

УДК 532. 529

DOI 10.17223/19988621/40/7

Н.Н. Дьяченко, Л.И. Дьяченко, В.С. Гурова, С.А. Синеекая

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СОПЛАХ РДТТ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО ВЫСОКОДИСПЕРСНЫЙ ПОРОШОК АЛЮМИНИЯ

Исследуется влияние высокодисперсного состава конденсированной фазы на процессы изменения спектра частиц. Показана зависимость двухфазных потерь двигателя от размера частиц оксида алюминия на входе в сопло. Описание взаимодействия частиц конденсата базируется на непрерывном подходе. Представлены результаты численного расчёта квазидномерного установившегося течения продуктов сгорания в сопле РДТТ.

Ключевые слова: *двухфазное течение, функция распределения частиц по размерам, ультрадисперсные частицы, коагуляция и дробление частиц.*

Для увеличения энергетических характеристик ракетного двигателя в топливо добавляют порошок алюминия. Продукты сгорания такого топлива представляют смесь газа и полидисперсного ансамбля жидких частиц оксида алюминия. Неравновесность потока приводит к потере удельного импульса двигателя. Течение сопровождается коагуляцией и дроблением частиц конденсата. Учитывая актуальность задачи использования металлизированных топлив, были проведены широкомасштабные исследования течений двухфазных сред в соплах РДТТ. Наиболее полную библиографию этих исследований можно найти в работах [1–5].

До недавнего времени порошковые технологии позволяли получать порошки алюминия в промышленных объёмах, начиная с размера частиц в 2 мкм. Выше-названные исследования двухфазных течений базировались на результатах горения частиц такого размера. **В настоящее время разработаны технологии получения высокодисперсных (вплоть до наноразмерных) порошков.** С уменьшением размера частиц увеличивается их полнота сгорания, уменьшаются двухфазные потери, что стимулирует более широкое применение высокодисперсных порошков в энергосистемах [6, 7].

Данная работа посвящена численному исследованию течения продуктов сгорания смесового твёрдого топлива, **металлической добавкой к которому является высокодисперсный порошок алюминия.**

Постановка задачи

Для описания двухфазного течения используется непрерывная модель коагуляции частиц и феноменологическая многожидкостная модель среды. При численном расчете непрерывная функция распределения $f(r)$ заменяется ступенчатой (счетной) $n(r)$, весь спектр частиц делится на N фракций, внутри фракции частицы имеют одинаковый размер, номер фракции определяется индексами i, j . Произведение $m_i \cdot n_i = \rho_i$ – массовая концентрация частиц i -й фракции (здесь m_i – масса одной частицы, n_i – число частиц).

Система квазиодномерных уравнений, описывающих стационарное двухфазное полидисперсное течение с учетом коагуляции и дробления в рамках монодисперсной модели осколков, записывается в виде

$$F\rho U = \text{const}; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx}F\rho U^2 + F\frac{d}{dx}P = F\sum_{i=1}^N\rho_i\varphi_{Ri}(U_i - U); \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx}F\rho UH_0 = F\sum_{i=1}^N\rho_i[\varphi_{ai}c_p(T_i - T) + \varphi_{Ri}U_i(U_i - U)]; \quad (3)$$

$$P = \rho RT; \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}F\rho_i U_i = F(n_i \sum_{j=1}^i K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\Phi_{ij}\rho_j - \rho_i \sum_{j=i}^N K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\Phi_{ij}n_j); \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}Fn_i U_i = -Fn_i \sum_{j=1}^N K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\Phi_{ij}n_j; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}F\rho_i U_i^2 = & F[\rho_i\varphi_{Ri}(U - U_i) + K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\rho_j(U_j - (1 - \Phi_{ij})U_i) - \\ & - n_i \sum_{j=1}^i \rho_j \sum_{j=1}^N K_{ij}\mathcal{E}_{ij}n_j(U_i - (1 - \Phi_{ij})U_i)]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}F\rho_i U_i T_i = & F[\rho_i\varphi_{ai}\frac{c_p}{c_b}(T - T_i) + \frac{n_i}{c_b} \sum_{j=1}^i K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\rho_j E_{ij} + \frac{\rho_i}{c_b} \sum_{j=1}^N K_{ij}\mathcal{E}_{ij}n_j(1 - \Phi_{ij})E_{ji} + \\ & + T_i(n_i \sum_{j=1}^i K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\Phi_{ij}\rho_j - \rho_i \sum_{j=1}^N K_{ij}\mathcal{E}_{ij}\Phi_{ij}n_j)]. \end{aligned} \quad (8)$$

