

Труды МАИ. 2024. № 136  
Trudy MAI, 2024, no. 136

Научная статья  
УДК 629.7.036.54  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180671>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С АДДИТИВНЫМИ ПОРИСТЫМИ СТРУКТУРАМИ

Татьяна Александровна Башарина<sup>1</sup>, Анастасия Витальевна Левина<sup>2</sup>,  
Сергей Евгеньевич Глебов<sup>3</sup>✉, Дмитрий Павлович Шматов<sup>4</sup>,  
Игорь Геннадьевич Дроздов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ООО НПП «ИнтерПолярис»,

Нововоронеж, Россия

<sup>5</sup>Воронежский государственный технический университет,

Воронеж, Россия

<sup>1</sup>[ta@interpolyaris.ru](mailto:ta@interpolyaris.ru)

<sup>2</sup>[levinaav@interpolyaris.ru](mailto:levinaav@interpolyaris.ru)

<sup>3</sup>[glebovse@interpolyaris.ru](mailto:glebovse@interpolyaris.ru)✉

<sup>4</sup>[shmatov@inlerpolyaris.ru](mailto:shmatov@inlerpolyaris.ru)

<sup>5</sup>[rd-vgtu@mail.ru](mailto:rd-vgtu@mail.ru)

**Аннотация.** Для повышения ресурса и энергетических характеристик ракетных двигателей внедряются инновационные конструкторские решения и новые технологии производства, совокупность которых отражена в системе охлаждения ракетного двигателя с пористыми структурами, изготовленными аддитивным

способом. Проведены вычислительный эксперимент и исследовательские гидродинамические испытания охлаждающего тракта двигателя с аддитивными пористыми структурами. В ходе исследований методом полиномиальных аппроксимаций были определены критериальные зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления пористой структуры, изготовленной аддитивным способом. Доказана применимость законов теории фильтрации пористых тел в аддитивных пористых структурах с полной геометрической идентификацией путем постановки математической модели с учетом суперпозиции вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления. Установлено влияние степени анизотропии среды на достоверность вычислительного эксперимента при математической модели с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющей.

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, пористая структура, тракт охлаждения, гидравлические исследования, математическое моделирование, гидродинамические испытания, аддитивное производство

**Для цитирования:** Башарина Т.А., Левина А.В., Глебов С.Е., Шматов Д.П., Дроздов И.Г. Исследование процессов гидродинамики в системах охлаждения жидкостных ракетных двигателей с аддитивными пористыми структурами // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180671>

Original article

# INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN COOLING SYSTEMS OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES WITH ADDITIVE POROUS STRUCTURES

Tatyana A. Basharina<sup>1</sup>, Anastasia V. Levina<sup>2</sup>, Sergey E. Glebov<sup>3</sup>✉,

Dmitry P. Shmatov<sup>4</sup>, Igor G. Drozdov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>LLC SPE "InterPolaris",

Novovoronezh, Russia

<sup>5</sup>Voronezh State Technical University,

Voronezh, Russia

<sup>1</sup>[ta@interpolyaris.ru](mailto:ta@interpolyaris.ru)

<sup>2</sup>[levinaav@interpolyaris.ru](mailto:levinaav@interpolyaris.ru)

<sup>3</sup>[glebovse@interpolyaris.ru](mailto:glebovse@interpolyaris.ru)✉

<sup>4</sup>[shmatov@inlerpolyaris.ru](mailto:shmatov@inlerpolyaris.ru)

<sup>5</sup>[rd-vgtu@mail.ru](mailto:rd-vgtu@mail.ru)

**Abstract.** The development of rocket engine construction is characterized by an increase in the flight characteristics, service life, reliability and energy efficiency of liquid rocket engines (LPRE), which makes it urgent to improve and modernize the cooling systems of liquid rocket engines. In modern mechanical engineering there is no theoretical and experimental basis and proven analytical methods for calculating the characteristics of additive porous structures and the hydrodynamics of the working environment in the internal volume with full geometric identification of the in-pore space. To increase the service life and energy characteristics of rocket engines, innovative design solutions and new production technologies are being introduced, the combination of which is reflected in the cooling system of a rocket engine with porous structures manufactured by additive

manufacturing. A computational experiment and research hydrodynamic tests of the cooling tract of an engine with additive porous structures were carried out. In the course of research using the method of polynomial approximations, the criterion dependences of the viscous and inertial resistance coefficients of a porous structure manufactured by an additive method were determined. The applicability of the laws of the theory of filtration of porous bodies in additive porous structures with full geometric identification has been proven by setting up a mathematical model taking into account the superposition of viscous and inertial drag coefficients. The influence of the degree of anisotropy of the medium on the reliability of the computational experiment using a mathematical model taking into account the superposition of the viscous and inertial components has been established.

