалось, что в пропановоздушной смеси с объемным содержанием пропана a_{vol} равномерно распределена взвесь порошка бора с массовой концентрацией частиц m_p , начальным размером частиц $r_{p,b}$. Начальная температура частиц бора равна температуре газа при нормальных условиях $T_{g,b}$. Постановка задачи основана на допущениях работ [7, 13, 16] и модели динамики двухфазных реагирующих сред [17]. Учитывались окисление частицы с образованием оксида бора B_2O_3 и две поверхностные реакции между кислородом и бором с образованием двух газообразных оксидов бора BO и B_2O_2 . Полагалось, что газообразные оксиды BO и B_2O_2 в газовой фазе реагируют с кислородом с образованием газообразного оксида B_2O_3 [1]. Окисление бора через оксидную пленку определялось через эффективный коэффициент массоотдачи, учитывающий слой оксида на частице. Учитывалось испарение оксидной пленки при нагреве. Скорость испарения определялась через давление насыщенных паров вокруг частицы. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Учитывалось тепловое расширение газа при повышении температуры и его движение. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывалась с учетом массоотдачи [18]. Учитывалось тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Столкновение частиц между собой не учитывалось. Химическая реакция в газовой фазе между пропаном и кислородом описывалась законом Аррениуса со вторым порядком реакции. Искровое зажигание моделировалось через мгновенное тепловыделение в виде нитевидного мгновенного источника.

При сформулированных допущениях система уравнений физико-математической модели имеет вид:

уравнение неразрывности для газа

$$\frac{\partial r \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial r} = r[G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4], \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса газа

$$\begin{aligned} \frac{\partial r(\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial r(\rho_g u_g^2 + p)}{\partial r} = \\ = p + r(G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4)u_p - r\tau_{fr}, \quad (2) \end{aligned}$$

уравнение энергии газа

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_g (\varepsilon_g + 0.5u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial r[\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5u_g^2) + p u_g]}{\partial r} = \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_g(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) - \\ - r u_p \tau_{fr} + r \alpha_p n_p S_p (T_p - T_g) + \\ + r(G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4)(c_p T_p + 0.5u_p^2) + \\ + r(Q_3 - Q_1)G_1 + r(Q_3 - Q_2)G_2 + rQ_5 G_5, \quad (3) \end{aligned}$$

уравнение баланса массы кислорода

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_{ox}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{ox} u_g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_g \rho_g(T_g) \frac{\partial a_{ox}}{\partial r} \right) - \\ - r \alpha_1 G_1 - r \alpha_2 G_2 - r \alpha_3 G_3 - r \alpha_5 G_5, \quad (4) \end{aligned}$$

уравнение баланса массы пропана

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_f u_g}{\partial r} = \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_g \rho_g(T_g) \frac{\partial a_f}{\partial r} \right) - r G_5, \quad (5) \end{aligned}$$

уравнение баланса массы газообразного B_2O_3

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_{B_2O_3}^g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{B_2O_3}^g u_g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_g \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g}{\partial r} \right) + \\ + r(1 + \alpha_1)(G_1 + G_2) + r G_4, \quad (6) \end{aligned}$$

уравнение баланса массы частиц

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p}{\partial r} = \\ = -r(G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4), \quad (7) \end{aligned}$$

уравнение баланса массы B_2O_3 , конденсированного на поверхности частиц,

$$\frac{\partial r \rho_{B_2O_3}^k}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{B_2O_3}^k u_p}{\partial r} = r(1 + \alpha_3)G_3 - r G_4, \quad (8)$$

уравнение сохранения импульса частиц

$$\begin{aligned} \frac{\partial r(\rho_p u_p)}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p^2}{\partial r} = \\ = r \tau_{fr} - r(G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4)u_p, \quad (9) \end{aligned}$$

уравнение энергии частиц

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_p (\varepsilon_p + 0.5u_p^2)}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p (\varepsilon_p + 0.5u_p^2)}{\partial r} = \\ = -r \alpha_p S_p n_p (T_p - T_g) + r \tau_{fr} u_p - \\ - r(G_1 + G_2 - \alpha_3 G_3 + G_4)(c_p T_p + 0.5u_p^2) + \\ + r Q_1 G_1 + r Q_2 G_2 + r Q_3 G_3 - r Q_4 G_4, \quad (10) \end{aligned}$$

уравнение счетной концентрации частиц

$$\frac{\partial r n_p}{\partial t} + \frac{\partial r n_p u_p}{\partial r} = 0, \quad (11)$$