В системе уравнений $F = F(x)$ – сечение сопла; ρ, U, P, T – плотность, скорость, давление, температура газа; H_0 – энтальпия торможения; c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; c_b – удельная теплоемкость вещества; R – газовая постоянная; $\varphi_{Ri}, \varphi_{ai}$ – функции динамического и теплового взаимодействия газа с частицами; ρ_i, U_i, T_i – плотность, скорость, температура частиц; ρ_b – плотность вещества частицы; K_{ij} – константа коагуляции; Φ_{ij} – коэффициент эффективности столкновений; $\mathcal{E}_{ij}$ – коэффициент захвата; E_{ij} – энергия взаимодействующих частиц. Функции динамического и теплового взаимодействия газа и частицы определяются по формулам $\varphi_{Ri} = F_\sigma \frac{\mu}{\rho_i r_i^2}$, $\varphi_{ai} = \frac{3}{2} \frac{\text{Nu}}{\text{Pr}} \frac{c_p \mu}{\rho_i c_b r_i^2}$, где f_σ – функция сопротивления, μ – динамическая вязкость газа; Nu, Pr – числа Нуссельта и Прандтля.

С учетом обдува частиц газом константа коагуляции и коэффициент эффективности столкновений записываются в виде

$$K_{ij} = \pi(\beta_i r_i + \beta_j r_j)^2 |U_i - U_j|, \text{ где } \beta_k = (1 + 0.03 We_k), \quad k = i, j,$$

$$\Phi_{ij} = 1 - 0.247 Re_{B_{ij}}^{0.434} Lp_j^{-0.133} (r_i / r_j)^{0.273} - \Phi_{ij},$$

где

$$\Phi_{ij} = 0.00446 B_{ij}, \text{ если } B_{ij} \leq 40.6,$$

$$\Phi_{ij} = 11.9 (B_{ij} / 100)^{4.64}, \text{ если } 40.6 \leq B_{ij} \leq 120,$$

$$B_{ij} = Re_{B_{ij}}^{0.285} Lp_j^{0.2} (r_i / r_j)^{0.4} We_j^{0.442}.$$

Здесь

$$Re_{B_{ij}} = \frac{2\rho_{B_i}}{\mu_{B_i}} |U_i - U_j| r_i, \quad We_j = \frac{2\rho}{\sigma_{B_j}} |U - U_j|^2 r_j,$$

$$Lp_j = 2r_j \sigma_{B_j} \rho_{B_j} / \mu_{B_i}.$$

Формула для коэффициента эффективности столкновений справедлива в диапазоне

$$45 \leq Re_{ij} \leq 480, \quad 8 \leq Lp_j \leq 930, \quad 2 \leq (r_j / r_i) \leq 12.$$

Зависимость плотности, вязкости и коэффициента натяжения от температуры задавались следующими соотношениями:

$$\rho_{B_i} = (6.044 - 0.001294 T_i) \cdot 10^3, \quad \text{кг/м}^3,$$

$$\mu_{B_i} = 0.0234 (2670 / T_i)^n, \quad \text{нс/м},$$

$$\sigma_i = (700 - 0.195 (T_i - 2309)) \cdot 10^{-3}, \quad \text{н/м}.$$

Здесь $n = \begin{cases} 6.5 & \text{при } T_i \leq 2670, \\ 2.387 & \text{при } T_i \geq 2670. \end{cases}$

