

УДК 629.7.036

DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.06

**Г.А. Доткин, М.Д. Зорин, В.И. Малинин,
А.В. Елькин, М.Ю. Храмов, Р.Д. Губин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КРИТИЧЕСКОГО ИСТЕЧЕНИЯ ПОРОШКОВО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Посвящена разработке экспериментальной установки критического истечения и проектированию устройства регулирования расхода для исследования процесса подачи порошкового (гранулированного) топлива в камеру сгорания ракетных и прямоточных двигателей. Основные требования к новой экспериментальной установке – обеспечение возможно более полной имитации порошкообразных топлив, безопасность при работе с установкой, простота конструкции и возможность ее модернизации, наличие аппаратно-программного комплекса. На основе поставленных требований спроектированы конструктивно-компоновочные схемы устройства регулирования расхода и экспериментальной установки, пневматическая схема, схема расположения измерительных датчиков, разработана программа испытаний на данной установке. Описан способ измерения и регистрации параметров – измерения записываются с частотой 10 Гц, расчетные величины вычисляются автоматически на основе измерений, для последующей обработки параметры усредняются на определенном временном промежутке. Установка критического истечения порошково-газовых смесей позволит проводить эксперименты по определению дроссельных характеристик (удельных расходов газа и порошка), а также зависимости критического отношения давлений от геометрических характеристик форсунок и давления на входе в форсунку. В отличие от классической газодинамики, где критическое отношение давлений газа не зависит от давления на входе, критическое отношение для порошково-газовой смеси может изменяться при изменении давления на входе. Предполагаемый качественный вид дроссельных характеристик для двухфазной среды «порошок + газ» в зависимости от давления на входе – степенная функция с показателями 0,5 и 1,5 для порошка и газа соответственно, как и экспериментальные зависимости, полученные на установке-прототипе. Количественные результаты могут отличаться по причине отличия физико-механических свойств материалов. Путем построения дроссельных характеристик определяются оптимальные геометрические характеристики форсунок.

Ключевые слова: порошковое металлическое горючее, гранулированное топливо, экспериментальная установка, устройство регулирования расхода, критическое истечение, пневматическая схема, критическое отношение давлений, дроссельная характеристика, система подачи, двухфазная среда.

G.A. Dotkin, M.D. Zorin, V.I. Malinin, A.V. Elkin, M.Yu. Khramtsov, R.D. Gubin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF THE POWDER-GAS MIXTURES CRITICAL EXHAUST EXPERIMENTAL PLANT

The paper is dedicated to the development of a critical exhaust experimental plant and the design of a flow control device to study the processes of supplying powder (granular) fuel into the rocket and ramjet engines combustion chamber. Basic new experimental plant requirements are providing of the most complete powder propellant supply simulation, safety when working with the plant, design simplicity and its modernization possibility, hardware and software complex availability. Based on the stated requirements, design and layout diagrams of the flow control device and the experimental plant, a pneumatic diagram, a diagram of the measuring sensors arrangement were designed, and a test program for this plant was developed. A method for measuring and recording parameters is described – measurements are recorded at a frequency of 10 Hz, calculated values are calculated automatically based on measurements, for subsequent processing, the parameters are averaged over a certain time period. The powder-gas mixtures critical outflow plant will make it possible to conduct experiments to determine the throttle characteristics (of the gas and powder specific flow rates), as well as the dependence of the critical pressure ratio on the nozzle geometrical characteristics and the nozzle inlet pressure. Unlike classical gas dynamics, where the critical gas pressures ratio doesn't depend on the inlet pressure, the critical ratio for powder-gas mixture might change as the inlet pressure changes. The assumed qualitative form of the throttling characteristics for a two-phase medium "powder + gas" depending on the inlet pressure is a power function with exponents of 0.5 and 1.5 for powder and gas, respectively, as are the experimental dependences obtained on the prototype installation. Quantitative results are expected to differ due to differences in the materials physical and mechanical properties. By constructing the throttle characteristics, the nozzle optimal geometric characteristics are determined.

Keywords: powder metal propellant, granular propellant, experimental plant, flow control device, critical flow, pneumatic circuit, critical pressures ratio, throttle characteristics, supply system, two-phase medium.

Разработка новых видов топлива для различных двигательных установок (ДУ) является актуальной задачей современного ракетного двигателестроения. В настоящее время ведется активное изучение нового типа горючего порошкового материала – гранулированного топлива (ГТ), проводится анализ его применимости для разных видов энергетических систем, рассматриваются преимущества ГТ по сравнению с существующими топливами (жидкими и твердыми, порошкообразными металлическими горючими) [1–5]. Исследуемый тип топлива получил свое развитие из работ, связанных с освоением порошкообразных металлических горючих [6, 7].

Так как топливо в ДУ находится в форме гранул, а его подача осуществляется совместно с ожижающим газом, ГТ обладает текучестью и возможностью регулирования расхода. Поэтому ГТ при работе двигателя обладает свойствами жидкого топлива. При неработающей ДУ ГТ не насыщается газом и обладает свойствами твердого топлива.

На сегодняшний день активно разрабатываются новые схемы систем подачи порошковых топлив и теории их критического истечения при насыщении газом [8–17]. Несмотря на активное развитие теоретических знаний о горючих порошковых материалах, экспериментальные исследования в данной области практически не затрагивают критическое истечение – режим истечения, при котором происходящие в камере сгорания процессы не влияют на процессы в системе подачи. В работе [8] рассматривается критический режим истечения порошка алюминия, но он обладает отличными от ГТ физико-механическими свойствами. Исходя из этого, данное исследование направлено на разработку экспериментальной установки по исследованию критического истечения ГТ и других сыпучих материалов, отличающихся от порошка алюминия. Установка позволит определять оптимальные параметры устройства регулирования расхода (УРР), изучать процессы в системе подачи и имитировать подачу гранул в камеру сгорания (КС) ДУ.

