

**ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ/THERMAL, ELECTRIC ROCKET ENGINES AND POWER PLANTS OF AIRCRAFT**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71> EDN: [RRQKUM](#)**ОЦЕНКА ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТОПЛИВА**

Научная статья

**Елькин А.В.<sup>1,\*</sup>, Храмов М.Ю.<sup>2</sup>, Зорин М.Д.<sup>3</sup>, Доткин Г.А.<sup>4</sup>, Губин Р.Д.<sup>5</sup>, Шайдунова Г.И.<sup>6</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3138-8303;<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация<sup>1, 6</sup> ПАО НПО «Искра», Пермь, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (elkinav237[at]gmail.com)

**Аннотация**

При проектировании перспективных энергоустановок, применяющих порошкообразные и гранулированные топлива, проводится численное моделирование неравновесного истечения высококонцентрированной порошково-газовой среды из отверстия форсунки. Для безопасной отработки системы подачи проектируется экспериментальная установка, исключающая горение, тем самым нет необходимости использовать реальный состав топлива. Вместо него используется инертный порошок, идентичный по своим физико-механическим свойствам к реальному составу хлористого калия (KCl). В работе представлены результаты исследования дисперсных характеристик измельченного KCl. Полученные данные использовались при численном моделировании течения гранулированного топлива в форсунке системы подачи двигательной установки. Представлена методика оценки проектных параметров двигательной установки, а на её основе выполнен расчет проектных параметров двигательной установки космического аппарата.

**Ключевые слова:** перспективные энергоустановки, космический аппарат, проектирование, порошково-газовая среда, неравновесное изотермическое критическое течение.

**EVALUATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF THE SPACECRAFT'S PROPULSION SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE RESULTS OF GAS-DYNAMIC MODELLING OF GRANULATED FUEL FLOW**

Research article

**Elkin A.V.<sup>1,\*</sup>, Khramtsov M.Y.<sup>2</sup>, Zorin M.D.<sup>3</sup>, Dotkin G.A.<sup>4</sup>, Gubin R.D.<sup>5</sup>, Shaidurova G.I.<sup>6</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3138-8303;<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation<sup>1, 6</sup> PJSC Research and Production Association "ISKRA", Perm, Russian Federation

\* Corresponding author (elkinav237[at]gmail.com)

**Abstract**

When designing perspective power facilities that use powdered and granular fuels, numerical modelling of the non-equilibrium flow of a highly concentrated powder-gas medium from the nozzle hole is carried out. To ensure the safe operation of the delivery system, an experimental setup is designed that excludes combustion, thereby eliminating the need to use real fuel. Instead, an inert powder is used that is identical in its physical and mechanical properties to the real composition of potassium chloride (KCl). The paper presents the results of a study of the dispersion characteristics of crushed KCl. The acquired data were used in numerical modelling of the flow of granular fuel in the nozzle of the propulsion system. A method for evaluating the design parameters of the propulsion system is presented, and based on it, the design parameters of the spacecraft's propulsion system are calculated.

**Keywords:** perspective power facilities, space vehicle, design, powder-gas environment, non-equilibrium isothermal critical flow.

**Введение**

Двигательные установки (ДУ) на гранулированном топливе (ГТ) [1], [2], [3], [4] — перспективные энергоустановки, использующие порошкообразный высокоэнергетический материал в качестве топлива, обладающие следующими свойствами: многократное включение-выключение, многоразовое использование.

На стадии формирования облика разрабатываемого изделия необходимо оценить проектные параметры (давления, расходы, габариты изделия). Двигатели, использующие порошкообразные топлива активно изучаются [5], [6], [7], [9], однако сведений о методике оценки проектных параметров ДУ, применяющих гранулированное топливо, практически нет.

Надёжность безотказной работы ДУ на ГТ зависит во многом от устойчивости функционирования системы подачи (СП) топливного наполнителя. Для создания высокоэффективных и безопасных энергоустановок система подачи требует критического режима истечения среды из форсунки, при котором процессы, происходящие в камере сгорания (КС) не влияют на процессы, протекающие в системе подачи. Критическое истечение топлива из форсунки

достигается при критическом отношении давления в КС и давления на входе в форсунку, т.е., параметры системы подачи напрямую взаимосвязаны с параметрами КС.

Для численного моделирования критического истечения высококонцентрированной порошково-газовой среды из форсунки в настоящее время предложена одномерная математическая модель [10]. Как известно критическое отношение давлений на входе форсунки и на выходе из нее ( $\pi_{cr}$ ) для порошково-газовых сред имеет нелинейный характер [11], который возможно спрогнозировать используя численное моделирование, что важно при оценке проектных параметров ДУ.

Таким образом, условие стабильной работы системы подачи ДУ на ГТ:

$$\begin{cases} \pi \leq \pi_{cr} \\ \pi_{cr} = \frac{p_c}{p_0} \end{cases} \quad (1)$$

где  $p_c$  — рабочее давление в КС двигательной установки;  $p_0$  — давление на входе в форсунку в системе подачи.

Из условия (1) следует, что при заданном давлении  $p_0$  колебания давления в сторону уменьшения в камере сгорания не повлияют на устойчивость работы системы подачи.

Для обеспечения устойчивой работы системы подачи ГТ необходимо провести расчет критических параметров процесса истечения ГТ из форсунки, определяя зависимость  $\pi_{cr}$  от  $p_0$ , построить диаграмму этой зависимости, на которой должны быть указаны диапазоны устойчивой и неустойчивой работы (зоны критического и докритического истечения).

При заданном давлении  $p_0$ , вычисленное значение будет являться минимально допустимым отношением давлений между КС и СП ГТ.

$$\pi < \pi_{cr}^{min} \quad (2)$$

При проектировании системы подачи ДУ, зная давление в КС, необходимо определиться с диапазоном давлений перед форсункой  $p_0$ , при котором наблюдается установившийся режим процесса работы СП.