**Keywords:** liquid rocket engine, porous structure, cooling path, hydraulic research, mathematical modeling, hydrodynamic testing, additive manufacturing

**For citation:** Basharina T.A., Levina A.V., Glebov S.E., Shmatov D.P., Drosdov I.G. Investigation of hydrodynamic processes in cooling systems of liquid-propellant rocket engines with additive porous structures. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180671>

## **Введение**

В современной промышленности аддитивные технологии широко используются для изготовления различных изделий, открывая новые возможности для конструкторско-технологической мысли. Отечественная космонавтика стоит на заре внедрения оборудования, изготовленного по технологии 3D-печати [1-8].

Развитие ракетного двигателестроения характеризуется повышением летных характеристик, ресурса, надежности и энергоэффективности жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), что обуславливает актуальность усовершенствования и модернизации систем охлаждения ЖРД.

Использование пористых структур в охлаждающих трактах ЖРД является одним из перспективных и эффективных методов интенсификации теплообмена. Применение подобного способа охлаждения и конструкции охлаждающей полости наиболее применима при конструировании ЖРД малой тяги, поскольку снижение массогабаритных показателей без потери удельного импульса двигателя является одной из важнейших задач.

Цель исследований – разработка новых и усовершенствование существующих систем охлаждения жидкостных ракетных двигателей с пористыми структурами в тракте, изготовленными аддитивным способом. Пористые структуры в охлаждающем тракте обеспечивают увеличение жесткости и прочности конструкции, повышение технологичности изделия, в том числе сокращение времени производства камер сгорания, а также увеличение ресурса двигателя за счет интенсификации теплообмена в охлаждающем тракте.

### **Постановка задачи и проведение исследований**

Системы охлаждения ЖРД с пористой структурой отличаются от других систем охлаждения высокой скоростью фильтрации рабочей среды, обусловленной появлением вязкостных и инерционных составляющих динамики потока. В современном машиностроении отсутствуют теоретическая и экспериментальная базы

и апробированные аналитические методики расчета характеристик аддитивных пористых структур и гидродинамики рабочей среды во внутреннем объеме при полной геометрической идентификации внутрипорового пространства.

Для исследования гидродинамических процессов в аддитивной пористой структуре разработана модель экспериментального образца охлаждающего тракта ЖРД (далее – образец), показанная на рисунке 1а и геометрически имитирующая участок охлаждающего тракта в виде внутренней и внешней стенок камеры сгорания ЖРД.

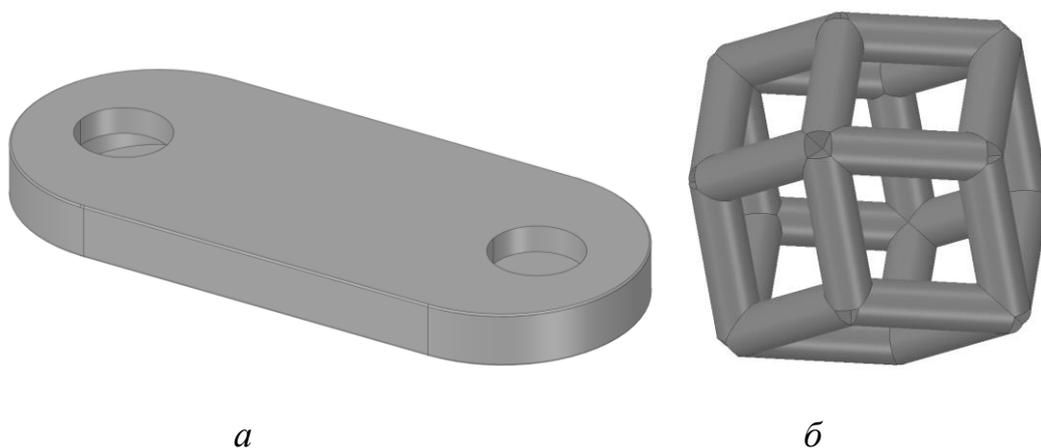


Рисунок 1 – Экспериментальный образец участка охлаждающего тракта ЖРД: общий вид (а) и с указанием элементарной ячейки пористой структуры (б)

Во внутреннем объеме образца расположена пористая структура, элементарная ячейка которой представляет собой ромбододекаэдрическую объемную фигуру и показана на рисунке 1б. Геометрические размеры пористой структуры в образце: длина  $l = 20$  мм , ширина  $b = 20$  мм , толщина  $h = 3$  мм .

Исследование рабочих процессов в образце проводилось для пористой структуры с коэффициентом пористости  $\Pi$  в диапазоне 0,52-0,84, диаметр ребер  $d$  в исследованиях варьировался от 1,8 мм до 0,9 мм соответственно, при этом изменялся только указанный диаметр, форма каркаса ребер оставалась неизменной. На рисунке 2 представлены 3D-модели образцов в разрезе с различным коэффициентом пористости.