Целью работы является разработка экспериментальной установки критического истечения и УРР для исследования процесса подачи порошкового (гранулированного) топлива в КС ракетных и прямоточных двигателей.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- 1) сформулировать теоретические основы проведения экспериментальных работ;
- 2) сформировать требования к экспериментальной установке подачи ГТ;
- 3) разработать конструктивно-компоновочную схему УРР порошковых материалов;
- 4) разработать пневматическую схему установки;
- 5) разработать схему расположения датчиков контроля и управления;
- 6) разработать программу и методику проведения испытаний.

Теоретические основы критического истечения высококонцентрированных порошково-газовых смесей

При движении двухфазной среды «порошок + газ» вдоль канала переменного сечения вводится допущение об изотермичности потока. Данная особенность физического процесса реализуется благодаря следующим двум факторам:

1. Масса газа во всем объеме потока меньше массы порошка на 2–3 порядка [6, 11].
2. В потоке происходит интенсивный теплообмен между газом и поверхностью частиц, вследствие чего температуры фаз выравниваются [8, 9].

Механика движения порошково-газовой смеси описывается следующей системой уравнений [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_p \cdot \frac{dv_p}{dz} = - \frac{dp}{dz}, \quad (1) \\ \frac{dp}{dz} = - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot s \cdot f_{,z} \quad (2) \\ G_g = \varepsilon \rho_g \cdot v_g \cdot F, \quad (3) \\ G_p = (1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot v_p \cdot F, \quad (4) \\ v_{p-cr} = \sqrt{\frac{\pi_{cr} \cdot P_0}{(1-\varepsilon_{cr}) \cdot \varepsilon_{cr} \cdot \rho_m}}, \quad (5) \end{array} \right.$$

где: g_p – удельный расход газа, кг/(с·м²); v_p – скорость частиц порошка, м/с; ε – порозность частиц порошка; s – объемная поверхность частиц порошка, м⁻¹; f_z – удельная сила газового потока, Па; ρ_m – плотность частиц порошка, кг/м³; G_g – расход газа, кг/с; ρ_g – плотность газа, кг/м³; v_g – скорость газа, м/с; F – площадь сечения, м².

Уравнение (1) является законом сохранения импульса для порошка. Уравнение (2) учитывает физико-механические характеристики частиц [17]. Уравнения (3), (4) – уравнения неразрывности для газа и порошка соответственно. Уравнение (5) – критическая скорость порошка [8].

Теоретический анализ критического истечения порошково-газовой среды в [9] показывает, что величина критического отношения давлений на входе и выходе сужающегося канала зависит от давления перед входным отверстием канала. Данная зависимость принципиально отличает механику двухфазной среды от механики «чистого» газа, для которого величина критического отношения давления не зависит от давления на входе в канал и является постоянной [19].

Требования к экспериментальной установке подачи гранулированного топлива

Описанная выше математическая модель не позволяет в полной мере описать физический процесс критического истечения ГТ по следующим причинам: некоторые эмпирические коэффициенты (объемная поверхность частиц, коэффициент извилистости, диаметр газовых пор) не представляется возможным определить аналитически; модель не учитывает трение фаз о стенки канала.

Данные несовершенства модели приводят к необходимости постановки и проведения эксперимента. Результаты экспериментальных работ позволят определить вышеупомянутые коэффициенты.

Требования, предъявляемые к экспериментальной установке ГТ, сформированы с учетом ее предназначения, безопасности проводимых на ней исследований, простоты конструкции и дальнейшей возможности расширения объема исследований.

1. *Предназначение экспериментальной установки.* Установка должна обеспечивать возможно более полную имитацию подачи ГТ и порошкообразных топлив в КС реактивных двигателей для качественного изучения процессов подачи и количественного определения оптимальных геометрических и газодинамических параметров разработанного УРР.

2. *Безопасность проводимых работ.* Установка и ее элементы запорно-регулирующей арматуры (ЗРА) должны обеспечивать герметичность, иметь системы дренажа давления и возможность легкой и безопасной замены вышедших из строя деталей. Также она должна быть снабжена аппаратным комплексом для контроля состояния элементов на протяжении всех исследований.

3. *Простота конструкции и модернизация.* Конструктивные элементы установки должны быть выполнены так, чтобы при необходимости их можно было демонтировать, отремонтировать, заменить или модернизировать без изменения конструкции экспериментальной установки или ЗРА.

4. *Аппаратно-программный комплекс (АПК).* Установка должна быть оснащена АПК, позволяющим контролировать и управлять состоянием установки, измерять, регистрировать, передавать, обрабатывать, визуализировать и хранить измеренные и рассчитанные параметры экспериментов для оперативного и подробного проведения анализа полученных результатов исследований.

Конструктивно-компоновочная схема экспериментальной установки исследования устройства регулирования расхода

На рис. 2 представлены основные элементы экспериментальной установки и предлагаемого УРР.