Расходные характеристики СП зависят от выбранной геометрии форсунки (диаметр критического сечения  $d_{cr}$ , угол к продольной оси  $\varphi$ ). Таким образом, необходимо провести расчеты критических параметров СП с заданными параметрами гранулированного топлива, в зависимости от давления перед форсункой и ее геометрии. Для упрощения задачи предусмотрен угол конусности форсунки постоянным  $\varphi = 22,5^\circ$ .

Численное моделирование предполагает использование дисперсных характеристик рассматриваемого порошкообразного материала (порозность (объем, занимаемый газом в среде порошка), размер частиц), которые могут быть установлены экспериментально.

Для верификации математической модели, представленной в [10], необходимо разработать экспериментальную установку для отработки процессов подачи ГТ в КС. Изучение процессов подачи не требует организации процессов воспламенения ГТ, поэтому для проведения безопасной отработки предлагается вместо гранулированного топлива использовать порошок, идентичный по своим физико-механическим свойствам к реальному ГТ.

В качестве порошка-«имитатора» выбран измельченный хлорид калия (KCl) [12]. Его физико-механические характеристики близки к предложенному составу ГТ (плотность состава ГТ:  $\sim 1900$  кг/м<sup>3</sup>; плотность KCl: 1984 кг/м<sup>3</sup>). Для повышения представительности расчетов, необходимо уточнение таких характеристик исходного порошка, как дисперсность и порозность.

Данные численного моделирования необходимы для оценки проектных параметров ДУ на ГТ. В качестве примера, полезно рассчитать проектные параметры ДУ на ГТ, применяющейся для космического аппарата (КА), разработка которой представляет актуальную научно-прикладную задачу [6], [13].

Целью представляемого исследования является поиск комплексного подхода в логичной последовательности для формирования методики оценки расчётных проектных параметров двигательной установки на гранулированном топливе для космического аппарата. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить дисперсность и порозность исходного KCl, порошка имитатора гранулированного топлива.
2. Определить диапазоны давлений перед форсункой устойчивой работы системы подачи.
3. Изучить влияние геометрии форсунки на параметры критического течения.
4. Сформировать рекомендации для проектных параметров системы подачи (давления в системе, геометрия форсунки).

## Методы и принципы исследования

### 2.1. Гранулометрический анализ

Гранулометрический анализ измельченного порошка хлорида калия проводился на экспериментальной лабораторной установке Mastersizer 2000 компании Malver Instruments Ltd. Реальный вид прибора представлен на рисунке 1. Диапазон измерения диаметров частиц порошка составляет от 0,1 мкм до 2000 мкм.



Рисунок 1 - Лабораторный прибор Mastersizer 2000  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.1>

На рис. 2 представлены результаты гранулометрического анализа измельченного порошка хлорида калия на установке Mastersizer 2000. Таким образом, средний поверхностный диаметр измельченного хлорида калия, используемый при расчете критических параметров по математической модели, описанной в [10], составляет 22,24 мкм.



Рисунок 2 - Гранулометрический анализ пробы  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.2>

## 2.2. Анализ порозности и уплотняемости порошковых материалов

Для исследования порозности хлорида калия использовалось следующее оборудование:

- стакан мерный цилиндрический 500...1000 мл и ценой деления 5 мл;
- точные электронные весы с погрешностью измерения 0,5 г;
- киянка резиновая;
- емкость для хранения порошка объемом не менее 1000...1500 мл.

Параметры порозности и уплотняемости определялись при частоте колебаний 3...4 Гц, амплитуде 5...10 мм и длительности колебаний 2...4 мин у искомого KCl по ГОСТ 4568-95 (100...1000 мкм). Истинная плотность хлорида калия принята  $\rho_m = 1984 \text{ кг/м}^3$ .

Исследование порошка заключается в определении коэффициентов порозности и способности к уплотняемости путем многократного определения насыпной и уплотненной плотностей материалов. Проводились не менее десяти экспериментов по уплотняемости каждого из порошков, определялись статистические параметры исследования (математическое ожидание (МО), среднеквадратическое отклонение (СКО), критерий Граббса, случайная, неисключённая систематическая погрешности (НСП) и суммарная), приведены порозности и уплотняемости исследуемых порошков с доверительными границами погрешности оценки измеряемой величины. Ниже представлен алгоритм измерения порозности и уплотняемости порошков:

- 1) проверить отсутствие посторонних веществ в мерном стакане и емкости для хранения порошка, при необходимости промыть водопроводной водой и высушить;
- 2) в емкость для хранения порошка объемом 1000...1500 мл насыпать один анализируемый порошок;
- 3) взвесить мерный стакан на электронных весах, зафиксировать результат;
- 4) из емкости во весь измеряемый объем мерного стакана насыпать анализируемый порошок;
- 5) мерный стакан с порошком взвесить на электронных весах, из полученного значения вычесть массу стакана, записать результат;
- 6) произвести уплотнение порошка — на мерный стакан в течение 2...4 мин приложить с помощью резиновой киянки вибро-воздействие, выполняя удары по внешней поверхности емкости;
- 7) нагрузку прикладывать до тех пор, пока изменение объема не будет менее половины цены деления стакана после 1 мин приложения нагрузки;
- 8) записать конечный объем, полученный в результате уплотнения порошка;
- 9) высыпать порошок из мерного стакана в емкость для хранения;
- 10) рассчитать начальную (до уплотнения) и конечную (после уплотнения) плотности порошка;
- 11) рассчитать начальную и конечную порозности порошка;
- 12) повторить пп. 4) – 11) не менее 9 раз;
- 13) определить статистические параметры исследований;
- 14) определить доверительные границы погрешности оценки полученных величин.

В п. 3.2 представлен подробный анализ полученных результатов проведенного исследования по определению порозности и уплотняемости порошков.