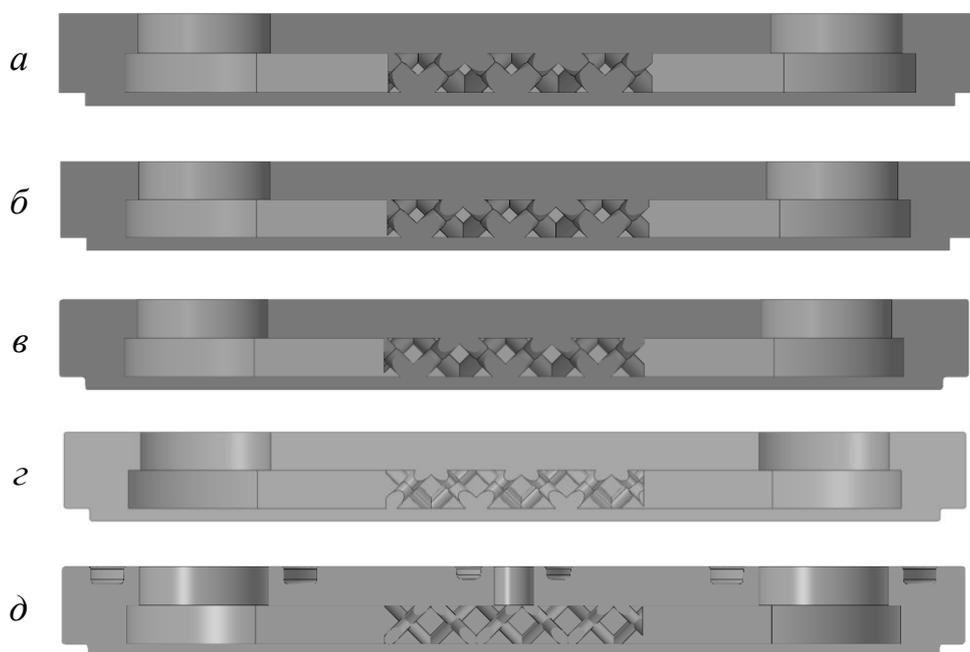


Рисунок 2 – 3D-модели экспериментальных образцов охлаждающего тракта ЖРД в разрезе: а)  $\Pi = 0,52$ ,  $d = 1,8$  мм; б)  $\Pi = 0,6$ ,  $d = 1,6$  мм; в)  $\Pi = 0,67$ ,  $d = 1,4$  мм; г)  $\Pi = 0,74$ ;  $d = 1,2$  мм; д)  $\Pi = 0,84$ ;  $d = 0,9$  мм

Исследование гидродинамических характеристик пористой структуры в исследованиях проводилось в двух постановках математической модели – с учетом полной геометрической идентификации внутрипорового пространства и с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих.

Аддитивные технологии обеспечивают полную геометрическую идентификацию пористой структуры и внутрипорового пространства с высокой степенью точности, что позволяет в исследованиях применять классическую систему уравнений гидродинамики – уравнение Навье-Стокса, выраженное законом сохранения импульса и уравнением неразрывности несжимаемой среды.

Уравнение неразрывности (закон сохранения массы) для несжимаемой жидкости в общем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $\rho$  – плотность рабочей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $U$  – скорость движения рабочей среды, м/с.

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M, \quad (2)$$

где  $p$  – статическое давление рабочей среды, Па;  $\tau$  – тензор внутренних сдвиговых напряжений;  $S_M$  – слагаемое, определяющее влияние массовых и импульсных сил на процесс движения рабочего тела.

Основными параметрами пористой структуры являются вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления –  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно, значения которых комплексно учитывают потери давления потока в порах на трение и на преодоление сил инерции. Для определения коэффициентов сопротивления было

исследовано более 230 расчетных точек расходной характеристики образцов с различными коэффициентами пористости методом вычислительного эксперимента в программном комплексе Ansys CFX. В качестве граничных условий выступают давление рабочей среды на входе, массовый расход на выходе из образца, рабочая среда – несжимаемая жидкость. Граничные условия вычислительного эксперимента образца на рисунке 3: давление на входе – 42275 Па, массовый расход – 280 л/ч, коэффициент пористости – 0,74.

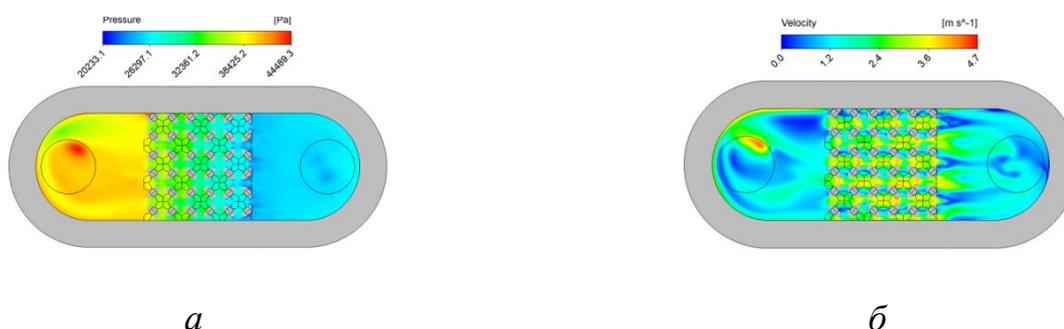


Рисунок 3 – Распределение полей давления и скорости рабочей среды:

*a* – поле давления; *б* – поле скорости

Графики зависимостей перепада давления на пористой структуре  $\Delta p$  от скорости фильтрации  $W_\phi$  представлены на рисунке 4.