уравнение состояния газа

$$p = \rho_g R_g T_g. \quad (12)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_g(r, 0) = T_{g,b} + \frac{Q_z}{4\pi \lambda_b t_z} \exp\left(-\frac{r^2}{4\chi_b t_z}\right), \\ T_p(r, 0) = T_{g,b}, \quad \rho_{ox}(r, 0) = a_{ox,b} \rho_b, \\ \rho_f(r, 0) = a_{f,b} \rho_b, \quad \rho_p(r, 0) = m_p, \quad (13) \\ \rho_g(r, 0) = \rho_b, \quad \rho_{B_2O_3}^k(r, 0) = \rho_{B_2O_3}^g(r, 0) = 0, \\ u_g(r, 0) = u_p(r, 0) = 0, \quad n_p(r, 0) = 0. \end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_p(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial n_p(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_p(0, t)}{\partial r} = \\ = \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g(0, t)}{\partial r} = 0, \quad u_p(0, t) = u_g(0, t) = 0, \\ \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^k(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{ox}(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_f(0, t)}{\partial r} = 0, \quad (14) \\ \frac{\partial T_g(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{ox}(\infty, t)}{\partial r} = \end{aligned}$$

$$= \frac{\partial \rho_f(\infty, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial r} = 0.$$

В уравнениях (1)–(14) использованы следующие обозначения: $\varepsilon_g = p_g/(\gamma - 1)$ — внутренняя энергия газа, $\varepsilon_p = c_p T_p \rho_p$ — внутренняя энергия частиц; $\gamma = c_{p,g}/c_{v,g}$ — показатель адиабаты; $c_{p,g}$, $c_{v,g}$ — удельная теплоемкость газа при постоянных давлении и объеме соответственно; a_f — относительная массовая концентрация горючего компонента в газе ($a_f = \rho_f/\rho_g$), a_{ox} — относительная массовая концентрация окислителя в газе ($a_{ox} = \rho_{ox}/\rho_g$); $\lambda_g = \lambda_{g,0}(T_g/T_b)^{2/3}$ — коэффициент теплопроводности газа; $D_g(T_g) = \lambda_g(T_g)/c_{p,g}\rho_g$ — коэффициент диффузии газа; τ_{fr} — сила трения; ρ — плотность; u — скорость; T — температура; t — время; r — координата; p — давление; $r_p = \sqrt[3]{3\rho_p/(4\pi n_p\rho_p^0)}$ — радиус частицы; r_B — размер (радиус) бора в частице: $r_B = \left[\left(\frac{\mu_B + 3/2\mu_O}{\mu_B} r_{B,0}^3 - \frac{\rho_p}{(4/3)\pi n_p\rho_p^0} \right) \frac{2\mu_B}{3\mu_{ox}} \right]^{1/3}$ (на этапе окисления частицы), $r_B = r_p$ (на этапе гетерогенного горения частицы бора); μ — молярная масса; Q — тепловой эффект реакции; Q_z — удельная энергия искрового разряда. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, p — параметры частиц, g — параметры газа, k — параметры конденсированного состояния, ox — кислород, f — горючее, B — бор, B_2O_3 — оксид бора, z — характеристики искрового разряда.

Связь между относительной массовой концентрацией горючего и окислителя в газе и объемным содержанием горючего a_{vol} в смеси определяется из соотношений

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

$$a_f = \frac{a_{vol}\mu_f}{(100 - a_{vol})\mu_{air} + a_{vol}\mu_f}.$$

Здесь a_{vol} — объемная концентрация горючего в газовой смеси. 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 R_u — универсальная газовая постоянная, μ_{air} , μ_f , μ_{N_2} — молярная масса соответственно воздуха, пропана, азота.

Скорости изменения массы частиц за счет гетерогенных реакций на поверхности частиц бора определялись из выражений

$$G_1 = \frac{k_{01} \exp[-E_{a,1}/(R_u T_p)] \beta_p}{k_{01} \exp[-E_{a,1}/(R_u T_p)] + \beta_p} n_p \rho_{ox} S_p,$$

$$G_2 = \frac{k_{02} \exp[-E_{a,2}/(R_u T_p)] \beta_p}{k_{02} \exp[-E_{a,2}/(R_u T_p)] + \beta_p} n_p \rho_{ox} S_p,$$

где E_a — энергия активации, $\beta_p = \lambda_g \text{Nu}_d / (c_{p,g} \rho_g r_p)$ — коэффициент массоотдачи частиц, Nu_d — диффузионный аналог числа Нуссельта, k_0 — константа скорости химической реакции, Nu_d — диффузионный аналог числа Нуссельта, S_p — площадь поверхности частицы.