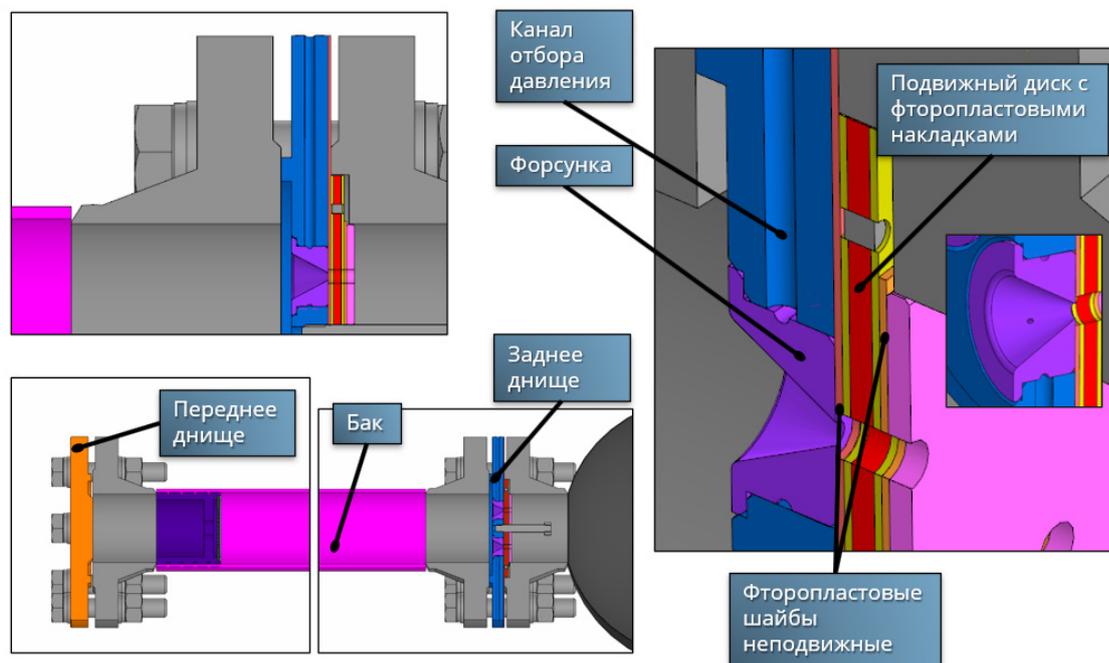


Рис. 2. Топливный бак системы подачи с узлом регулирования расхода

Для удовлетворения поставленных требований по безопасности, простоте и модернизации конструкции были применены следующие конструктивные решения.

1. Бак с порошковым топливом является сварной конструкцией, состоящей из цельной обечайки, двух фланцев и газопроницаемого поршня. К фланцам с помощью болтовых соединений крепятся переднее и заднее днища. Герметичность соединения обеспечивается уплотнительными прокладками. Через отверстия в переднем днище осуществляются подача инертного газа и подсоединение датчиков измерения давления перед поршнем и перемещения поршня. В заднем днище располагаются четыре форсунки, через которые истекает порошково-газовая среда. Также на нем крепится УРР. Форсунки представляют собой втулки, запрессованные в ответные отверстия на заднем днище, при необходимости это позволит с легкостью изменить их геометрию. Количество форсунок и их расположение по окружности в дальнейшем позволят проводить исследования по столкновению и распылу подаваемого топлива.

2. Газопроницаемый поршень представляет собой цилиндр, в котором располагается перепускной клапан. Клапан создает необходимый перепад давления для того, чтобы поршень осуществлял поджатие порошкового топлива, двигался в сторону форсунок и подавал псевдооживленные инертным газом частицы в форсунки и УРР. В поршень устанавливается решетка, через которую проходит газ. Чтобы порошок не попадал в область за поршень, в нем предусмотрен набор сеток, а снаружи – уплотняющие кольца.

3. Устройство регулирования расхода является поворотным диском с четырьмя отверстиями, который крепится к заднему днищу с помощью шпильки и располагается в ответном фланце приемной емкости. Для снижения трения на все соприкасающиеся поверхности накладываются диски из фторопласта, а для обеспечения герметичности УРР организовано его поджатие благодаря прижимному диску, гайке и сжатой пружине на шпильке крепления к днищу.

4. Поворотный диск приводится во вращение с помощью электродвигателя с редуктором, расположенным в приемной емкости и присоединенным между фланцами приемной емкости кронштейном. Поворотный диск через вал соединен с редуктором. Расположение управляющих поворотом устройств внутри установки позволяет обеспечить герметичность соединений: при расположении привода вне конструкции неизбежно приводит к негерметичности и утечкам газа в области элемента, передающего вращающий момент поворотному диску.

5. В поворотном диске расположены подпружиненные металлические шарики, западающие в выходные отверстия форсунок при «стояночном» режиме установки (состояние установки перед началом пуска), а также резиновые уплотнения между форсункой и поворотным диском. Данное конструктивное решение позволяет избежать утечек газа через форсунку, которые, хотя и не влияют на ход эксперимента непосредственно, приводят к перерасходу газа и быстрому опустошению баллона.

6. На внешней поверхности вращения форсунки УРР выточена канавка-коллектор, к которому примыкает сквозное отверстие, ведущее к внутреннему каналу форсунки. Канавка-коллектор и сквозное отверстие выполнены ближе к выходному отверстию форсунки. Данное конструктивное решение позволяет измерять давление газа перед выходным сечением форсунки.

Пневматическая схема установки

Пневматическая схема разрабатываемой экспериментальной установки исследования критического истечения порошковых материалов с УРР типа «поворотный диск» представлена на рис. 3. Установка состоит из баллона с инертным газом (азотом) высокого давления (15–20 МПа), коллектора (6 МПа), топливного бака с поршнем, порошком и УРР, приемной емкости, ЗРА и АПК, в который входят системы измерения, управления и обработки результатов.