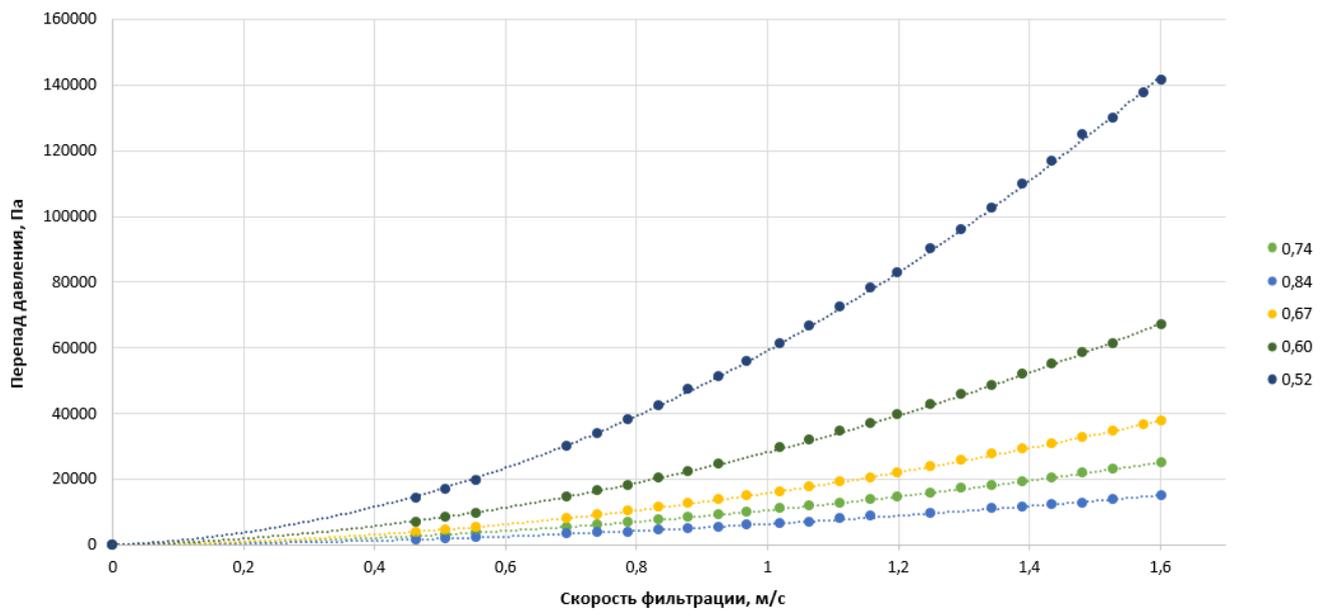


Рисунок 4 – График зависимости перепада давления от скорости фильтрации

Течение теплоносителя в пористых структурах описывается модифицированным уравнением Дарси (уравнение Рейнольдса-Форшгеймера) [9, 10]:

$$-\frac{dp}{dZ} = \alpha\mu W_{\phi} + \beta\rho W_{\phi}^2, \quad (3)$$

где  $p$  – давление;  $Z$  – координата;  $\alpha$  – вязкостный коэффициент сопротивления;  $\beta$  – инерционный коэффициент сопротивления;  $W$  – скорость фильтрации рабочей среды.

По уравнение Дарси методом полиномиальной аппроксимации со степенью 2 были определены значения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления – значения показаны в таблице 1.

**Таблица 1**

Значения коэффициентов сопротивления аддитивной пористой структуры

Коэффициент пористости	Диаметр граней, мм	Вязкостный коэффициент сопротивления $\alpha$ , $1/\text{м}^2$	Инерционный коэффициент сопротивления $\beta$ , $1/\text{м}$
0,52	1,8	478936842,1	2509,62
0,60	1,6	271736842,1	1157,52
0,67	1,4	136778947,4	660,67
0,74	1,2	105226315,8	429,47
0,84	0,9	66894736,84	256,73

Для оценки влияния характеристик пористой структуры на перепад давления в образцах варьировались коэффициенты пористости  $\Pi$  от 0,52 до 0,84 путем изменения диаметров граней от 0,9 мм до 1,8 мм. Таким образом, коэффициенты сопротивления являются функцией от коэффициента пористости. На рисунке 5 представлена графическая зависимость коэффициентов сопротивления от коэффициента пористости.