Скорость изменения массы частиц за счет их окисления с образованием конденсированного B_2O_3 вычислялась по формуле

$$G_3 = \beta_{p,eff} n_p \rho_{ox} S_p,$$

а за счет испарения оксидной пленки — из выражения

$$G_4 = n_p \beta_p (\rho_{B_2O_3}^{sv} - \rho_{B_2O_3}^g).$$

Здесь

$\beta_{p,eff} = \left[\frac{r_p}{D_g} + \frac{r_B^2(1/r_B - 1/r_p)}{D_d \exp(-E_d/(R_u T_p))} \right]^{-1}$ — эффективный коэффициент массоотдачи, учитывающий диффузию через сферический слой оксида, $\rho_{B_2O_3}^{sv} = (p_{B_2O_3}^{sv} \mu_g) / (R_u T_g)$ — плотность насыщенных паров вокруг частицы, $p_{B_2O_3}^{sv} = p_{st} \exp[-L/(R_u T_{p,i}) + L/(R_u T_{p,boil})]$ — давление насыщенных паров, L — теплота парообразования.

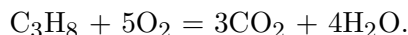
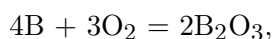
Скорость изменения массы пропана в газозвеси за счет реакции с кислородом определялась из формулы

$$G_5 = \rho_{ox} \rho_f k_{05} \exp[-E_5/(R_u T_g)].$$

Коэффициенты расхода кислорода в реакциях с бором и пропаном рассчитывались из выражений

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{\mu_{O_2} \nu_{O_2}}{\mu_B \nu_B}, \quad \alpha_5 = \frac{\mu_{O_2} \nu_{O_2}}{\mu_f \nu_f},$$

где стехиометрические коэффициенты ν определялись из уравнений образования конечных продуктов в реакциях между кислородом и бором, кислородом и пропаном:



Учет межфазного теплового и инерционно-го взаимодействия осуществлялся аналогично работе [19]:

$$\tau_{fr} = n_p F_{fr}, \quad \alpha_p = \lambda_g \text{Nu}_p / r_p,$$

где $F_{fr} = C_{fr} S_m \rho_g (u_g - u_p) |u_g - u_p| / 2$ — сила взаимодействия одиночной частицы с газом, $C_{fr} = 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.682}) / \text{Re}$ — коэффициент трения, $\text{Re} = 2\rho_g r_p |u_g - u_p| / \eta_g$ — число Рейнольдса, S_m — площадь миделева сечения, η_g — коэффициент динамической вязкости газа, $\text{Nu}_p = 2 + (\text{Nu}_l^2 + \text{Nu}_t^2)^{1/2}$ — число Нуссельта, $\text{Nu}_l = 0.664\sqrt{\text{Re}}$, $\text{Nu}_t = 0.037\text{Re}^{0.8}$.

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения задачи в уравнениях (1)–(6) использовался метод Годунова для расчета потоков через границы ячеек [20], в уравнениях (7)–(11) — алгоритм распада произвольного разрыва [21]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет механизмов теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству до координаты $r = 0.15$ м задавался равным $\Delta h_{const} = 10^{-5}$ м. После координаты $r = 0.15$ м шаг по пространству увеличивался в направлении правой границы по правилу $\Delta h_{i+1} = 1.01\Delta h_i$. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта — Фридрихса — Леви $\Delta t < \frac{\Delta h}{\max[c_g + |u_g|]}$, где c_g — скорость звука в газе.

Проверка достоверности и сходимости численного метода осуществлялась по методике [16, 19]. Погрешность расчета не превышала 2 %.

Параметры, выбранные для решения задачи, соответствуют данным [7, 13]: $Q_1 = 31.2$ МДж/кг, $Q_2 = -1.3$ МДж/кг, $Q_3 = 58$ МДж/кг, $Q_4 = 5.08$ МДж/кг, $Q_5 = 42.45$ МДж/кг, $k_{01} = 10^4$ м/с, $k_{02} = 10^6$ м/с, $k_{05} = 6 \cdot 10^{10}$ м³/(кг·с), $L = 0.36$ МДж/моль, $E_1 = 112$ кДж/моль, $E_2 = 252$ кДж/моль, $E_d = 10$ кДж/моль, $E_5 = 171.16$ кДж/моль, $D_d = 1.89 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $\alpha_1 = 2.18$, $\alpha_2 = 2.18$, $\alpha_3 = 2.18$, $\alpha_5 = 3.6$, $c_{p,g} = 1065$ Дж/(кг·К), $c_{v,g} = 768.2$ Дж/(кг·К), $\lambda_{g,0} = 0.025$ Вт/(м·К),

$\mu_B = 11 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_O = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $c_p = 1293$ Дж/(кг·К), $\rho_p^0 = 2340$ кг/м³, $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_{O_2,0} = 0.264$ кг/м³, $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = p_0 / R_g T_0$, $T_{p,boil} = 2133$ К. Радиус частиц бора варьировался в диапазоне $1 \div 10$ мкм. Массовая концентрация частиц варьировалась в диапазоне $0.1 \div 0.4$ кг/м³. Объемная доля пропана в смеси изменялась от 0 до 2 %.