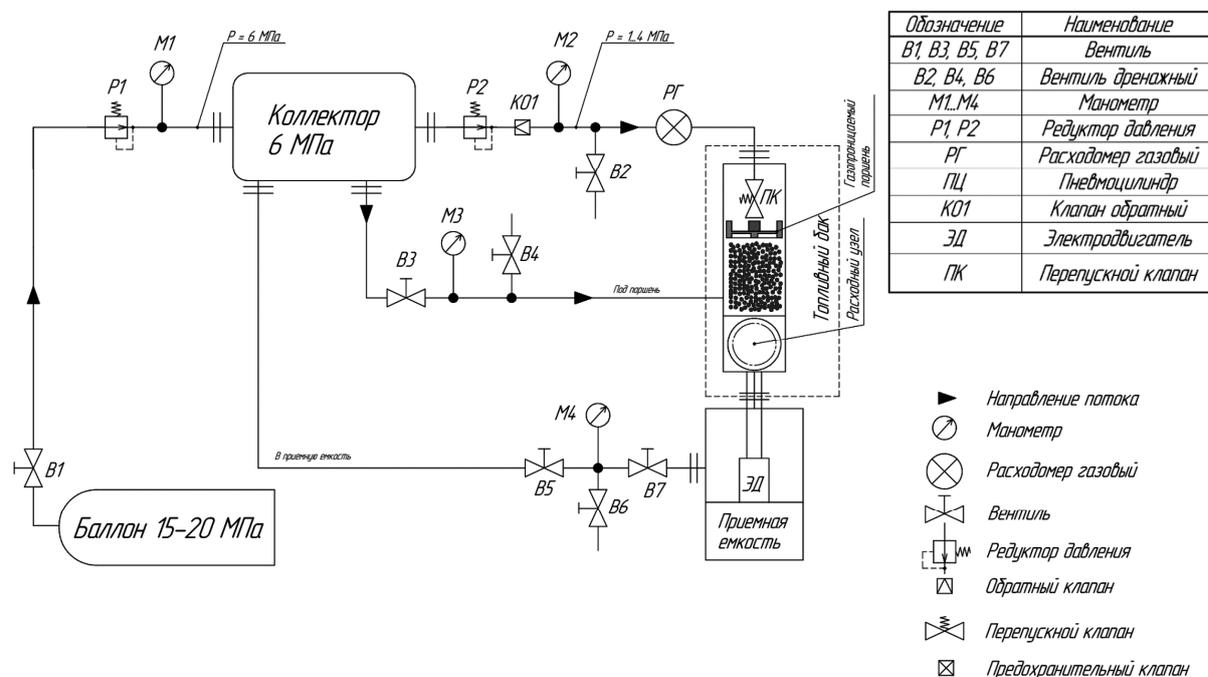


Рис. 3. Пневматическая схема установки

Применяемая в установке ЗРА состоит из вентиля, клапанов, редукторов давления, электродвигателя с валом и рукавов высокого давления. Для работы экспериментальной установки необходимы четыре магистрали:

- 1) первая обеспечивает подачу инертного газа из баллона в коллектор и включает в себя вентиль V1, редуктор давления P1 и манометр M1 перед коллектором;
- 2) вторая линия является основной, необходима для подачи газа в топливный бак и состоит из редуктора давления P2, клапана обратного KO1, манометра M2, дренажного вентиля B2 и расходомера газового PG;
- 3) третья магистраль позволяет вернуть поршень в исходное состояние после эксперимента и имеет вентиль B3, манометр M3 и дренажный вентиль B4;
- 4) четвертая линия подает газ в приемную емкость для имитации давления КС двигательной установки и состоит из вентиля B5, манометра M4 и дренажного вентиля B6.

Принцип действия установки следующий (рис. 3): из баллона с инертным газом высокого давления через вентиль (В1) и редуктор давления (Р1), настроенный на 6 МПа, рабочее тело подается в коллектор; из коллектора по основной магистрали газ поступает через редуктор давления (Р2), обратный клапан (КО1) и расходомер газовый (РГ) в топливный бак, создается давление перед газопроницаемым поршнем до 4 МПа; на перепускном клапане (ПК) газопроницаемого поршня обеспечивается необходимый перепад давления для того, чтобы поршень осуществлял поджатия порошкового топлива, двигался в сторону форсунок и подавал псевдооживленные инертным газом гранулы в форсунки и расходный узел (УРР); после открытия с помощью электродвигателя (ЭД) УРР порошково-газовая смесь истекает в приемную емкость с атмосферным или заранее созданным через четвертую магистраль давлением; через третью магистраль в конце эксперимента подается давление за газопроницаемый поршень для его возврата в исходное состояние, затем поршень извлекается и засыпается новая порция порошка; подвод газа в полости за поршнем и приемной емкости также осуществляется из коллектора с давлением 6 МПа.

Схема расположения датчиков контроля и управления

На рис. 3 приведено расположение манометров, необходимых для контроля состояния экспериментальной установки перед и после проводимых исследований, а также для задания начальных условий эксперимента. В табл. 1 представлен список параметров, контролируемых с помощью манометров.

Таблица 1

Параметры контроля состояния экспериментальной установки

| Обозначение | Наименование параметра | Диапазон, МПа | Средство измерения | Класс точности |
|-------------------------|---|---------------|--------------------|----------------|
| $P_{\text{кол}}$ | Давление в коллекторе | От 2 до 6 | Манометр (М1) | 0,15...0,4 |
| $P_{\text{маг.порш}}$ | Давление подвода газа в топливный бак | От 0,5 до 4 | Манометр (М2) | |
| $P_{\text{маг.подпор}}$ | Давление подвода газа в топливный бак под поршень | От 0,1 до 0,6 | Манометр (М3) | |
| $P_{\text{маг.пр}}$ | Давление подвода газа в приемную емкость | От 0,1 до 2 | Манометр (М4) | |

Для управления ходом эксперимента используются датчики давления, расходомер газовый и датчик измерения перемещения поршня, аналоговый сигнал которых приходит на контроллер и переводится в значения физических величин, а с контроллера передается на автоматизированное рабочее место (ноутбук). Обработка результатов осуществляется благодаря специализированному программному обеспечению. В табл. 2 представлены измеряемые параметры для оценки результатов экспериментов, на рис. 4 изображена схема размещения датчиков.