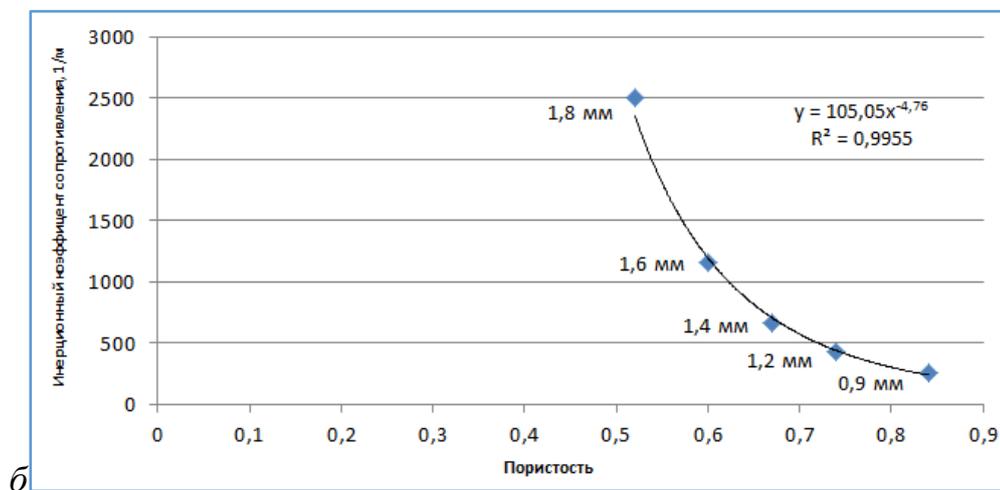
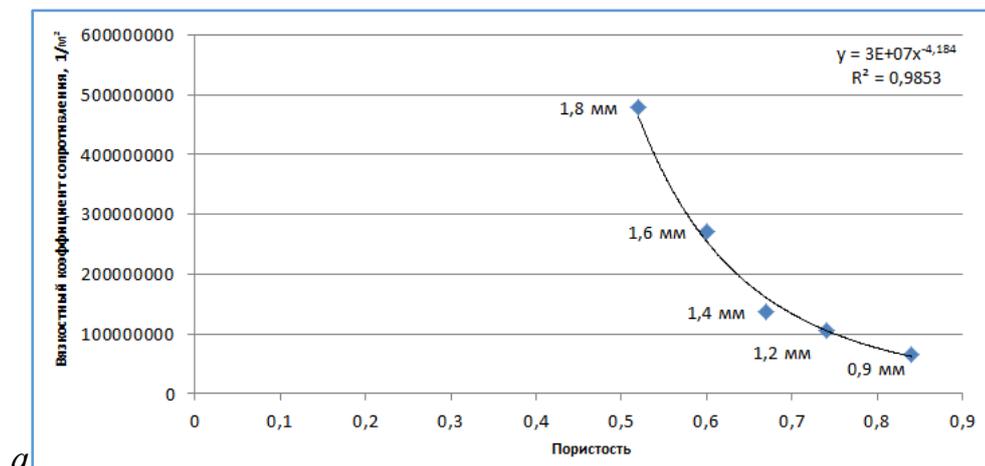


Рисунок 5 – Графики зависимости коэффициентов сопротивления от коэффициента пористости: *a* – вязкостный коэффициент сопротивления; *б* – инерционный коэффициент сопротивления

В результате аппроксимаций по уравнению Дарси получены следующие критериальные уравнения коэффициентов сопротивления пористой структуры с величиной достоверности аппроксимации 0,9853 и 0,9955:

$$\alpha = 3 \cdot 10^7 \cdot P^{-4,184}, \quad (4)$$

$$\beta = 105,05 \cdot P^{-4,76} \quad (5)$$

Вязкостные и инерционные силы сопротивления, возникающие в рабочей среде, протекающей через пористую структуру, являются тензорными величинами, имеющими различные численные значения в любом базисе трехмерного пространства.

Для определения режима течения в образцах с различными коэффициентами пористости были определены числа Рейнольдса по уравнению:

$$\text{Re} = \frac{G \cdot \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)}{\mu}, \quad (6)$$

где  $G$  – удельный массовый расход;  $\mu$  – динамическая вязкость рабочей среды.

Графическая зависимость коэффициентов сопротивления от числа Рейнольдса отражена на рисунке 6.