В расчетах, по аналогии с работой [19], определялась минимальная энергия искры Q_z [Дж/м], при которой газовзвесь воспламеняется с последующим выходом на стационарный режим горения. Источник искрового зажигания задавался мгновенным точечным. Через малое время t_z (в расчетах принято $t_z \sim 10^{-6}$ с) распределение температуры в газе принимало вид (13). Полагалось, что газовзвесь зажглась, если после выделения тепла от искры формировался и распространялся фронт пламени в газовзвеси. После зажигания определялись видимая и нормальная скорости распространения пламени в газовзвеси. Видимая скорость распространения пламени — скорость перемещения координаты, соответствующей выгоранию окислителя, $\rho_{ox} = 0.1\rho_{ox,b}$. Нормальная скорость распространения пламени вычислялась как разность между видимой скоростью горения и скоростью газа в области фронта пламени.

На рис. 1, а, б представлены распределения температуры газа и частиц, а также массовой концентрации частиц, конденсированного оксида на частицах, парциальной плотности кислорода и пропана в газе при зажигании монодисперсной взвеси порошка бора с массовой концентрацией частиц 0.1 кг/м³, радиусом частиц 1 мкм, содержанием пропана в смеси 0.5 %. Линии на рис. 1 представлены через интервалы времени 0.01 с. К моменту времени $t = 0.01$ с (кривые 1, рис. 1, а, б) энергия искры за счет механизмов теплопроводности привела к прогреву газа в окрестностях источника зажигания. Рисунок не содержит подробностей динамики зажигания газовзвеси. Динамика искрового зажигания взвеси порошка бора подробно описана в [16]. Было показано, что в начале процесса зажигания температура в зоне искрового тепловыделения падает, идет медленный прогрев газа и частиц в окрестности энергетического выделения от искры. В зоне прогрева начинается окисление частиц с выделением тепла, что ускоряет процессы окисления и разогрева. По-