Таблица 2

Параметры оценки результатов эксперимента

| Обозначение | Наименование параметра | Диапазон, МПа | Средство измерения | Погрешность, %, не более |
|-----------------------|---|----------------|---------------------------|--------------------------|
| $P_{\text{вх.б.ГТ}}$ | Давление на входе в бак перед поршнем, МПа | От 0,5 до 4 | Датчик (ДД-1) | 0,2 |
| $P_{\text{вых.б.ГТ}}$ | Давление в баке после поршня, МПа | От 0,3 до 4 | Датчик (ДД-2) | 0,2 |
| $P_{\text{рег.р1}}$ | Давление в форсунке УРР порошка, МПа | От 0,2 до 4 | Датчик (ДД-3) | 0,2 |
| $P_{\text{рег.р2}}$ | | | Датчик (ДД-4) | 0,2 |
| $P_{\text{б.пр}}$ | Давление в приемном баке, МПа | От 0,1 до 2 | Датчик (ДД-5) | 0,2 |
| G_g | Расход инертного газа, г/с | От 1 до 25 | Расходомер газовый | 0,5 |
| $x_{\text{порш}}$ | Координата поршня относительно переднего днища бака | От 0 до 500 мм | Датчик перемещения (ДП-1) | 3 |

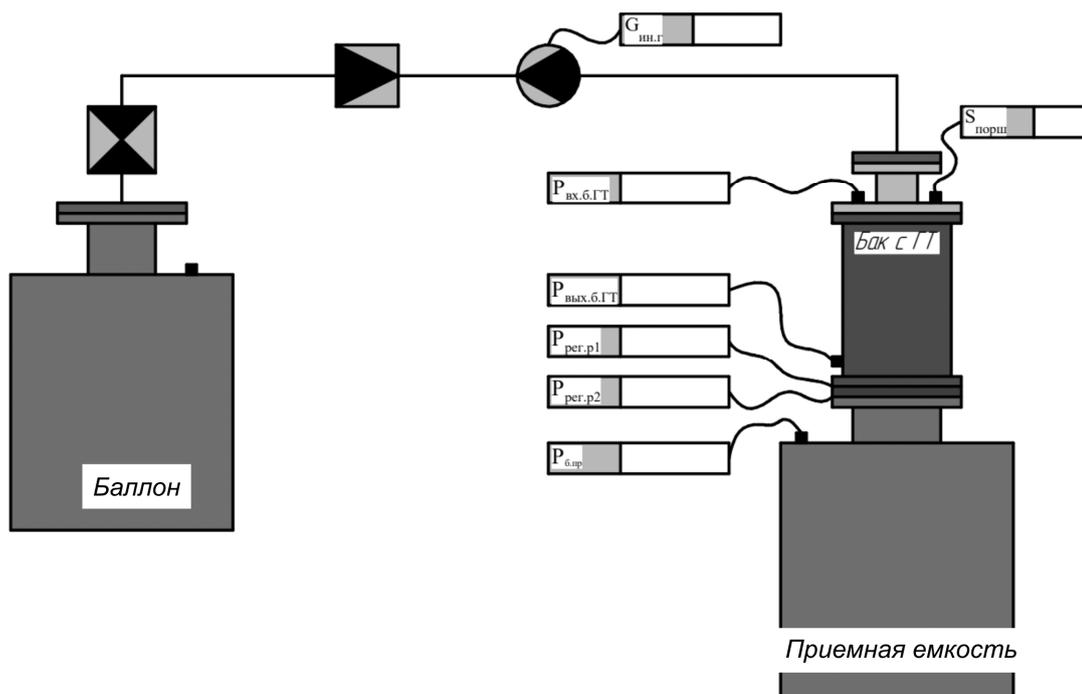


Рис. 4. Схема размещения датчиков

Измерения параметров проводятся с шагом по времени 0,1 с (частота 10 Гц). При этом результаты каждого измерения регистрируются в системе измерения и управления (СИУ) и формируются в виде таблицы.

Расчетные параметры определяются на каждом шаге измерений, исходя из зарегистрированных значений измеренных параметров.

Статточка – массив измеряемых и расчетных параметров, каждый из которых получен путем осреднения в определенном интервале времени. Интервал времени для снятия статочки необходимо выбирать самостоятельно. Критерии выбора – стабилизация параметров (оценивается визуально, исходя из временных зависимостей параметров). Значения параметров статочки считаются результатом одиночного эксперимента.

Программа проведения испытаний

Разрабатываемая установка критического истечения порошковых материалов позволит проводить эксперименты по определению дроссельных характеристик (ДХ) удельных расходов газа и порошка в зависимости от геометрических характеристик форсунок УРР, а также зависимости критического отношения давлений на входе и выходе из форсунки от давления на входе. Задача состоит в том, чтобы построить данные экспериментальные зависимости, сравнить их с математической моделью критического истечения и имеющимися зависимостями для порошка алюминия АСД-1ПСК, которые были получены на установке-прототипе [10].

При проведении эксперимента используется набор форсунок УРР с различными площадями критического отверстия и углами конусности.

Критическое отношение давлений на входе и выходе из форсунки УРР определяется следующим образом:

1) при заданном давлении перед отверстием форсунки (P_0) путем изменения давления в приемной емкости (P_2) определяется зависимость удельных расходов газа и порошка от отношения давлений;

2) при некотором отношении давлений появляется обратная зависимость. Значение, при котором происходит изменение удельных расходов, будет являться критическим отношением давлений;

3) для более точного определения критического отношения давлений необходимо провести несколько экспериментов в окрестности найденного по п. 2 значения с меньшим шагом изменения P_2 ;

4) вышеописанная процедура производится для нескольких значений P_0 , после чего строится семейство ДХ расходов от отношения давлений на входе и выходе из форсунки УРР, у каждой характеристики будет свое критическое значение (рис. 5, $\pi = P_2 / P_0$). Затем строится зависимость критического отношения давлений от давления на входе в форсунку;

5) зависимость критического отношения давлений от давления перед форсункой строится для всех форсунок, изготовленных для экспериментальной установки.

Качественный вид характеристики представлен на рис. 6.