В ходе исследования порозности и уплотняемости порошков были проведены серии экспериментов по замеру массы, начального и конечного объемов анализируемых порошков, рассчитаны насыпная и уплотненная плотности материалов, определены коэффициенты порозности до и после уплотнения.

Проведено исследование порозности и уплотняемости измельченного хлорида калия. Результаты представлены в таблицах 1–2. Расчет статистических параметров выполнялся при доверительной вероятности  $P = 0,95$  по данным всех десяти экспериментов, так как максимальное и минимальное значения прошли проверку на исключение грубых погрешностей по критерию Граббса. Коэффициент Стьюдента  $t = 2,262$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и степени свободы  $f = 9$ .

Таблица 1 - Исследование порозности и уплотняемости измельченного KCl

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.3>

Номер эксперимента	$V_{нас}$ , мл	$V_{упл}$ , мл	$m$ , кг
1	1000	920	1069
2	1000	920	1043
3	1000	900	1062
4	990	870	1054
5	1000	880	1053
6	1000	900	1078
7	1000	895	1065
8	1000	895	1079
9	1005	890	1087
10	990	870	1067
$x_{cp}, A_{cp}$	999	894	1066
$S, S(A)$	4,74	17,61	13,43
$S_{x\{cp\}}$	1,50	5,57	4,25
$\varepsilon, \varepsilon(P)$	3,39	12,59	9,60
$\Theta_S, \Theta(P)$	2,50	2,50	0,50
$S_\Theta$	1,44	1,44	0,29
$K, (\Theta(P))/(S(A))$	2,00	2,15	2,23
$\Delta, \Delta(P)$	4	12	9

Примечание: прямое измерение параметров

Таблица 2 - Исследование порозности и уплотняемости измельченного KCl

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.4>

Номер эксперимента	$\rho_{нас}, \text{г/см}^3$	$\rho_{упл}, \text{г/см}^3$	$\epsilon_{нас}$	$\epsilon_{упл}$	$\nu$
1	1,069	1,162	0,461	0,414	0,080
2	1,043	1,134	0,474	0,429	0,080
3	1,062	1,180	0,465	0,405	0,100
4	1,065	1,211	0,463	0,389	0,121
5	1,053	1,197	0,469	0,397	0,120
6	1,078	1,198	0,457	0,396	0,100
7	1,065	1,190	0,463	0,400	0,105
8	1,079	1,206	0,456	0,392	0,105
9	1,082	1,221	0,455	0,384	0,114
10	1,078	1,226	0,457	0,382	0,121
$x_{cp}, A_{cp}$	1,067	1,192	0,462	0,399	0,105
$S, S(A)$	0,01437	0,02787	0,00542	0,01052	0,01814
$S_{x_{(cp)}}$	-	-	-	-	-
$\epsilon, \epsilon(P)$	0,03250	0,06304	0,01227	0,02379	0,04103
$\Theta_S, \Theta(P)$	0,00299	0,00372	0,00124	0,00154	0,00370
$S_\Theta$	-	-	-	-	-
$K, (\Theta(P))/S(A)$	0,20812	0,13341	0,22894	0,14676	0,20380
$\Delta, \Delta(P)$	0,033	0,063	0,012	0,024	0,041

Примечание: косвенное измерение

Таким образом, насыпная порозность хлорида калия составила:  $\epsilon_{нас} = 0,462 \pm 0,012$ .Порозность хлорида калия после уплотнения:  $\epsilon_{упл} = 0,399 \pm 0,024$ .Уплотняемость хлорида калия составляет:  $\nu = (10,5 \pm 4,1)\%$ .

Уплотненная плотность хлорида калия рассчитана по формуле:

$$\rho_t = \rho_m(1 - \epsilon_{упл}) \quad (3)$$

Таким образом, уплотненная плотность для следующих расчетов принимается равной 1190,4 кг/м<sup>3</sup>.**2.3. Численное моделирование течения порошково-газовой среды**

В предыдущем разделе определены параметры измельченного порошка KCl, использующегося в качестве имитатора ГТ. Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Исходные данные для численного моделирования истечения KCl с азотом из форсунки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.5>

Параметр	Значение
Давление на входе в форсунку, $p_0$ , МПа	0,5...4,0
Радиус критического сечения, $r_{cr}$ , мм	1,0...2,0
Длина участка, $z$ , мм	21,0
Угол конусности форсунки, $\varphi$ , °	24,0
Минимальная (предельная) порозность, $\epsilon_0$	0,40
Средний диаметр по поверхности частиц, $d_{3,2}$ , мкм	22,24
Плотность материала, $T$ , кг/м <sup>3</sup>	1984
Температура газа, К	298,15
Газовая постоянная, $R_g$ , Дж/(кг·К)	296,50
Динамическая вязкость, $\eta$ , Па·с	$17,78 \cdot 10^{-6}$
Толщина вытеснения, $\delta$ , м	0,0001

Для проведения испытаний для разрабатываемой экспериментальной установки изготовлена партия форсунок, геометрия которых представлена в таблице 2.

Как известно, на критические параметры сильно влияют параметры геометрии форсунки. Изучено влияние диаметра критического сечения при постоянном угле конусности форсунки. Для форсунок с разными диаметрами критического сечения в результате численного моделирования с использованием математической модели [10] получены следующие зависимости от давления на входе в форсунку (рис. 3–6):

- Критического отношения давлений.
- Отношения расходов фаз.
- Критического удельного расхода порошка;
- Неравновесной критической изотермической скорости порошка.
- Координаты начала процесса перехода предельно-уплотненного течения порошка в псевдооживленное.

Получены следующие зависимости от диаметра критического сечения при постоянном угле конусности форсунки (рис. 7–8):

- Критического удельного расхода порошка.
- Отношения расходов фаз.