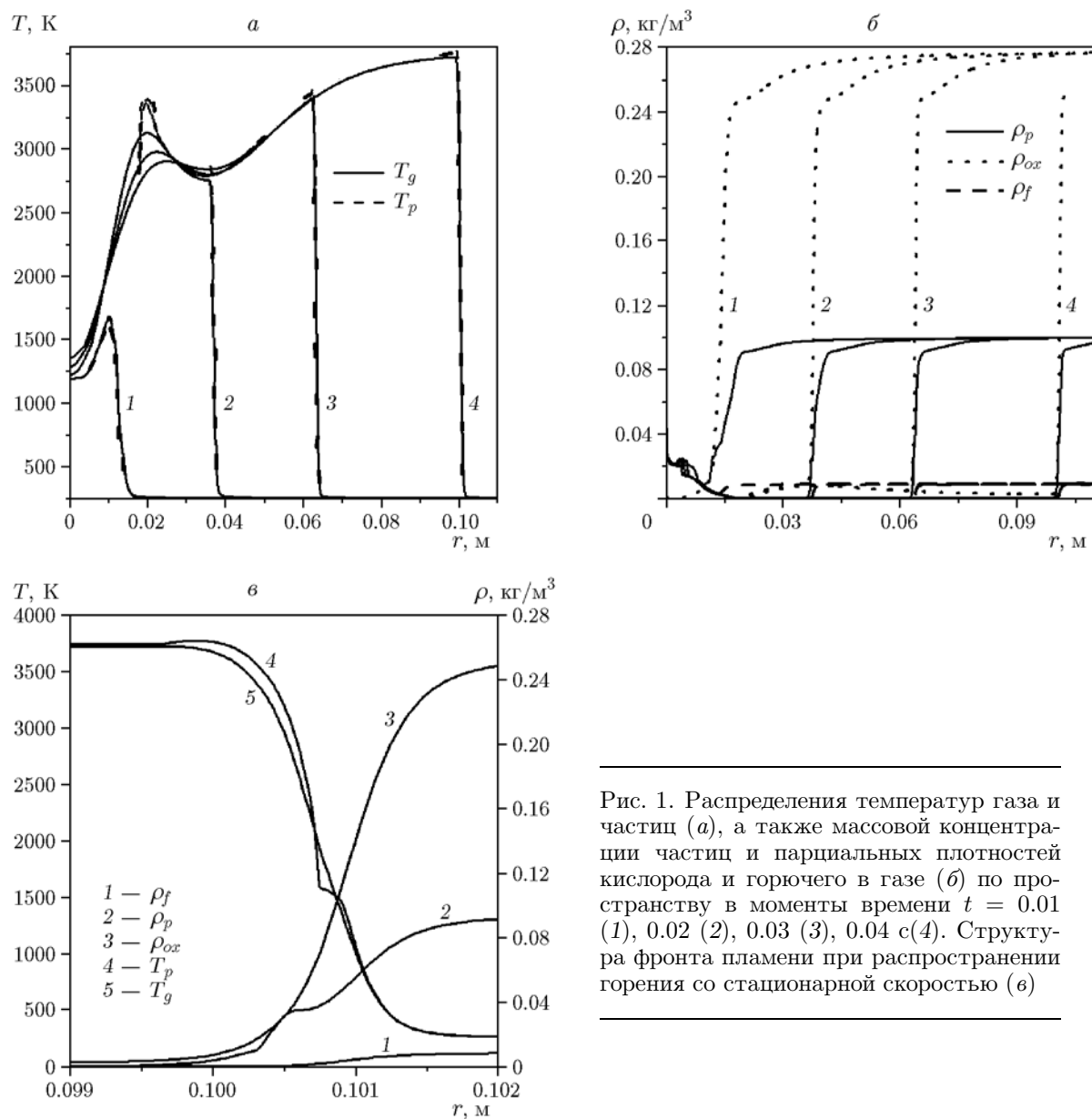


Рис. 1. Распределения температур газа и частиц (*a*), а также массовой концентрации частиц и парциальных плотностей кислорода и горючего в газе (*б*) по пространству в моменты времени $t = 0.01$ (1), 0.02 (2), 0.03 (3), 0.04 с (4). Структура фронта пламени при распространении горения со стационарной скоростью (*в*)

сле достаточного разогрева испаряется оксидный слой, начинаются гетерогенные реакции на поверхности частиц и в газовой фазе между газообразными оксидами VO , B_2O_2 и кислородом. Температура частиц увеличивается и начинает превышать температуру газа, формируется фронт горения, который распространяется от зоны воспламенения. На рис. 1 эти подробности не указаны, но представлен выход горения на устойчивый режим распространения. Критическая энергия искрового зажигания составила 0.5 Дж/м. Нормальная скорость

распространения пламени 0.23 м/с, видимая скорость распространения пламени 3.8 м/с. На рис. 1, *б* представлена структура фронта пламени, кривые соответствуют кривым 4 на рис. 1, *а*, *б*. Согласно данным рис. 1, *в* первым в реакцию с кислородом вступает пропан (кривая 1, рис. 1, *в*). Тепловыделение от пропана приводит к нагреву частиц бора и их окислению с образованием оксидной пленки. Вследствие дальнейшего выделения тепла от реакции пропана с воздухом и от окисления частиц происходит интенсивное испарение оксид-

ной пленки (перегиб кривых 2 и 4, рис. 1,в). К моменту полного выгорания пропана в волне горения оксидная пленка на частицах испаряется, и начинается интенсивная гетерогенная реакция на частицах. В итоге частицы бора полностью сгорают вместе с кислородом (кривые 2, 3 на рис. 1,в).

В параметрических расчетах для определения критической энергии искрового зажигания задавались массовая концентрация и радиус частиц бора, объемная доля пропана в смеси. Путем варьирования величины Q_z определялась минимальная энергия искрового зажигания, при которой реализуется зажигание с последующим выходом на режим стационарного распространения пламени. На рис. 2 представлена зависимость минимальной энергии зажигания монодисперсного порошка бора с радиусом частиц 1 и 3 мкм от содержания пропана в смеси при массовой концентрации частиц 0.4 кг/м^3 . Видно, что увеличение радиуса частиц приводит к достаточно существенному повышению критической энергии воспламенения смеси. При этом рост объемной доли пропана в смеси в заданном диапазоне концентраций уменьшает минимальную энергию, требуемую для зажигания газозвеси с выходом на стационарный режим распространения пламени.

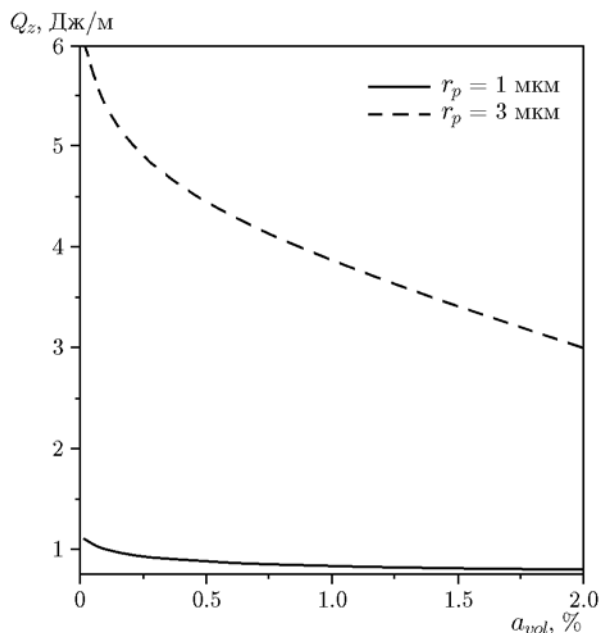


Рис. 2. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания монодисперсной газозвеси порошка бора от объемной доли пропана в смеси (массовая концентрация частиц 0.4 кг/м^3)