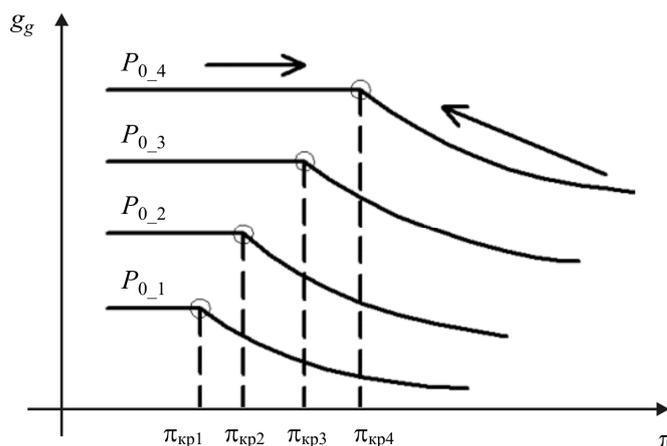


Рис. 5. Зависимость удельного расхода от отношения давлений

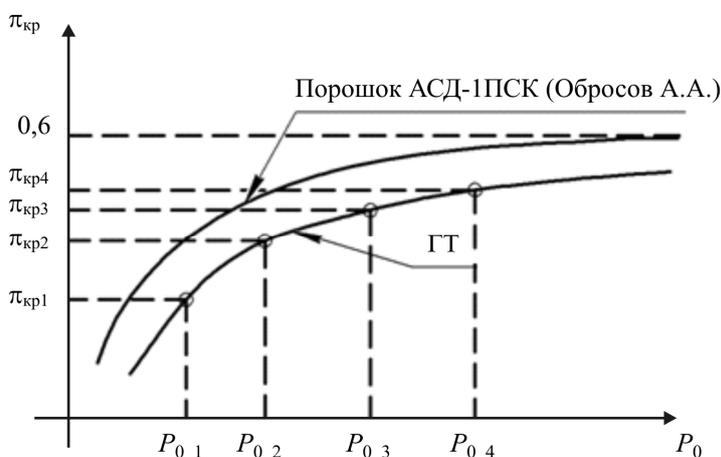


Рис. 6. Зависимость критического отношения давлений на входе и выходе из форсунки УРР от давления на входе

Построение ДХ удельных расходов инертного газа и порошка в зависимости от площади критического отверстия ($g_g(F_{отв})$, $g_p(F_{отв})$) и в зависимости от угла конусности ($g_g(\alpha_{отв})$, $g_p(\alpha_{отв})$) производится следующим образом:

1) проводится 5...10 экспериментов с каждой из форсунок УРР, статочки этих экспериментов осредняются;

2) при помощи метода наименьших квадратов (или других аппроксимационных методов) строится ДХ: по оси абсцисс откладывается площадь критического сечения $F_{отв}$ или угол конусности $\alpha_{отв}$, по оси ординат – удельный расход инертного газа g_g , удельный расход по-

рошка g_p . Степень полинома выбирается исходя из характера расположения экспериментальных статточек;

3) определяется «полка» – участок ДХ, на котором не происходит изменение удельного расхода при изменении площади критического отверстия и угла конусности форсунки;

4) выбирается оптимальный диаметр $d_{отв}$ и угол конусности $\alpha_{отв}$, при отклонении от которых удельные расходы не меняются;

5) в случае если ДХ не вышла на «полку», проводятся эксперименты с дополнительными разглушенными отверстиями в УРР, скорректировать ДХ.

Эксперименты по определению ДХ расходов в зависимости от геометрии форсунки УРР проводятся при постоянных величинах $P_{рег.п} = 2$ МПа и $P_{г.пр} = 0,1$ МПа. Качественный вид характеристик представлен на рис. 7.

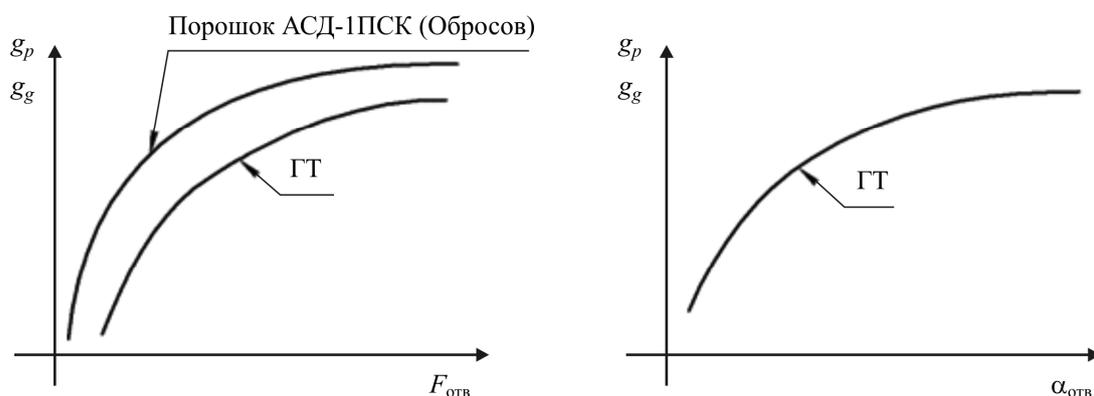


Рис. 7. Качественный вид ДХ расходов

Построение ДХ удельных расходов инертного газа и порошка в зависимости от давления перед входом в форсунку ($g_g(P_0)$, $g_p(P_0)$) производится следующим образом:

1) проводится 5...10 экспериментов с различными давлениями перед входом в форсунку P_0 , статточки этих экспериментов осредняются;

2) при помощи метода наименьших квадратов (или других аппроксимационных методов) строится ДХ: по оси абсцисс откладывается давление перед входом в форсунку P_0 , по оси ординат – удельный расход инертного газа g_g , удельный расход порошка g_p . Степень полинома выбирается исходя из характера расположения экспериментальных статточек.

Эксперименты по определению ДХ расходов в зависимости от давления перед входом в форсунку проводятся при неизменной площади критического сечения форсунки $F_{отв}$. Предполагается, что качественный вид полученных зависимостей будет совпадать с результатами экспериментов по подаче порошка АСД-1ПСК в КС реактивного двигателя [8, 10]: степенная функция с показателями 0,5 и 1,5 для порошка и газа соответственно. Однако количественные результаты могут отличаться, так как ГТ имеет отличные от АСД физико-механические свойства – дисперсность и геометрическую форму частиц.

Заключение

1. Рассмотрены теоретические основы критического истечения высококонцентрированных порошково-газовых смесей.

2. Сформированы требования к экспериментальной установке исследования процессов в системе подачи порошкового материала и определения дроссельных характеристик расходов и зависимости критического отношения давлений на входе и выходе из форсунки УРР от давления на входе.