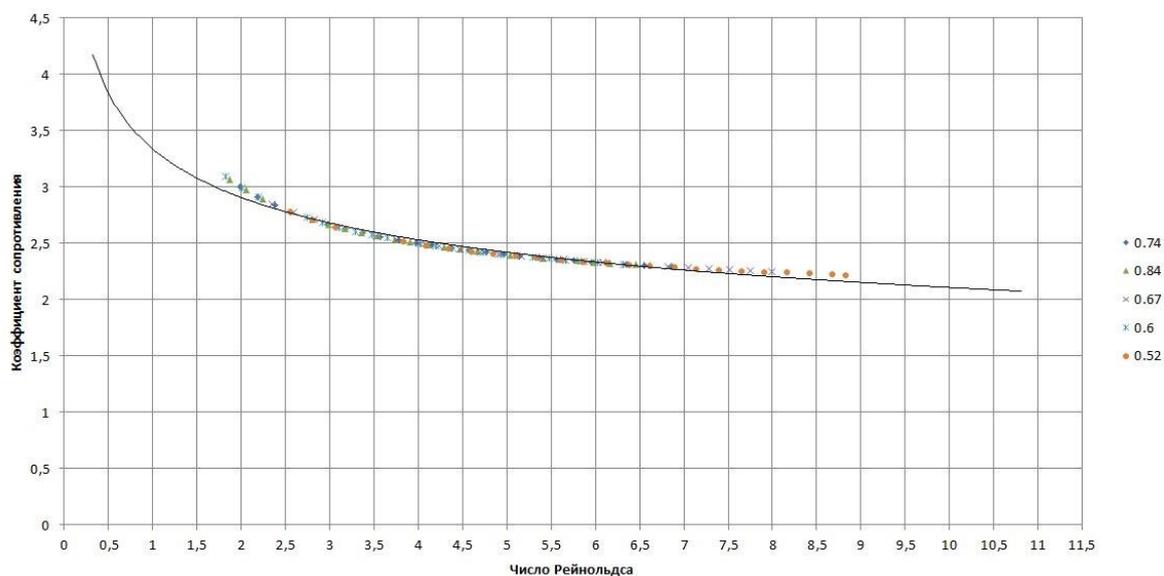


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

В исследуемом диапазоне расходов рабочей среды отмечается переходный режим течения, что доказывает корректность применения уравнения Рейнольдса-Форшхеймера [9].

Для подтверждения достоверности полученных критериальных уравнений проводились гидродинамические испытания образца с коэффициентом пористости 0,74 и диаметром ребер 1,2 мм. На рисунке 7 представлен образец, установленный на испытательном стенде. В ходе испытаний были получены массовые расходы рабочей среды (воды) в диапазоне от 0,028 кг/с до 0,096 кг/с при диапазоне перепада давления от 2,32 кПа до 23,94 кПа.



Рисунок 7 – Проведение гидродинамических испытаний образца

Валидация результатов гидродинамических испытаний и вычислительного эксперимента проводилась в пределах допустимой погрешности по значениям давлений рабочей среды на входе и выходе  $\pm 2000$  Па в соответствии с точностью измерительного оборудования.

На рисунке 8 представлен график зависимости перепада давления от массового расхода рабочей среды по результатам вычислительного эксперимента и гидродинамических испытаний.

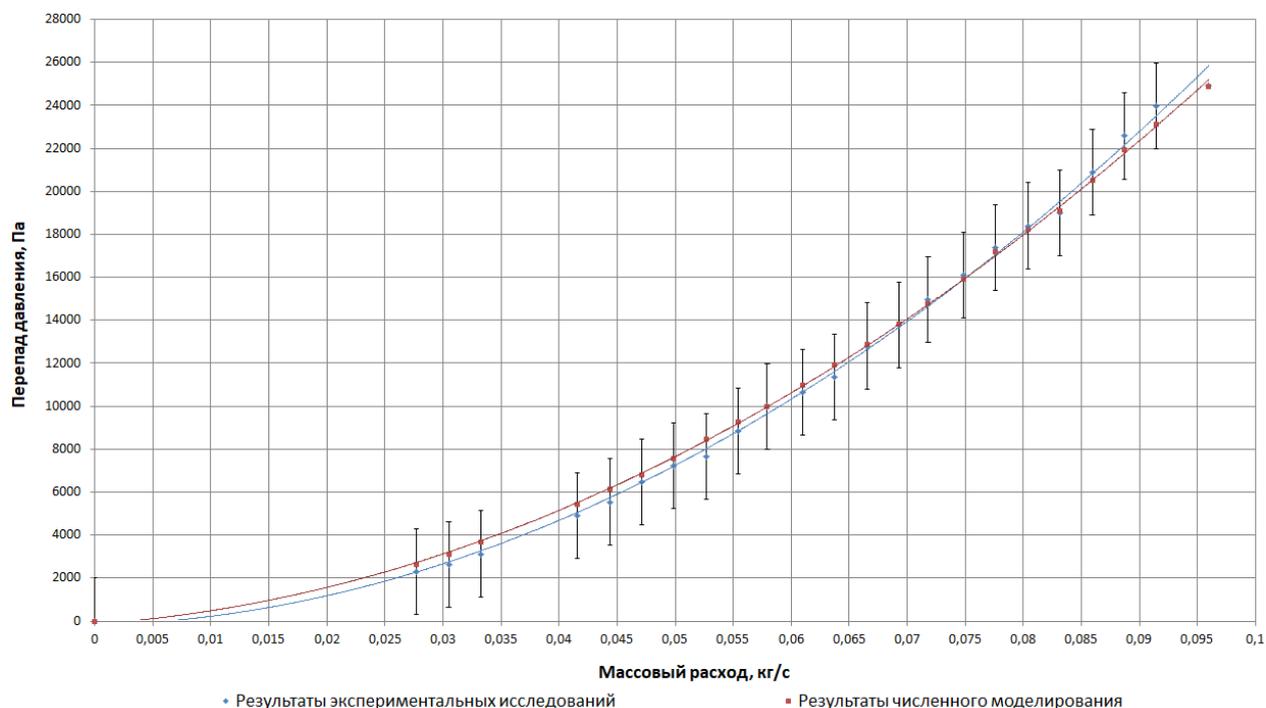


Рисунок 8 – Зависимость перепада давления от массового расхода рабочей среды

Таким образом, полученные результаты вычислительного эксперимента имеют высокую степень достоверности, так как значения перепада давления находятся в пределах абсолютной погрешности.