На рис. 3 представлена зависимость минимальной энергии зажигания монодисперсного порошка бора с радиусом частиц 3 мкм от массовой концентрации частиц при содержании пропана в смеси 2 %. С ростом массовой концентрации частиц критическая энергия искрового зажигания растет. В [16] представлены результаты решения задачи об искровом зажигании аэрозвеси порошка бора. Минимальная энергия зажигания аэрозвеси порошка бора с радиусом частиц 1 мкм в диапазоне массовых концентраций частиц $0.2 \div 0.4 \text{ кг/м}^3$ составила $2 \div 1.1 \text{ Дж/м}$. В [16] было показано, что чем больше массовая концентрация частиц, тем меньше энергии требуется для зажигания газозвеси. Согласно данным настоящего исследования присутствие пропана в газовой смеси приводит к изменению зависимости минимальной энергии искрового зажигания от массовой концентрации частиц. С увеличением массовой концентрации частиц минимальная энергия искрового зажигания газозвеси возрастает (см. рис. 3). Это объясняется конкурирующим характером протекания химических реакций. При задании начального состава смеси массовая концентрация частиц бора и массовая концентрация пропана задавались таким обра-

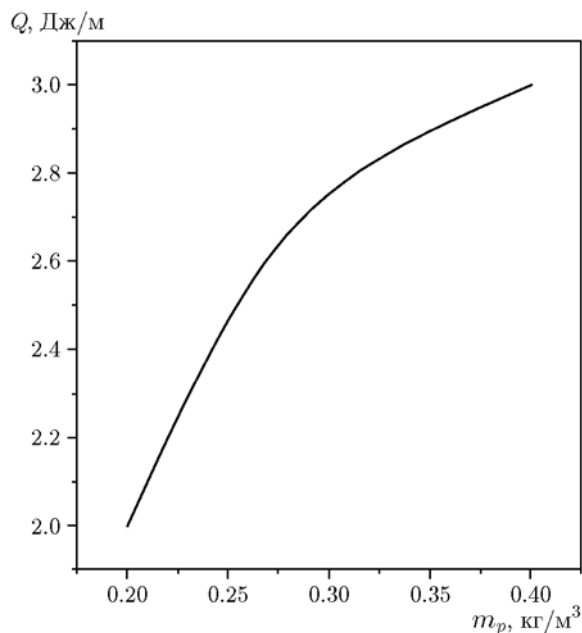


Рис. 3. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания монодисперсной газозвеси порошка бора от массовой концентрации частиц радиусом $r_p = 3 \text{ мкм}$ (объемная доля пропана в смеси 2 %)

зом, чтобы состав смеси имел стехиометрическое соотношение или недостаток кислорода.

При достаточной для зажигания энергии искрового пробоя частицы бора в окрестности искрового пробоя прогреваются до высоких температур, при которых оксидный слой быстро испаряется. Горение частиц переходит в режим высокотемпературного окисления с интенсивным тепловыделением. Тепловыделение от частиц приводит к прогреву газа и ускорению химических реакций. Формируется фронт горения. При недостатке кислорода пропан в волне горения сгорает полностью, а частицы бора не догорают.

Из численного решения задачи определялись видимая и нормальная скорости распространения пламени в газозвеси в зависимости от ее состава. На рис. 4 представлена зависимость видимой и нормальной скоростей горения газозвеси порошка бора от массовой концентрации частиц бора. Для расчета выбрана газозвесь с содержанием пропана 0.5 % по объему и частицами радиуса 1 и 2 мкм. Согласно рис. 4 при концентрациях частиц, больших 0.25 кг/м^3 , нормальная скорость горения стремится к значению, не зависящему от массовой концентрации частиц. Видимая скорость горения при этом начинает уменьшаться.

По данным [9] для частиц бора со средне-массовым диаметром 5 мкм скорость горения взвеси равна 0.24 м/с . Относительная массовая концентрация порошка бора, определенная как доля массы бора в массе всей смеси, составляла 0.0575 . В [9] использовалась стехиометрическая смесь порошка бора в пропановоздушной смеси. Исходя из этого в настоящей работе для заданной массовой концентрации частиц получено соотношение пропана в смеси, соответствующее стехиометрическому составу газозвеси бора. Расчет состава выполнялся следующим образом. Как и в работе [9], относительная массовая концентрация бора в газозвеси принята равной 0.0575 . Для пересчета относительной массовой концентрации частиц бора a_B в массовую концентрацию m_p использовалось выражение $a_B = \frac{m_p}{m_p + \rho_{air} + \rho_f}$, получено $m_p = 0.07 \text{ кг/м}^3$. В случае стехиометрической смеси справедливо соотношение $\rho_{ox,b} = \alpha_1 m_p + \alpha_5 a_{x,b} \rho_{g,b}$, где $a_{x,b}$ — неизвестная массовая концентрация пропана в газе. Из этого соотношения следует