Коэффициент захвата $\mathfrak{E}_{ij}$ определялся по формулам Ленгмюра и Блоджетт:

$$\mathfrak{E}_{ij} = \left(\mathfrak{E}_{ij}^* + \mathfrak{E}_{ij}^{**} \frac{Re_{ij}}{60} \right) \frac{1}{1 + Re_{ij} / 60},$$

где

$$\mathfrak{E}_{ij}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } Stk \leq 0.607, \\ \left(1 + 0.75 \frac{\ln(4Stk_{ij})}{2Stk_{ij}} \right)^2, & \text{если } Stk_{ij} > 0.607, \end{cases}$$

$$\mathfrak{E}_{ij}^{**} = \begin{cases} 0, & \text{если } Stk_{ij} < 0.1, \\ \left(\frac{Stk_{ij}}{Stk_{ij} + 0.125} \right)^2, & \text{если } Stk_{ij} \geq 0.1, \end{cases}$$

$$Stk_{ij} = r_i^2 \rho_i \frac{|U_i - U_j|}{9r_i \mu}, \quad Re_{ij} = \frac{2\rho}{\mu} |U_i - U_j| r_j.$$

Энергия взаимодействующих частиц:

$$E_{ij} = c_0 (T_i - T_j) + \frac{(U_i - U_j)^2}{2}.$$

Наиболее полная физико-математическая постановка задачи представлена в работах [1, 5].

Система уравнений (1) – (8) решалась на основе обратной задачи. Для численного интегрирования системы уравнений газа использовался стационарный аналог нецентральной конечно-разностной схемы Мак-Кормака, второго порядка точности. Интегрирование системы уравнений фракции частиц осуществлялось с помощью неявной разностной схемы, имеющей также второй порядок точности. На входном сечении использовалось условие скоростного и температурного равновесия между газовой фазой и частицами. Течение рассчитывалось в квази-одномерной постановке для модельного радиусно-профилированного сопла [4]. Радиус скругления в горловине сопла $r = r_*$ (r_* – радиус минимального сечения сопла), угол поджатия в дозвуковой области $\alpha_1 = 45^\circ$, углы поджатия в сверхзвуковой области $\alpha_2 = 24^\circ$ и $\alpha_3 = 7^\circ$ соответственно.

Расчеты проводились при следующих значениях исходных параметров:

$$P_k = 6 \cdot 10^6, 7 \cdot 10^6, 8 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$T_k = 3000, 3200, 3400 \text{ К};$$

$$\mu = 0.89 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$R = 300 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Расширение сопла $Y_a = 6$; радиус критического сечения сопла $r_* = 0.1 \text{ м}$; весовая доля конденсата $Z = 0.3$; число фракций $N = 15$.

Непрерывная функция распределения частиц по размерам на входе в сопло задавалась в виде

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} r \ln(\sigma)} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(r) - \ln(r_0)}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma)} \right]^2 \right\}.$$

Здесь r_0 – средний размер частиц, $\sigma = 1.5$ – дисперсия.

При достижении числа Вебера (We) критического значения равного 17 и критического момента вращения (M) равного 4 частица дробится [1].

Результаты расчётов

На рис. 1 представлены результаты расчётов среднемассового размера частиц D_{43} вдоль сопла. Средний радиус частиц на входе в сопло r_0 принимался равным 1.5; 1.0; 0.5; 0.1 мкм. При $r_0 = 1.5$ и 1.0 мкм в области минимального сечения сопла наблюдается интенсивный рост частиц, процесс коагуляции превосходит процесс дробления. Дробление в дозвуковой части сопла определяется взаимодействием частиц с газом (числом Вебера), в транзвуковой и сверхзвуковой областях сопла основным механизмом дробления является вращение частиц (накопленное при нецентральных столкновениях) и определяется моментом вращения.