3. Разработана конструктивно-компоновочная схема экспериментальной установки и устройства регулирования расхода критического истечения порошковых материалов. Приняты специальные конструктивные решения исходя из требований к установке. Большая часть данных решений направлена на обеспечение герметичности соединений.

4. Разработана пневматическая схема подачи инертного газа (азота, аргона) в экспериментальную установку. Выбраны элементы ЗРА (вентили, клапана, редукторы давления, рукава высокого давления).

5. Осуществлено размещение манометров и датчиков давления для контроля и управления испытаниями на экспериментальной установке. Выбраны способы измерения перемещения поршня, расхода газа и порошка.

6. Разработана программа проведения испытаний на экспериментальной установке. Определены порядок и методика нахождения ДХ удельных расходов фаз и зависимости критического отношения давлений от геометрических характеристик форсунок и давления перед форсункой. Для сравнения результатов испытаний выбрано исследование-аналог – эксперименты по подаче порошка АСД-1ПСК.

Таким образом, разработанная установка позволит исследовать процессы подачи порошкового топлива в КС двигательных установок, определять дроссельные характеристики расходов газа и порошка, критический перепад давления на форсунке УРР и определять оптимальные параметры предлагаемого в данной работе УРР.

Библиографический список

1. Елькин, А.В. Ракетный двигатель на гранулированном твердом топливе / А.В. Елькин, В.И. Малинин // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2019. – Т. 2. – С. 65–68.
2. 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
3. Елькин, А.В. Ракетные двигатели для космических летательных аппаратов на псевдооживленных твердых топливах / А.В. Елькин // *Тепловые процессы в технике*. – 2021. – Т. 13, № 11. – С. 509–518. DOI 10.34759/tpt-2021-13-11-509-518
4. Доткин, Г.А. Ракетно-прямоточный двигатель на гранулированном твердом топливе / Г.А. Доткин, М.Д. Зорин // *XLIX Гагаринские чтения 2023: сб. тез. работ междунар. молодеж. науч. конф.* – М.: Перо, 2023. – С. 108–109.
5. Доткин, Г.А. Анализ возможности применения различных составов гранулированного твердого топлива в ракетно-прямоточных двигателях / Г.А. Доткин, М.Д. Зорин, В.И. Малинин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2023. – № 74. – С. 39–50. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.04
6. Малинин, В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих / В.И. Малинин. – Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2006. – 262 с.
7. Ягодников, Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах / Д.А. Ягодников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 446 с.
8. Земерев, Е.С. Критическое истечение сыпучих материалов в пневмотранспортной системе подачи порошков: дис. ... канд. техн. наук / Е.С. Земерев. – 2017. – 116 с.
9. Земерев, Е.С. Неравновесное изотермическое критическое истечение порошкогазовой среды из отверстия / Е.С. Земерев, В.И. Малинин // *Вестник Технологического университета*. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 57–61.
10. Обросов, А.А. Динамика газонасыщения порошка алюминия в системе подачи установки синтеза наноксида / А.А. Обросов, Е.С. Земерев, В.И. Малинин // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. – 2013. – № 3(59). – С. 25–28.
11. Малинин, В.И. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин // *Физика горения и взрыва*. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 41–51.
12. Обросов, А.А. Истечение порошка алюминия из струйной форсунки установки синтеза нанопорошка оксида алюминия / А.А. Обросов, А.М. Бербек, А.В. Шатров // *Молодые ученые – ускорению*

научно-технического прогресса в XXI веке: сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием, Ижевск, 23–25 апреля 2013 года / ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – Ижевск, 2013.

13. Ягодников, Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / Д.А. Ягодников. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.

14. Крюков, А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра- и нанодисперсных материалов: монография / А.Ю. Крюков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 236 с.

15. Модернизация экспериментальной установки получения нанодисперсных оксидов алюминия / А.В. Шатров, Е.С. Земеров, А.А. Обросов, В.И. Малинин // Наноинженерия. – 2014. – № 5. – С. 11–15.

16. Казанцев, М.Ю. Регулируемая подача порошка металла в камеру воспламенения / М.Ю. Казанцев, В.И. Петренко, В.И. Малинин // Аэрокосмическая техника и высокие технологии: сб. тез. докл. всерос. научн.-техн. конф. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – С. 125.

17. Островский, Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности / Г.М. Островский. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.

18. Елькин, А.В. Критическое истечение порошково-газовой смеси из системы подачи порошкообразного топлива [Электронный ресурс] / А.В. Елькин, В.И. Малинин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 6 (144). – URL: <https://research-journal.org/archive/6-144-2024-june/10.60797/IRJ.2024.144.159> (дата обращения 27.06.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.159

19. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 868 с.

References

1. Yel'kin A.V., Malinin V.I. Raketnyy dvigatel na granulirovannom tverdom toplive [Rocket engine on granular solid fuel]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokiye tekhnologii i inovatsii*. – 2019. – Vol. 2. – P. 65-68.

2. A.V. Yel'kin, E.S. Zemerev, V.I. Malinin and others. Raketnyy dvigatel na granulirovannom tverdom toplive [Rocket engine on granular solid fuel]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2021, no. 64, pp. 16-24.

3. Yelkin, A.V. Raketnyye dvigateli dlya kosmicheskikh letatel'nykh apparatov na psevdoozhizhennykh tverdykh toplivakh [Rocket engines for spacecraft on fluidized solid propellants, their design and thermodynamics]. *Teplovyye protsessy v tekhnike*, 2021, Vol. 13, no. 11, p. 509-518.

4. Dotkin G.A., Zorin M.D. Raketno-pryamotochnyy dvigatel' na granulirovannom tverdom toplive [Granular propellant scramjet]. Collection of abstracts of the international youth scientific conference XLIX “Gagarinskiye chteniya 2023”, Moscow: «Pero», 2023, pp. 108-109.