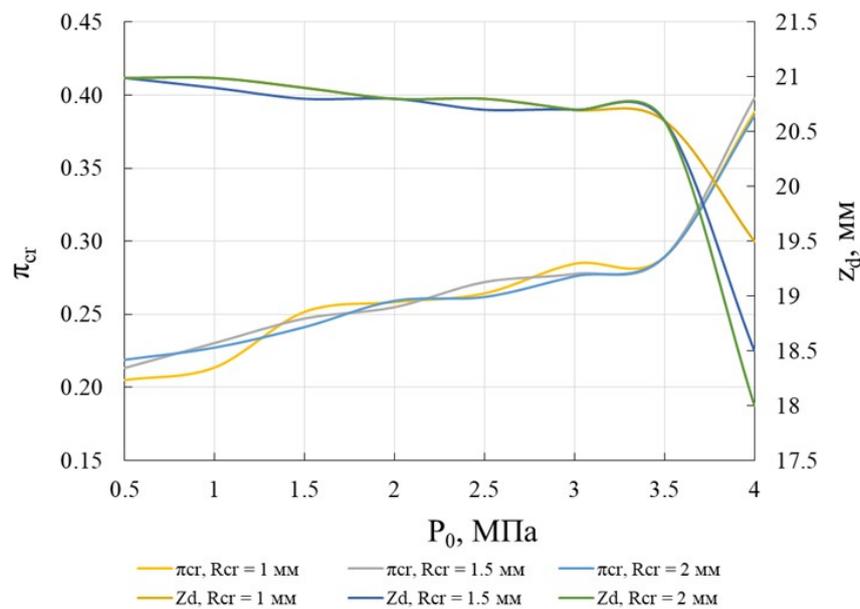


Рисунок 3 - Критическое отношение давлений в зависимости от давления на входе в форсунку для разных диаметров критического сечения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.6>

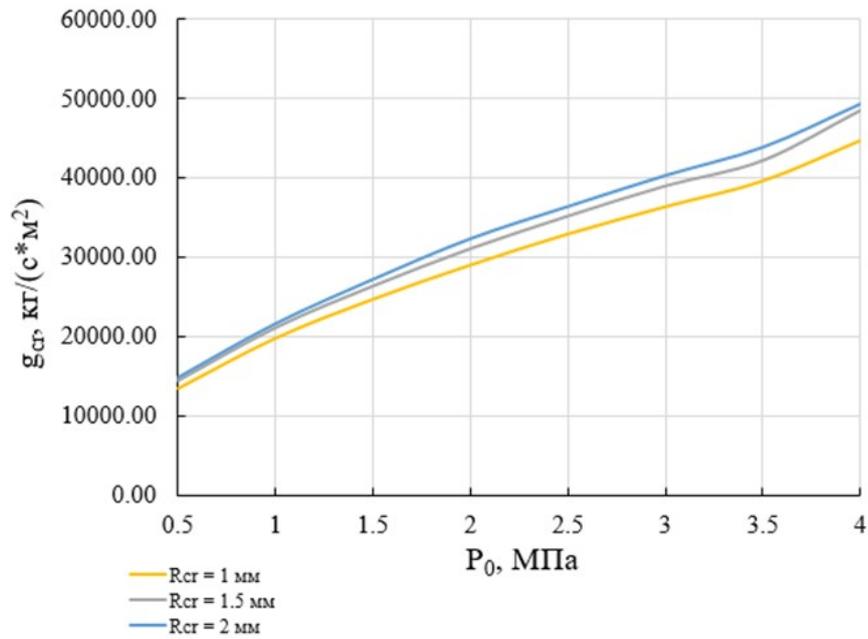


Рисунок 4 - Критический удельный расход порошка в зависимости от давления на входе в форсунку для разных диаметров критического сечения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.7>

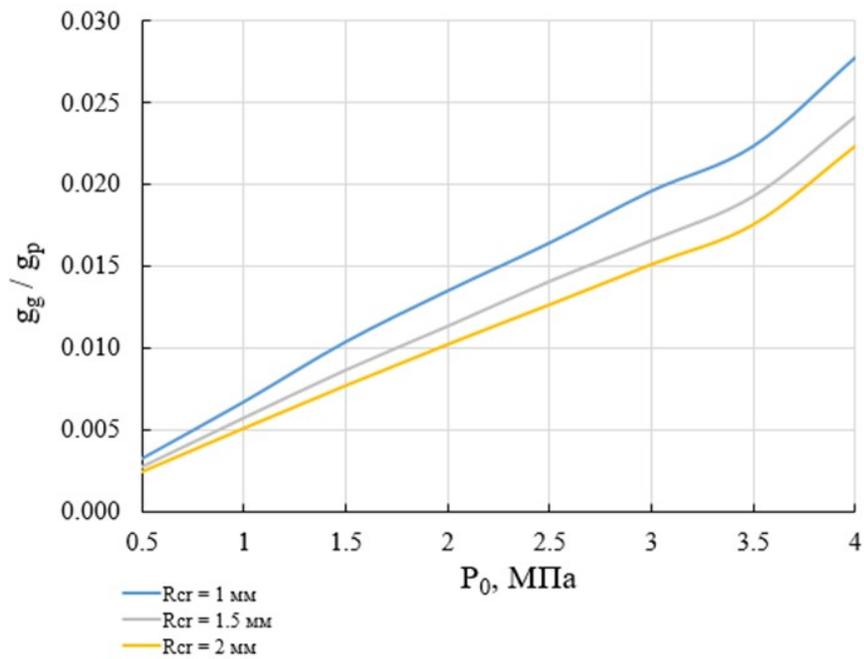


Рисунок 5 - Отношение расходов фаз в зависимости от давления на входе в форсунку для разных диаметров критического сечения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.8>