Для более мелких частиц ($r_0 = 0.5, 0.1$ мкм) в области критического сечения сопла также наблюдается интенсивный рост среднемассового размера частиц. Значение числа Вебера не достигает критической величины вдоль всего сопла. Не достигает критического значения и момент вращения, как в трансзвуковой, так и в сверхзвуковой областях сопла. Изменение спектра частиц определяется только процессом коагуляции. В сверхзвуковой области процесс столкновения частиц практически не наблюдается, так как разница скорости между частицами мала.

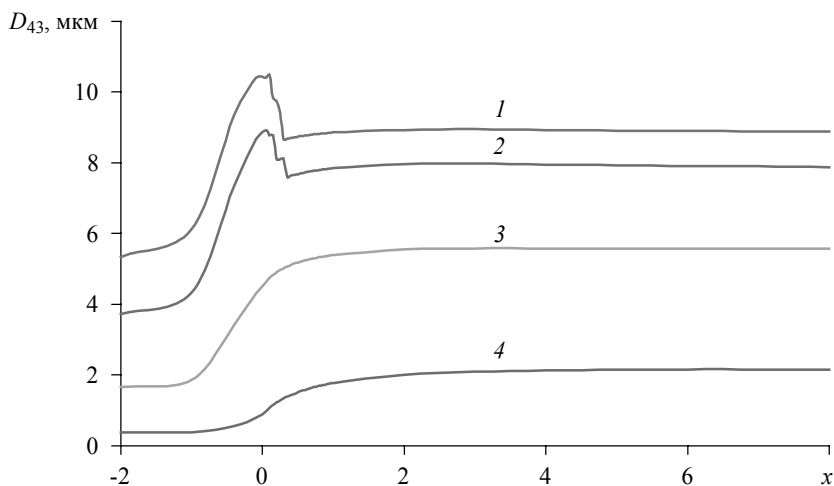


Рис. 1. Изменение среднемассового размера частиц вдоль сопла при $P_k = 70$ атм, $T_k = 3200$ К (1 — $r_0 = 1.5$ мкм, 2 — $r_0 = 1.0$ мкм, 3 — $r_0 = 0.5$ мкм, 4 — $r_0 = 0.1$ мкм)

На рис. 2 представлены результаты расчёта среднемассового размера частиц D_{43} на срезе сопла от среднего радиуса частиц r_0 на входе в сопло.

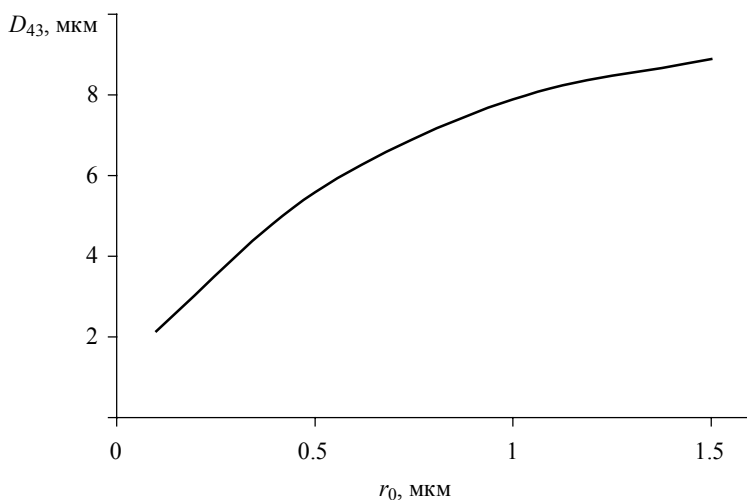


Рис. 2. Зависимость среднемассового размера частиц на срезе сопла D_{43} от среднего радиуса частиц на входе r_0 ($P_k = 70$ атм; $T_k = 3200$ К)

На рис. 3 представлена зависимость двухфазных потерь от среднего радиуса частиц (r_0) на входе в сопло.