Критериальные уравнения для определения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления для аналитических методов исследования свойств пористой структуры вводят допущение об изотропности среды. В действительности же, коэффициенты сопротивления пористой структуры будут отличаться по трем взаимно-перпендикулярным направлениям, что связано с различными проекциями

пористой структуры на соответствующие указанным направлениям взаимно-перпендикулярные плоскости. При увеличении массового расхода через элементарный объем пористой структуры возрастает влияние степени анизотропии на достоверность результатов. Согласно (3), в оба члена выражения для определения потерь давления входит величина скорости фильтрации, пропорциональная массовому расходу через элементарный объем пористой структуры. Поскольку скорость фильтрации при анизотропии будет отличаться по трем взаимно-перпендикулярным направлениям, как следствие, согласно графикам на рисунке 4, будут отличаться и аппроксимирующие уравнения для пористой структуры каждого значения пористости, а значит будет повышаться погрешность аналитического метода исследования пористой структуры по критериальным уравнениям коэффициентов сопротивления относительно экспериментальных данных.

С целью установления степени влияния допущения изотропности среды в критериальных уравнениях были проведены исследования процессов гидродинамики в пористых структурах с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих, что подразумевает указание значений вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления в явном виде по каждому из трех направлений декартовой системы координат. В связи с постановкой, включающей допущение об изотропности среды, значения коэффициентов сопротивления по каждому из трех направлений принимались равными между собой.

Математическая модель с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих представляет собой систему уравнений Навье-Стокса (1) и (2), но с введением дополнительного слагаемого в закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M, \quad (7)$$

где  $S_M$  – слагаемое, определяющее влияние массовых и импульсных сил на процесс движения рабочего тела, представляется в виде:

$$\begin{cases} S_{M,x} = -\alpha_{perm}^x \cdot \mu \cdot U_x - \beta_{loss}^x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot |U| U_x, \\ S_{M,y} = -\alpha_{perm}^y \cdot \mu \cdot U_y - \beta_{loss}^y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot |U| U_y, \\ S_{M,z} = -\alpha_{perm}^z \cdot \mu \cdot U_z - \beta_{loss}^z \cdot \frac{\rho}{2} \cdot |U| U_z \end{cases} \quad (8)$$

В случае изотропной среды значения коэффициентов сопротивления в направлении осей системы координат равны:

$$\alpha_{perm}^x = \alpha_{perm}^y = \alpha_{perm}^z = \alpha_{perm}, \quad (9)$$

$$\beta_{loss}^x = \beta_{loss}^y = \beta_{loss}^z = \beta_{loss} \quad (10)$$

Результаты расчета процессов гидродинамики с учетом суперпозиции вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления представлены в таблице 2.

**Таблица 2**

Результаты вычислительного эксперимента с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих

Расход, л/ч	Гидродинамические испытания, перепад давления, Па	Вычислительный эксперимент, перепад давления, Па	Погрешность, %
110	3131,30	3184,5	1,67
270	15904,60	18286,9	13,03
346	24890,00	29983,1	16,99

Таким образом, установлена прямая зависимость увеличения степени анизотропии от массового расхода и снижение степени достоверности вычислительного эксперимента с поставкой математической модели с учетом суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих. При увеличении объемного расхода рабочей среды в 3 раза погрешность вычислений возрастает на 15 %.

### **Заключение**

Использование аддитивных технологий производства в создании перспективных ракетных двигателей с инновационными системами охлаждения на основе аддитивных пористых структур позволяет повысить точность и достоверность проектирования критически важных и теплонапряженных систем, имеющих высокие требования к разработке, за счет возможности исследования рабочих процессов с наивысшей подлинностью результатов путем создания геометрически сложных, но идентифицируемых конструкций. Геометрическая идентификация пористых

структур охлаждающего тракта ЖРД обеспечивает возможность применения в исследованиях математических моделей, полноценно учитывающих анизотропность среды, повышая степень достоверности вычислений и позволяя на начальных этапах проектирования заменить натурный эксперимент вычислительным, сокращая затраты и сроки проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

### **Список источников**

1. Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. К вопросу о применении пористых металлов в регенеративной системе охлаждения жидкостных ракетных двигателей // Известия вузов. Машиностроение. 2014. № 5. С. 10-19.
2. Пелевин Ф.В., Авраамов Н.И., Орлин С.А., Синцов А.Л. Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 4. С. 1-14.
3. Ягодников Д.А., Александренков В.П., Ковалев К.Е., Григорьянц А.Г., Дренин А.А. Исследование гидравлических характеристик тракта охлаждения модельного жидкостного ракетного двигателя, изготовленного с применением аддитивной технологии селективного лазерного плавления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2019. № 6. С. 41-52.
4. Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 6. С. 74-81.