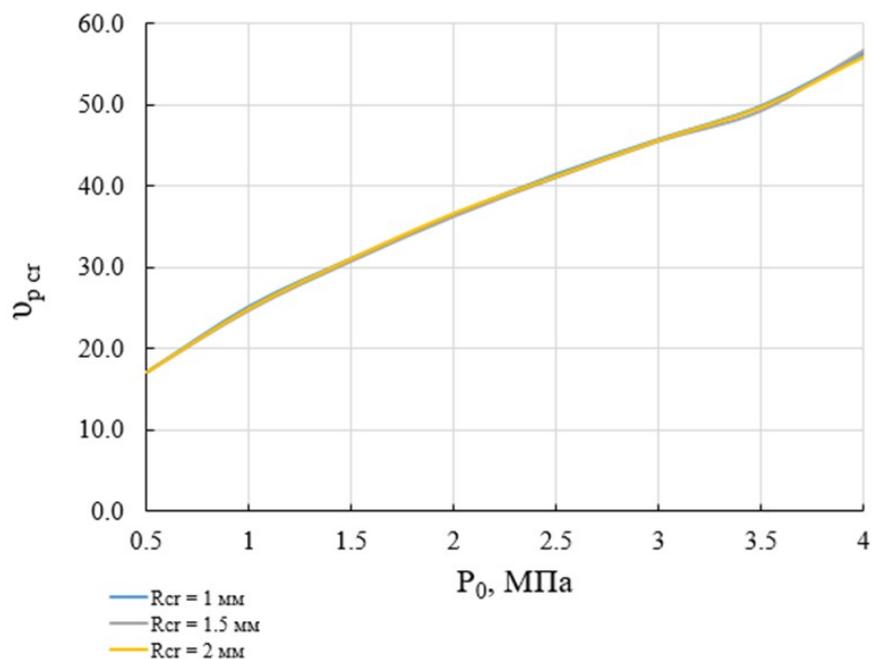


Рисунок 6 - Неравновесная изотермическая критическая скорость порошка в зависимости от давления на входе в форсунку для разных диаметров критического сечения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.9>

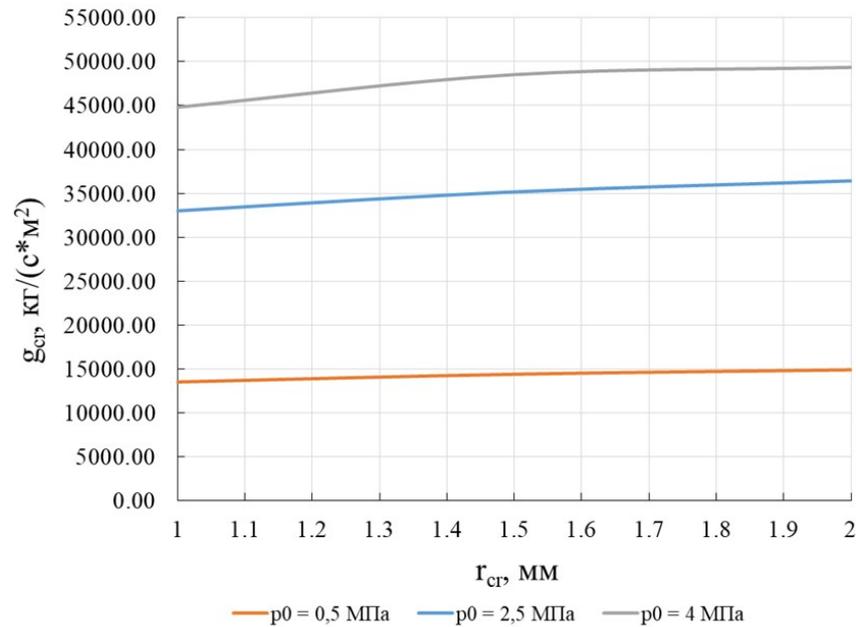


Рисунок 7 - Критический удельный расход порошка в зависимости от диаметра критического сечения при постоянном угле конусности форсунки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.10>

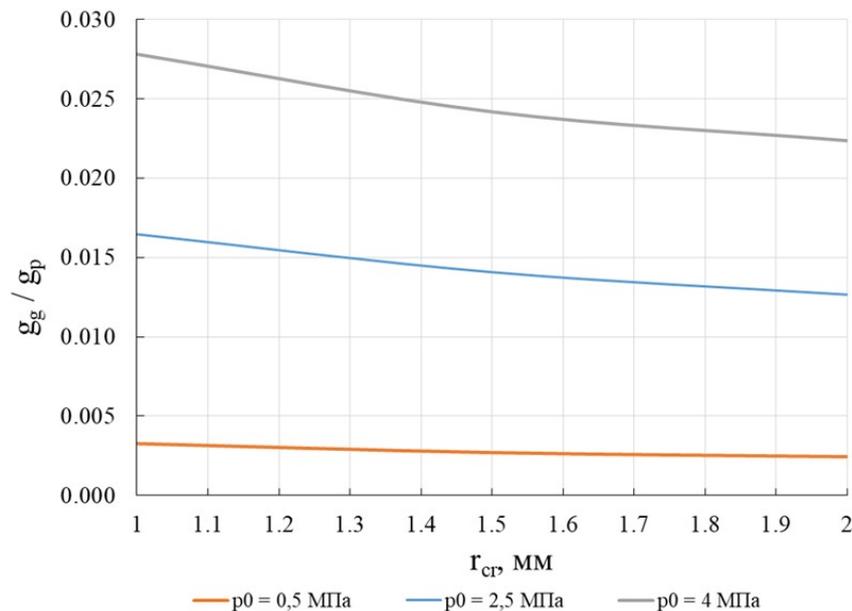


Рисунок 8 - Отношение расходов фаз в зависимости от диаметра критического сечения при постоянном угле конусности форсунки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.11>

Из рисунка 3 следует, что в диапазоне рассматриваемых диаметров критического сечения кривые критического отношения давлений практически совпадают, тем самым можно считать, что при постоянном угле конусности для разных диаметров критического сечения закон, по которому изменяется критическое отношение давлений имеет одинаковый вид.