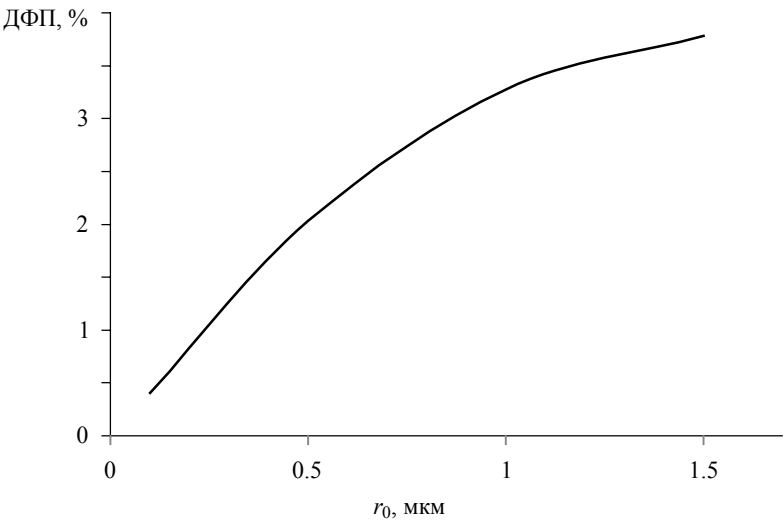


Рис. 3. Зависимость изменения двухфазных потерь двигателя (ДФП, %) от среднего радиуса частиц на входе r_0 ($P_k = 70$ атм; $T_k = 3200$ К)

В таблице представлены результаты численного расчёта среднемассового размера частиц на срезе сопла и значения двухфазных потерь для значений средних радиусов частиц на входе в сопло. Расчёты проведены при давлении газа в камере сгорания $P_k = 60$ атм; 70 атм; 80 атм и температуре в камере $T_k = 3000$ К; 3200 К; 3400 К.

r_0	P	T	D_{43}	ДФП	P	T	D_{43}	ДФП	P	T	D_{43}	ДФП
1.5	60	3000	8.759	3.8721	70	3000	9.138	3.9315	80	3000	9.476	3.9744
1	60	3000	7.713	3.3201	70	3000	8.128	3.4215	80	3000	8.494	3.5035
0.5	60	3000	5.290	1.9729	70	3000	5.720	2.1318	80	3000	6.103	2.2613
0.1	60	3000	1.716	0.3249	70	3000	2.251	0.4407	80	3000	2.812	0.5855
1.5	60	3200	8.506	3.721	70	3200	8.877	3.7807	80	3200	9.211	3.8248
1	60	3200	7.474	3.175	70	3200	7.883	3.2764	80	3200	8.348	3.3566
0.5	60	3200	5.147	1.882	70	3200	5.570	2.0323	80	3200	5.946	2.1646
0.1	60	3200	1.640	0.3059	70	3200	2.139	0.4090	80	3200	2.710	0.5416
1.5	60	3400	8.544	3.6826	70	3400	8.917	3.7385	80	3400	9.2540	3.7853
1	60	3400	7.518	3.1453	70	3400	7.253	3.091	80	3400	8.303	3.3271
0.5	60	3400	5.174	1.8579	70	3400	5.601	2.014	80	3400	5.981	2.1470
0.1	60	3400	1.632	0.2954	70	3400	2.15	0.3963	80	3400	2.702	0.5268

Заключение

Течение двухфазного потока, дискретной фазой которого является высокодисперсный ансамбль частиц оксида алюминия, сопровождается коагуляцией и дроблением частиц. С уменьшением размера частиц на входе уменьшается их среднемассовый размер на выходе и, как следствие, уменьшаются двухфазные потери

двигателя. Течение ультрадисперсного ансамбля частиц ($r_0 < 0.5$ мкм) сопровождается только коагуляцией частиц. Расчёты можно проводить без учёта дробления частиц как за счёт их взаимодействия с газом, так и за счёт их вращения.

Необходимо отметить, что вопрос формирования ансамбля частиц оксида при горении ультра- и нанопорошков алюминия остаётся открытым и требует своего решения.