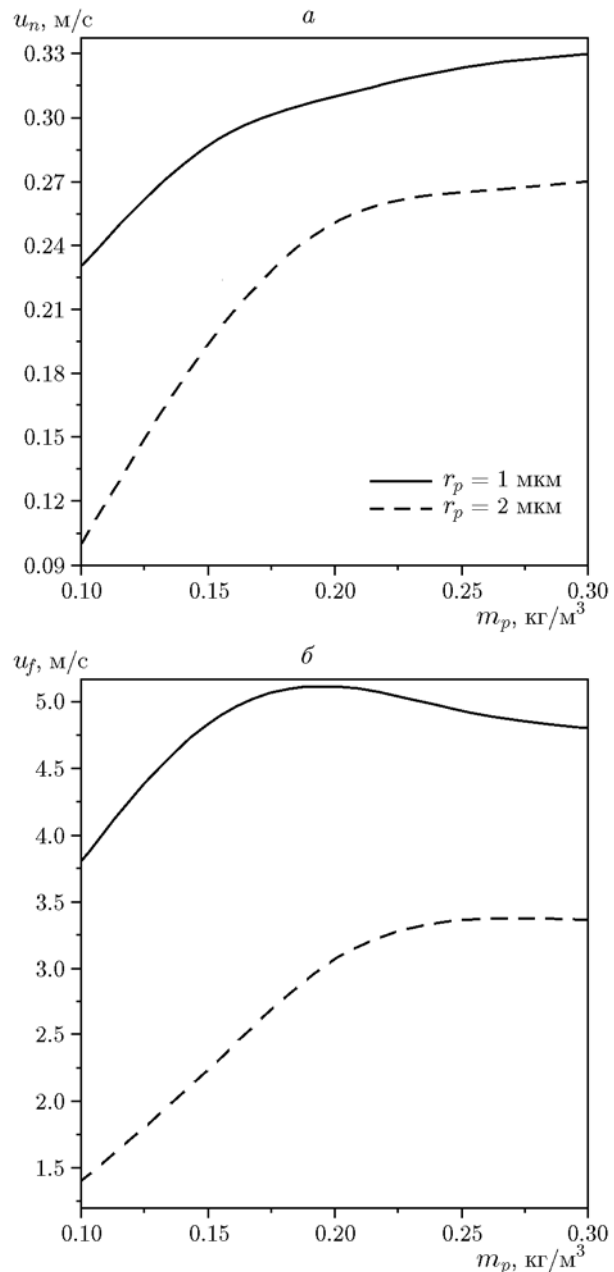


Рис. 4. Зависимость нормальной (а) и видимой (б) скоростей горения газозвеси порошка бора от массовой концентрации частиц (объемная доля пропана в смеси 0.5 %)

$$a_{x,b} = \frac{1}{\rho_{g,b}} \frac{\rho_{ox,b} - \alpha_1 m_p}{\alpha_5} = \frac{0.23 \cdot 1.2 \text{ кг/м}^3 - (96/44) \cdot 0.07 \text{ кг/м}^3}{(160/44) \cdot 1.2 \text{ кг/м}^3} = 0.028.$$

Пересчет массовой концентрации в объемную выполним с помощью выражения

$$a_{vol} = \frac{100 \% \cdot a_{x,b} \mu_{air}}{\mu_f - \mu_f a_{x,b} + \mu_{air} a_{x,b}} =$$

$$= [100 \% \cdot 0.028 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}] / [(44 \cdot 10^{-3} -$$

$$- 0.028 \cdot 44 \cdot 10^{-3} + 0.028 \cdot 29 \cdot 10^{-3}) \text{ кг/моль}] =$$

$$= 1.9 \%$$

Для заданного состава нормальная скорость горения, определенная из расчетов по рассматриваемой в данной работе модели, составила 0.23 м/с.

На рис. 5 представлена зависимость нормальной скорости горения взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси от радиуса частиц бора. Для расчетов взято два состава газозвеси порошка бора — с массовой концентрацией 0.2 и 0.06 кг/м³. Объемное содержание пропана 1.9 % в пропановоздушной смеси ниже стехиометрического соотношения. Скорость распространения пламени в пропановоздушной смеси с 1.9 % пропана составляет около 0.2 м/с [13]. Наличие крупных частиц бора в смеси приводит к снижению скорости распространения пламени по сравнению со скоростью в пропановоздушной смеси без примеси частиц (см. рис. 5). При размере частиц бора меньше 5 мкм скорость фронта в газозвеси выше, чем в чистой пропановоздушной смеси с тем же содержанием пропана.