Из рисунка 3 также следует, что с повышением давления в системе подачи уменьшаются потери давления в критическом сечении форсунки. До  $p_0 = 3,5$  МПа разуплотнение потока порошка происходит вблизи критического сечения ( $z - z_d \leq 0,2$  мм), далее координата разуплотнения стремительно изменяется, потери давления резко уменьшаются. Этот факт необходимо учитывать при выборе давления в камере сгорания.

## Основные результаты

### 3.1. Предлагаемые рекомендации

1. При подаче топлива в камеру сгорания должно сохраняться критическое отношение давлений между камерой сгорания и системой подачи (т.е., должно выполняться условие  $\pi <$ ).

2. Используя полученную зависимость, можно рассчитать давление, реализуемое в камере сгорания. Колебания давления вверх в КС могут привести к прекращению критического режима истечения порошково-газовой среды из форсунки, что, в свою очередь, может привести к возгоранию топливного бака.

3. При выборе давления в системе необходимо указать коэффициент безопасности, минимальное значение которого может уточняться по результатам огневых испытаний. Можно рассчитать давление в камере сгорания по формуле (4):

$$P_{КС} = \frac{\pi_{cr}}{K} P_0 \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент безопасности.

На рисунке 9 представлен график для определения давления в системе подачи и камере сгорания.

Варьируя давление в камере сгорания, с учетом коэффициента безопасности, по рисунку 9 выбирается минимальное давление в системе подачи, необходимое для достижения критического режима течения топлива из форсунки. Возможен обратный путь: задаваясь давлением в системе подачи определяется максимальное давление КС, при котором сохраняется критический режим истечения топлива из форсунки.

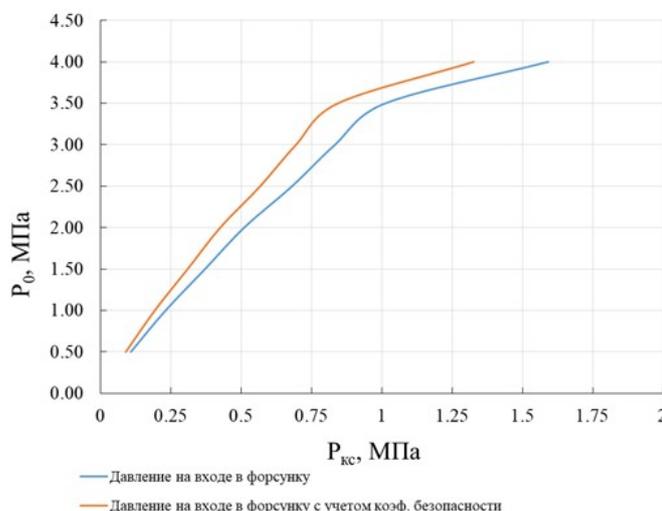


Рисунок 9 - График для определения давления в системе подачи и камере сгорания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.12>

4. Другим требованием к системе подачи гранулированного топлива является минимальный расход газа. Как следует из рисунка 8, расход газа устанавливается постоянным, ориентировочно, с радиуса форсунки 2 мм и далее принимает постоянное минимальное значение на разных давлениях в системе подачи.

Методически предварительная оценка проектных параметров двигательной установки при критическом течении гранулированного топлива в системе подачи предусматривает оценочный расчет ДУ на ГТ для космического аппарата. Исходные данные для расчёта представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные для проектного расчёта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.13>

Параметр	Значение
Тяга, $H$ , не менее	392
Время работы двигателя в непрерывном режиме, $t$ , с, не менее	1000
Удельный импульс ДУ в пустоте, м/с	2885,5
Насыпная плотность топлива, $\rho_t$ , кг/м <sup>3</sup>	1190,4
Номинальное давление в КС, МПа	1
Количество форсунок	2
Коэффициент безопасности системы подачи, $K_b$	1,20
Коэффициент запаса топлива, $K_{zb}$	1,10

Параметр	Значение
Коэффициент запаса вытеснительного газа, $K_{zg}$	1,25

Другие исходные данные для расчета – это результаты численного моделирования критического истечения порошково-газовой среды с имитатором гранулированного топлива, а именно:

- Зависимость критического отношения давлений (рис. 3) от давления на входе в форсунку.
- Зависимость критического удельного расхода (рис. 4) от давления на входе в форсунку.
- Зависимость относительного расхода газа (рис. 5) от давления на входе в форсунку.

Давление в камере сгорания задано в исходных данных, согласно которому определяется минимальное давление перед форсункой по графику, представленному на рис. 9 с учетом закладываемого коэффициента безопасности (учитывает возможное повышение давления в КС). Минимальное давление перед форсункой  $p_0^{min}$ , которое обеспечит критический режим истечения топлива из форсунки, составит 3,662 МПа.

Кривые на рис.7 определяют радиус критического сечения форсунки. Для упрощения расчета задается радиус критического сечения 1 мм и далее по графику, представленному на рисунке 4, определяется критический удельный расход гранулированного топлива  $g_p$ , который составит 41233,27 кг/(с·м<sup>2</sup>). Разделив это значение на площадь критического сечения и умножив его на количество форсунок, получается номинальный расход топлива (на непрерывном режиме), который составит 0,259 кг/с. Пользуясь графиком на рисунке 5 можно определить номинальный расход газа на непрерывном режиме составит 0,0054 кг/с.