Представленная работа может быть использована при разработке металлизированного топлива, а также при проектировании энергосистемы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во ТГУ, 1986. 262 с.
2. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техн. Комплексные и специальные разделы механики. М.: ВИНТИ, 1988. Т. 3. С. 3–80.
3. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.
4. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 366 с.
5. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
6. Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф. и др. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 6. С. 80–94.
7. Ворожцов А.Б., Глазунов А.А., Де Лука Л.Т. и др. Влияние применения наноалюминия на газодинамику высокоэнергетических установок // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2(28). С. 45–57.

Статья поступила 15.03.2016 г.

D'yachenko N.N., D'yachenko L.I., Gurova V.S., Sineokaya S.A. NUMERICAL INVESTIGATION OF THE FLOW OF COMBUSTION PRODUCTS CONTAINING HIGH-DISPERSIVE ALUMINUM POWDER IN THE SOLID-FUEL ROCKET ENGINE NOZZLES

DOI 10.17223/19988621/40/7

The work is devoted to the numerical investigation of the flow of metalized fuel combustion products in the rocket engine nozzle cluster. The system of equations for the gas-droplet environment is written in the model of interpenetrating multispeed and multitemperature continua. The condensed phase is represented by an ensemble of polydisperse liquid alumina particles. Coagulation and fragmentation are taken into account due to the interaction both with each other and with the gas. The description of condensate particle interaction is based on the continuous approach of variation in the size distribution function.

The dependence of two-phase losses of the engine on the size of aluminum oxide particles due to the nonequilibrium of the flow at the nozzle entrance is shown. Results of the numerical calculation of the quasi-one-dimensional steady flow of aluminized fuel combustion products in the profiled solid-fuel rocket engine nozzle are presented. Analysis of the calculation data suggests that the use of high-dispersed aluminum powder in composite solid propellants increases the specific impulse of the engine as compared to previously used powders.

Keywords: two-phase flow, particle size distribution function, polydisperse ensemble, coagulation and fragmentation of particles.

DYACHENKO Nikolay Nikolaevich (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: Dr.Dyachenko@gmail.com

DYACHENKO Lyudmila Ivanovna (Candidate of Physics and Mathematics, Scientific research institute of applied mathematics and mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: Dr.Dyachenko@gmail.com

GUROVA Valeriya Sergeevna (Student, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: valery0995@mail.ru

SINEOKAYA Sofiya Aleksandrovna (Student, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: sophia1994@mail.ru

REFERENCES

1. Vasenin I.M. et al. (1986) *Gazovaya dinamika dvukhfaznykh techeniy v soplakh* [Gas dynamics of two-phase flows in nozzles]. Tomsk: Tomsk State University.
2. Shrayber A.A. (1988) *Mnogofaznye polidispersnye techeniya s peremennym fraktsionnym sostavom diskretnykh vklyucheni* [Multiphase polydisperse flows with variable fractional composition of discrete inclusions]. *Itogi nauki i tekhniki. Kompleksnye i spetsial'nye razdely mekhaniki – Itogi Nauki i Tekhniki. Complex and special sections of mechanics*. Moscow: VINITI. 3. pp. 3–80.
3. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. (1989) *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie.
4. Pirumov U.G., Roslyakov G.S. (1990) *Gazovaya dinamika sopel* [Gas dynamics of nozzles]. Moscow: Nauka.
5. Sternin L.E., Shrayber A.A. (1994) *Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase flows of gas with particles]. Moscow: Mashinostroenie.
6. De Luca L.T., Galfetti L., Severini F. et al. (2005) *Gorenie smesevykh tverdykh topliv s nanorazmernym alyuminiem* [Burning of nano-aluminized composite rocket propellants]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 41(6). pp. 680–692.
7. Vorozhtsov A.B. et al. (2014) *Vliyanie primeneniya nanoalyuminiya na gazodinamiku vysokoenergeticheskikh ustanovok* [The impact of application of nanoaluminum on gas dynamics of high-energy systems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(28). pp. 45–57.