5. Dotkin G.A., Zorin M.D., Malinin V.I. Possibility analysis of granular solid propellants various compositions application to scramjets. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 74, pp. 39-50. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.04

6. Malinin V.I. Vnutrikamernyye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskih goryuchikh [Intra-chamber processes in installations on powdered metallic fuels]. *Yekaterinburg – Perm: Ural branch of RAS*, 2006.

7. Yagodnikov D.A. Gorennye poroshkoobraznykh metallov v gazodispersnykh sredakh [Combustion of powdered metals in gas dispersed media]. *Moscow: MSTU named after N.E. Bauman*, 2018, 446 p.

8. Zemerev, E. S. Kriticheskoe istechenie sipuchih materialov v pnevmotransportnoi sisteme podachi poroshkov: dissertatsiya [Bulk materials critical outflow in a pneumatic conveying powder supply system] /, 2017. – 116 p.

9. Zemerev, E. S. Neravnovesnoe izotermicheskoe kriticheskoe istechenie poroshkovogazovoi sredi iz otverstiya [Nonequilibrium isothermal critical powder-gas medium outflow from an orifice] / E.S. Zemerev, V.I. Malinin // *Vestnik Tehnologicheskogo Universiteta*. – 2017. –vol. 20, № 1. – pp. 57-61.

10. Obrosov A.A., Zemerev E.S., Malinin V.I. Dinamika gazonasishcheniya poroshka aluminiya v sisteme podachi ustanovki sinteza nanooksida [Aluminum powder gas saturation in the supply system of a nanooxide synthesis plant dynamics] // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2013. № 3 (59). pp. 25-28.

11. Malinin, V. I. Vosplamnenie i gorenne aerovzvesi aluminiya v reaktore visokotemperaturnogo sinteza poroshkoobraznogo oksida aluminiya [Aluminum air suspension ignition and combustion in powdered aluminum oxide high-temperature synthesis reactor] / V. I. Malinin, E. I. Kolomin, I. S. Antipin // *Fizika gorennya i vzriva*. – 2002. – vol. 38, № 5. – pp. 41-51.

12. Obrosov A.A., Berbek A.M., Shatrov A.V. Istechenie poroshka aluminiya iz struynoi forsunki ustanovki sinteza nanoporoshka oksida aluminiya [Outflow of aluminum powder from a jet nozzle of a plant for

the synthesis of aluminum oxide nanopowder]. Molodie uchyonie – uskoreniyu nauchno-tehnicheskogo progressa v XXI veke. Izhevsk, 23-25 April 2013 года / IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova».

13. Yagodnikov, D. A. Vosplamnenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov [Powdery materials ignition and combustion] / Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2009.

14. Adaptatsiya vnutrikamernih protsessov i elementov konstruktssii energoustanovok na poroshkovom goruchem k tehnologiyam polucheniya ultra- i nanodispersnykh materialov: monografiya [In-chamber processes and design elements of powder fuel powerplants adaptation to technologies for ultra- and nanodisperse materials producing: monograph] / A.Y. Krukov. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. – 236 p.

15. Shatrov A.V., Zemerev, E. S., Obrosov A.A., Malinin V.I. Modernizatsiya eksperimentalnoi ustanovki polucheniya nanodispersnykh oksidov aluminiya [Nanodispersed aluminum oxides production experimental plant modernization]// Nanoinzhenneriya. 2014. №5. pp. 11-15.

16. Kazantsev M.Y., Petrenko V.I., Malinin V.I. Reguliruemaya podacha poroshka metalla v kameru vosplamneniya [Metal powder adjustable supply to the ignition chamber] // Aerokosmicheskaya tekhnika i visokie tehnologii Perm State Technic University – Perm, 2002. – p. 125.

17. Ostrovskiy G.M.. Pnevmaticheskiiy transport sipuchih materialov v himicheskoi promishlennosti [Bulk materials pneumatic transport in the chemical industry]. Himiya, 1984. – 104 p.

18. Elkin, A. V. & Malinin, V.I. (2024). Critical discharge of powder-gas mixture from the nozzle of powdered fuel supply system. *International Research Journal*, 6(144). <https://research-journal.org/archive/6-144-2024-june/10.60797/IRJ.2024.144.159>

19. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika. M.: Nauka, 1976. 868 p.

Об авторах

Доткин Григорий Алексеевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: g.dotkin@gmail.com).

Зорин Максим Дмитриевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: macy-1998@mail.ru).

Малинин Владимир Игнатьевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: malininvi@mail.ru).

Елькин Андрей Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: elkinav237@gmail.com).

Храмцов Михаил Юрьевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: hramtsov@m.yandex.ru).

Губин Роман Дмитриевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: qwerty.gubin@gmail.com).

About the authors

Grigory A. Dotkin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate of Rocket and Space Engineering and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: g.dotkin@gmail.com).

Maksim D. Zorin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate of Rocket and Space Engineering and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: macy-1998@mail.ru).

Vladimir I. Malinin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rocket and Space Engineering and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: malininvi@mail.ru).

Andrey V. Elkin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate of Rocket and Space Engineering and Power Systems department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: elkinav237@gmail.com).

Mihail Yu. Hramtsov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate of Rocket and Space Engineering and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: hramtsov@yandex.ru).

Roman D. Gubin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate of Rocket and Space Engineering and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: qwerty.gubin@gmail.com).

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 28.05.2024

Одобрена: 31.05.2024

Принята к публикации: 18.06.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Разработка экспериментальной установки критического истечения порошково-газовых смесей / Г.А. Доткин, М.Д. Зорин, В.И. Малинин, А.В. Елькин, М.Ю. Храмов, Р.Д. Губин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2024. – № 77. – С. 61–73. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.06

Please cite this article in English as: Dotkin G.A., Zorin M.D., Malinin V.I., Elkin A.V., Hramtsov M.Yu., Gubin R.D. Development of the powder-gas mixtures critical exhaust experimental plant. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2024, no. 77, pp. 61-73. DOI: DOI: 10.15593/2224-9982/2024.77.06