По формуле (4) вычисляется необходимая масса топлива:

$$\omega_t = \tau G_p K_{zp} \quad (4)$$

По формуле (5) необходимая масса вытеснительного газа составит:

$$\omega_g = \omega_t \frac{g_g}{g_p} K_{zp} \quad (5)$$

Таблица 5 - Результаты расчета проектных параметров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.71.14>

Наименование параметра	Значение
Масса топлива, кг	284,984
Масса вытеснительного газа, кг	7,459
Требуемое минимальное давление перед форсункой, МПа	3,662
Давление в камере сгорания, МПа	1
Время работы двигателя в непрерывном режиме работы, с	1000
Тяга на непрерывном режиме работы, Н	747,565
Количество форсунок	2
Радиус критического сечения форсунки, м	0,001
Угол, $\varphi$ , °	24,0
Радиус входного сечения форсунки, м	0,005
Номинальный массовый расход топлива, кг/с	0,259
Номинальный массовый расход вытеснительного газа, кг/с	0,0054
Удельный импульс тяги двигателя в пустоте, м/с	2885,5
Объем топлива с учетом пор, м <sup>3</sup>	4,18

Таким образом, в таблице 5 представлены параметры системы подачи, которая удовлетворяет заданные требования исходных данных: обеспечивает необходимые тяговые характеристики двигателя при сохранении устойчивой работы.

### Обсуждение

Очевидным является то, что для выполнения заданных требований можно подобрать форсунку с другой геометрией, которая обеспечила бы меньшие значения расходных характеристик. Тем не менее, одной из рассматриваемых задач было предложить методику оценки проектных параметров системы подачи. Чтобы оптимизировать значения проектных параметров необходимо более детально изучить влияние геометрии форсунки на газодинамические параметры критического истечения порошково-газовой среды из форсунки, что позволит выбрать оптимальный вариант геометрии форсунки.

**Заключение**

1. Для проведения экспериментальных исследований и безопасной отработки системы подачи гранулированного топлива предложено использование инертного альтернативного порошка, имитирующего физико-механические свойства предполагаемого состава топлива. В качестве такого порошка выбран измельченный (безопасный) хлорид калия. Методом лазерной дифракции определен уровень дисперсности (средний поверхностный диаметр частиц продукта).

2. Представлены результаты численного моделирования критического истечения хлорида калия в среде инертного газа (азота) из форсунки. Для форсунок с разными диаметрами критического сечения получены следующие зависимости от давления на входе в форсунку:

- Критического отношения давлений.
  - Отношения расходов фаз.
  - Критического удельного расхода порошка.
  - Неравновесной критической изотермической скорости порошка.
  - Координаты начала процесса перехода предельно-уплотненного течения порошка в псевдоожидженное состояние.
- Получены следующие зависимости от диаметра критического сечения при постоянном угле конусности форсунки:
- Критического удельного расхода порошка.
  - Отношения расходов фаз.

3. Приведена методика оценки проектных параметров двигательной установки на гранулированном топливе. Выполнен оценочный расчет проектных параметров двигательной установки на гранулированном топливе космического аппарата.

**Финансирование**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00285, <https://rscf.ru/project/24-29-00285/>.

**Funding**

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00285).

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Елькин А.В. Двигательные установки беспилотного летательного аппарата на гранулированном твердом топливе / А.В. Елькин, Р.Д. Губин, В.И. Малинин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2022. — № 70. — С. 112–121. — DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.11. — EDN: HVVJNC.
2. Елькин А.В. Ракетный двигатель на гранулированном твердом топливе / А.В. Елькин, Е.С. Земерев, В.И. Малинин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2021. — № 64. — С. 16–24. — DOI: 10.15593/2224-9982/2021.64.02. — EDN: LUTNLE.
3. Доткин Г.А. Разработка экспериментальной установки критического истечения порошково-газовых смесей / Г.А. Доткин, М.Д. Зорин, В.И. Малинин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2024. — № 77. — С. 61–73. — DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.06. — EDN: DBYEIL.
4. Елькин А.В. Ракетный двигатель на гранулированном твердом топливе для космического летательного аппарата / А.В. Елькин, В.И. Малинин, Л.Л. Хищенко // Космонавтика и ракетостроение. — 2024. — № 2 (135). — С. 77–92. — EDN: RLVXOA.
5. Huang L. Numerical and experimental investigation of a Mg/N<sub>2</sub>O powdered fuel rocket engine / L. Huang, L. Meng, P. Li [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Vol. 2478. — P. 032059. — DOI: 10.1088/1742-6596/2478/3/032059.
6. Li M. Application and performance estimation of Mg/CO<sub>2</sub> engine on Mars / M. Li, C. Hu, Z. Wang // Acta Astronautica, 192. — 2021. — Vol. 192. — P. 197–205. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.032.
7. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах / Д.А. Ягодников. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 444 с.
8. Yang J. Experimental investigation on the starting and flow regulation characteristics of powder supply system for powder engines / J. Yang, C. Hu, J. Hu [et al.] // Acta Astronautica. — 2021. — Vol. 180. — P. 73–84. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.12.004. — EDN: ADALYC.
9. Hu J. Experimental study on the working performance of powdered magnesium and liquid carbon dioxide bipropellant rocket engine for Mars missions / J. Hu, C. Hu, Y. Che [et al.] // Acta Astronautica. — 2021. — Vol. 184. — P. 274–285. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.04.025. — EDN: PJRGYY.