5. Артемов А.Л., Дядченко В.Ю., Лукьяшко А.В. и др. Отработка конструктивных и технологических решений для изготовления опытных образцов внутренней оболочки камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с использованием аддитивных технологий // Космическая техника и технологии. 2017. № 1. С. 50-62.
6. Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов // Известия вузов. Машиностроение. 2016. № 2. С. 42-52.
7. Heat Transfer in Porous Media Applied to Liquid Rocket Engines. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312472090\\_Heat\\_Transfer\\_in\\_Porous\\_Media\\_Applied\\_to\\_Liquid\\_Rocket\\_Engines](https://www.researchgate.net/publication/312472090_Heat_Transfer_in_Porous_Media_Applied_to_Liquid_Rocket_Engines)
8. Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. К оценке теплогидравлических характеристик пористых структур // 5-ая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-5). – М.: Изд-во МЭИ, 2010. Т. 5. С. 172–175.
9. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. - 168 с.
10. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.
11. Ротэрмель А.Р., Яшков С.А., Шевченко В.И. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик летательного аппарата в сверхзвуковой аэродинамической трубе СТ-3 с использованием программно-аппаратного комплекса // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159783>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-06)

12. Ковалев П.И., Менде Н.П. Альбом сверхзвуковых течений. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. - 251 с.
13. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применения на летательных аппаратах. - М.: Машиностроение, 1967. - 265 с.
14. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. - Пермь: ПГТУ, 1998. - 108 с.
15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 712 с.
16. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолёта методом CFD // Труды МАИ. 2012. № 57.  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30875>
17. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Дрофа, 2003. - 846 с.
18. Аникеев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамика. - М.: МАИ, 2010. - 149 с.
19. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. - 715 с.
20. Бакланов А.В., Краснов С.Д., Гараев А.И. Исследование параметров факела за форсункой со струйной и закрученной подачей топлива // Труды МАИ. 2020. № 113.  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)

## References

1. Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2014, no. 5, pp. 10-19.
2. Pelevin F.V., Avraamov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, no. 4, pp. 1-14.

3. Yagodnikov D.A., Aleksandrenkov V.P., Kovalev K.E., Grigor'yants A.G., Drenin A.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Mashinostroenie*, 2019, no. 6, pp. 41-52.
4. Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2015, no. 6, pp. 74-81.
5. Artemov A.L., Dyadchenko V.Yu., Luk'yashko A.V. et al. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 50-62.
6. Pelevin F.V. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2016, no. 2, pp. 42-52.
7. Heat Transfer in Porous Media Applied to Liquid Rocket Engines. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312472090\\_Heat\\_Transfer\\_in\\_Porous\\_Media\\_Applied\\_to\\_Liquid\\_Rocket\\_Engines](https://www.researchgate.net/publication/312472090_Heat_Transfer_in_Porous_Media_Applied_to_Liquid_Rocket_Engines)
8. Zeigarnik Yu.A., Ivanov F.P. *5-aya Rossiiskaya natsional'naya konferentsiya po teloploobmenu*, Moscow, Izd-vo MEI, 2010, vol. 5, pp. 172–175.
9. Polyayev V.M., Maiorov V.A., Vasil'ev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruksii letatel'nykh apparatov* (Hydrodynamics and heat transfer in porous structural elements of aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 168 p.
10. Belov S.V. *Poristye metally v mashinostroenii* (Porous metals in mechanical engineering), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 247 p.
11. Rotermel' A.R., Yashkov S.A., Shevchenko V.I. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159783>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-06)
12. Kovalev P.I., Mende N.P. *Al'bom sverkhzvukovykh techenii* (Album of supersonic flows), Saint Petersburg, Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2011, 251 p.
13. Nekrasov B.B. *Gidravlika i ee primeneniya na letatel'nykh apparatakh* (Hydraulics and its applications on aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 265 p.

14. Frik P.G. *Turbulentnost': modeli i podkhody* (Turbulence: models and approaches), Perm', Perm State Technical University, 1998, 108 p.
15. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* (Boundary Layer Theory), Moscow, Nauka, 1974, 712 p.
16. Ignatkin Yu.M., Konstantinov S.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30875>
17. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of liquid and gas), Moscow, Drofa, 2003, 846 p.
18. Anikeev A.A., Molchanov A.M., Yanyshhev D.S. *Osnovy vychislitel'nogo teploobmena i gidrodinamika* (Fundamentals of computational heat transfer and fluid dynamics), Moscow, MAI, 2010, 149 p.
19. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh strui* (Theory of turbulent jets), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1960, 715 p.
20. Baklanov A.V., Krasnov S.D., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)

Статья поступила в редакцию 25.04.2024

Одобрена после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 25.04.2024; approved after reviewing on 17.06.2024; accepted for publication on 27.06.2024