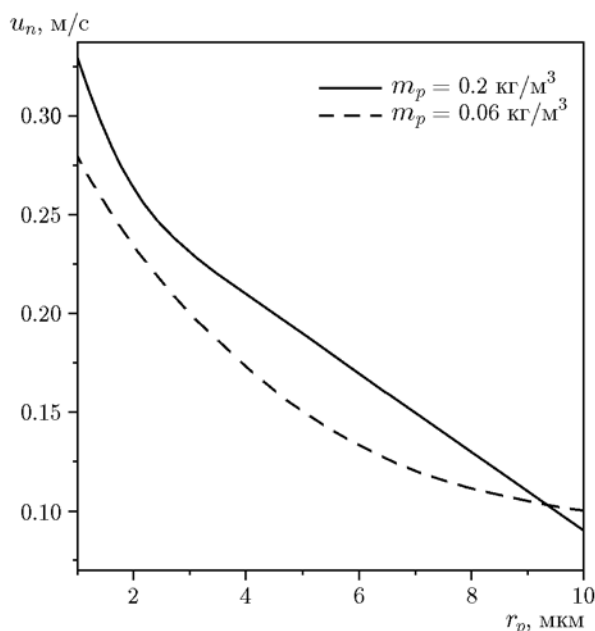


Рис. 5. Зависимость нормальной скорости горения газозвеси порошка бора от радиуса частиц (объемная доля пропана в смеси 1.9 %)

ВЫВОДЫ

Представлена физико-математическая модель искрового зажигания и горения взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси. Выполнено численное решение задачи об определении критических условий искрового зажигания и скорости распространения пламени в газозвеси. Получены зависимости критической энергии искрового зажигания от радиуса и массовой концентрации частиц и содержания пропана в воздухе.

Расчетно-теоретические значения скорости распространения пламени во взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси количественно соответствуют экспериментальным данным. Получены зависимости скорости распространения фронта горения во взвеси порошка бора в пропановоздушной смеси от массовой концентрации и размера частиц бора и концентрации пропана в воздухе. В исследованном диапазоне массовых концентраций и размеров частиц порошка бора добавление пропана в воздух приводит к увеличению скорости распространения пламени в газозвеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. King M. K. Boron particle ignition in hot gas streams // *Combust. Sci. Technol.* — 1973. — V. 8, N 5-6. — P. 255–273. — DOI: 10.1080/00102207308946648.
2. Ao W., Yang W.-J., Wang Y., Zhou J.-H., Liu J.-Z., Cen K. Ignition and combustion of boron particles at one to ten standard atmosphere // *J. Propul. Power.* — 2014. — V. 30, N 3. — P. 760–764. — DOI: 10.2514/1.B35054.
3. Yeh C. L., Kuo K. K. Ignition and combustion of boron particles // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1996. — V. 22, N 6. — P. 511–541. — DOI: 10.1016/S0360-1285(96)00012-3.
4. Yeh C., Kuo K. Theoretical model development and verification of diffusion / reaction mechanisms of boron particle combustion // *Proc. 8th Int. Symp. on Transport Phenomena in Combustion (ISTP-VIII)*. — 1995. — V. 1. — P. 45–63.
5. Hussmann B., Pfitzner M. Extended combustion model for single boron particles — Part I: Theory // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 4. — P. 803–821. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.010.
6. Hussmann B., Pfitzner M. Extended combustion model for single boron particles — Part II: Validation // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 4. — P. 822–833. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.009.

7. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М. и др. Математическое моделирование горения газовзвеси порошка бора // Инж.-физ. журн. — 2021. — Т. 94, № 2. — С. 360–371.
8. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
9. Ягодников Д. А. Экспериментальное исследование газодисперсного пламени частиц бора // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 64–71.
10. Zolotko A. N. The ignition and combustion of boron dust systems // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 1993. — V. 2, N 1-6. — P. 455–468. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v2.i1-6.280.
11. Золотко А. Н., Мацко А. М., Полищук Д. И., Буйновский С. Н., Гапоненко Л. А. Воспламенение двухкомпонентной газовзвеси частиц металлов // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 1. — С. 23–26.
12. Порязов В. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Архипов В. А. Численное моделирование горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 78–87. — DOI: 10.15372/FGV20220209.
13. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2019. — V. 696. — 012011.
14. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / пер. с англ.; под ред. К. И. Щелкина, А. А. Борисова. — М.: Мир, 1968.
15. Бойчук Л. В. Исследование процессов распространения пламени в двухкомпонентных газовзвесах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / ОГУ. — Одесса, 1993.
16. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Искровое зажигание горючих газов и газовзвесей: монография. — Томск: STT, 2020.
17. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
18. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
19. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Дементьев А. А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 26–33. — DOI: 10.15372/FGV20190404.
20. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
21. Крайко А. Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикл. математика и механика. — 1979. — Т. 43, № 3. — С. 500–510.

*Поступила в редакцию 24.12.2021.
Принята к публикации 12.01.2022.*