10. Елькин А.В. Критическое истечение порошково-газовой смеси из форсунки системы подачи порошкообразного топлива / А.В. Елькин, В.И. Малинин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 6 (144). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.159. — EDN: JWSNWO.
11. Земерев Е.С. Критическое истечение сыпучих материалов в пневмотранспортной системе подачи порошков: дис. ... канд. техн. наук / Земерев Евгений Сергеевич. — 2017. — 116 с. — EDN: SJUNDI.
12. Хименко Л.Л. Исследование режимов получения порошка хлорида калия с заданными свойствами / Л.Л. Хименко, Р.А. Бердников, В.И. Малинин [и др.] // Перспективные технологии для систем безопасности. — 2024. — № 1 (3). — С. 104–111. — EDN: QBOGOE.
13. Елькин А.В. Двигательная установка на гранулированном твердом топливе космического аппарата очистки околоземного пространства от космического мусора / А.В. Елькин, Р.Д. Губин, В.И. Малинин // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2023). Липановские чтения: Сборник трудов одиннадцатой всероссийской конференции и школы-семинара молодых ученых и студентов, Ижевск, 14–16 июня 2023 года. — Ижевск: Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 2024. — С. 59–65. — EDN: FYAHNC.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Yelkin A.V. Dvigatelnie ustanovki bespilotnogo letatel'nogo apparata na granulirovannom tverdom toplive [Propulsion systems for unmanned aerial vehicles using granular solid fuel] / A.V. Yelkin, R.D. Gubin, V.I. Malinin // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of Perm National Research Polytech University. Aerospace Engineering]. — 2022. — No. 70. — P 112–121. — DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.11. — EDN: HVVJNC. [in Russian]
2. Yelkin A.V. Raketnii dvigatel na granulirovannom tverdom toplive [Rocket engine on granular solid fuel] / A.V. Yelkin, Ye.S. Zemerev, V.I. Malinin [et al.] // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering]. — 2021. — № 64. — P. 16–24. — DOI: 10.15593/2224-9982/2021.64.02. — EDN: LUTNLE. [in Russian]
3. Dotkin G.A. Razrabotka eksperimentalnoi ustanovki kriticheskogo istecheniya poroshkovo-gazovikh smesei [Development of an experimental setup for critical flow of powder-gas mixtures] / G.A. Dotkin, M.D. Zorin, V.I. Malinin [et al.] // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering]. — 2024. — № 77. — P. 61–73. — DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.06. — EDN: DBYEIL. [in Russian]
4. Yelkin A.V. Raketnii dvigatel na granulirovannom tvordom toplive dlya kosmicheskogo letatel'nogo apparata [Rocket engine on granular solid fuel for space vehicles] / A.V. Yelkin, V.I. Malinin, L.L. Khimenko // Kosmonavtika i raketostroenie [Cosmonautics and Rocket Engineering]. — 2024. — № 2 (135). — P. 77–92. — EDN: RLVXOA. [in Russian]
5. Huang L. Numerical and experimental investigation of a Mg/N<sub>2</sub>O powdered fuel rocket engine / L. Huang, L. Meng, P. Li [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Vol. 2478. — P. 032059. — DOI: 10.1088/1742-6596/2478/3/032059.
6. Li M. Application and performance estimation of Mg/CO<sub>2</sub> engine on Mars / M. Li, C. Hu, Z. Wang // Acta Astronautica, 192. — 2021. — Vol. 192. — P. 197–205. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.032.
7. Yagodnikov D.A. Gorenie poroshkoobraznykh metallov v gazodispersnykh sredakh [Combustion of powdered metals in gas-disperse environments] / D.A. Yagodnikov. — Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2018. — 444 p. [in Russian]
8. Yang J. Experimental investigation on the starting and flow regulation characteristics of powder supply system for powder engines / J. Yang, C. Hu, J. Hu [et al.] // Acta Astronautica. — 2021. — Vol. 180. — P. 73–84. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.12.004. — EDN: ADALYC.
9. Hu J. Experimental study on the working performance of powdered magnesium and liquid carbon dioxide bipropellant rocket engine for Mars missions / J. Hu, C. Hu, Y. Che [et al.] // Acta Astronautica. — 2021. — Vol. 184. — P. 274–285. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.04.025. — EDN: PJRGYY.
10. Yelkin A.V. Kriticheskoe istechenie poroshkovo-gazovoi smesi iz forsunki sistemi podachi poroshkoobraznogo topliva [Critical leakage of powder-gas mixture from the nozzle of the powder fuel supply system] / A.V. Yelkin, V.I. Malinin // Mezhdunarodnii nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 6 (144). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.159. — EDN: JWSNWO. [in Russian]
11. Zemerev Ye.S. Kriticheskoe istechenie sipuchikh materialov v pnevmotransportnoi sisteme podachi poroshkov [Critical flow of bulk materials in a pneumatic powder conveying system]: diss. ... PhD in Technical Sciences / Zemerev Yevgenii Sergeevich. — 2017. — 116 p. — EDN: SJUNDI. [in Russian]
12. Khimenko L.L. Issledovanie rezhimov polucheniya poroshka khlorida kaliya s zadannimi svoystvami [Study of methods for obtaining potassium chloride powder with specified properties] / L.L. Khimenko, R.A. Berdnikov, V.I. Malinin [et al.] // Perspektivnie tekhnologii dlya sistem bezopasnosti [Promising technologies for security systems]. — 2024. — № 1 (3). — P. 104–111. — EDN: QBOGOE. [in Russian]
13. Yelkin A.V. Dvigatel'naya ustanovka na granulirovannom tverdom toplive kosmicheskogo apparata ochistki okolozemnogo prostranstva ot kosmicheskogo musora [Propulsion system on granular solid fuel for a spacecraft designed to clean up space debris from near-Earth space] / A.V. Yelkin, R.D. Gubin, V.I. Malinin // Vnutrikamernie protsessi i gorenie v ustanovkakh na tverdom toplive i stvolnykh sistemakh (ICOC'2023). Lipanovskie chteniya: Sbornik trudov odinnadtsatoi vserossiiskoi konferentsii i shkoli-seminara molodikh uchenikh i studentov, Izhevsk, 14–16 iyunya 2023 goda [Intra-chamber processes and combustion in solid fuel systems and barrel systems (ICOC'2023). Lipanovo Readings: Proceedings of the



Eleventh All-Russian Conference and School-Seminar for Young Scientists and Students, Izhevsk, 14–16 June 2023]. — Izhevsk: Udmurt Federal Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024. — P. 59–65. — EDN: FYAHNC. [in Russian]