

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья
УДК 629.7.036.54

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184059>

EDN: <https://www.elibrary.ru/BGICRJ>

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

**Татьяна Александровна Башарина¹✉, Анастасия Витальевна Левина²,
Иван Васильевич Акользин³, Дмитрий Николаевич Винокуров⁴,
Дмитрий Павлович Шматов⁵**

^{1,2,3,4,5}ООО НПП «ИнтерПолярис»,

Нововоронеж, Российская Федерация

¹ta@interpolyaris.ru✉

²levinaav@interpolyaris.ru

³akolziniv@interpolyaris.ru

⁴vinokurovdmnik@gmail.com

⁵shmatov@inlerpolyaris.ru

Аннотация. Для повышения стабильности и надежности работы ракетных двигателей внедряются новые технологии для интенсификации теплообменных процессов, сочетание которых представляет собой инновационную систему охлаждения жидкостного ракетного двигателя в виде охлаждающего тракта с высокоэффективными пористыми структурами, изготовленными аддитивным способом. Для исследования процессов теплообмена при движении однофазного теплоносителя в охлаждающем тракте с пористой структурой проведен

вычислительный эксперимент и теплогидравлические испытания. Математическая модель на основе полной геометрической идентификации внутриспорового пространства с высокой степенью достоверности определяет теплогидравлические характеристики теплоносителя, на основе чего определены критериальные уравнения чисел Нуссельта для пористых структур с разным коэффициентом пористости. Установлено влияние теплогидравлических и геометрических свойств аддитивной пористой среды на значение числа Нуссельта. Проведены предварительные вычислительные эксперименты, подтверждающие высокую степень достоверности отыскания коэффициентов в критериальных уравнениях для чисел Нуссельта и свидетельствующие о корректности математической модели исследования. Для подтверждения эффективности применения пористых структур в охлаждающем тракте были проведены огневые испытания опытного образца жидкостного ракетного двигателя малой тяги, изготовленного аддитивным способом. Показано, что применение аддитивной пористой структуры в системе охлаждения ЖРД малой тяги позволяет эффективно осуществлять процесс теплосъема с внутренней поверхности камеры сгорания.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, пористая структура, тракт охлаждения, теплогидравлические исследования, математическое моделирование, аддитивное производство, вычислительный эксперимент, огневые испытания ЖРД

Для цитирования: Башарина Т.А., Левина А.В., Акользин И.В., Винокуров Д.Н., Шматов Д.П. Исследование процессов теплообмена в системах охлаждения жидкостных ракетных двигателей с аддитивными пористыми структурами // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184059>

Original article

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN COOLING SYSTEMS OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES WITH ADDITIVE POROUS STRUCTURES

Tatyana A. Basharina¹✉, Anastasia V. Levina², Ivan V. Akolzin³,

Dmitry N. Vinokurov⁴, Dmitry. P. Shmatov⁵

^{1,2,3,4,5}LLC SPE "InterPolaris",

Novovoronezh, Russian Federation

¹ta@interpolyaris.ru✉

²levinaav@interpolyaris.ru

³akolziniv@interpolyaris.ru

⁴vinokurovdmnik@gmail.com

⁵shmatov@inlerpolyaris.ru

Abstract. To improve the stability and reliability of rocket engines, new technologies are being introduced to intensify heat exchange processes. The combination of the investigated technologies is an innovative cooling system for a liquid-propellant rocket engine in the form of a highly efficient porous structures made by an additive method within cooling path. To study the heat transfer processes during the movement of a single-phase coolant in a cooling path with a porous structure, a computational experiment and thermal-hydraulic tests were carried out. The mathematical model, based on the complete geometric identification of the innerporous space, determines with a high degree of accuracy the thermal-hydraulic characteristics of the coolant, on the basis of which the criterial equations of Nusselt numbers for porous structures with different porosity coefficients are determined. The influence of thermal-hydraulic and geometrical properties of an additive porous

medium on the value of the Nusselt number is established. Preliminary computational experiments were carried out, confirming a high degree of reliability of finding the coefficients in the criteria equations for Nusselt numbers and indicating the correctness of the mathematical model of the study. To confirm the effectiveness of the use of porous structures in the cooling path, fire tests of a prototype liquid-propellant low-thrust rocket engine manufactured by an additive method were carried out. It is shown that the use of an additive porous structure in the cooling system of a low-thrust liquid-propellant rocket engine allows for the efficient implementation of the heat removal process from the inner surface of the combustion chamber.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, porous structure, cooling path, thermal-hydraulic studies, mathematical modeling, additive manufacturing, computational experiment, firing tests of liquid-propellant rocket engines

For citation: Basharina T.A., Levina A.V., Akolzin I.V., Vinokurov D.N., Shmatov D.P. Investigation of heat transfer processes in cooling systems of liquid-propellant rocket engines with additive porous structures. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184059>

Введение

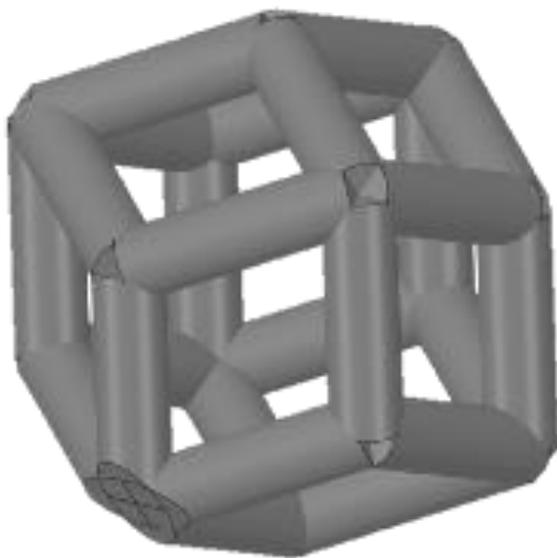
Развитие и совершенствование ракетно-космической техники приводит к необходимости использования новых технологических методов производства высоконапряженных и теплонагруженных изделий. В настоящее время перспективным методом изготовления становится аддитивное производство, которое позволяет сократить время изготовления и стоимость разработки, открывая новые

возможности для реализации сложных геометрических поверхностей и форм конструкций [1-8]. В условиях растущего космического рынка становится необходимым постоянное увеличение ресурса и энергоэффективности жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), что может быть достигнуто путем совершенствования систем охлаждения за счет совместного использования высококачественных материалов, аддитивного производства и новых конструктивных схем охлаждения – аддитивных пористых структур, расположенных в тракте ЖРД.

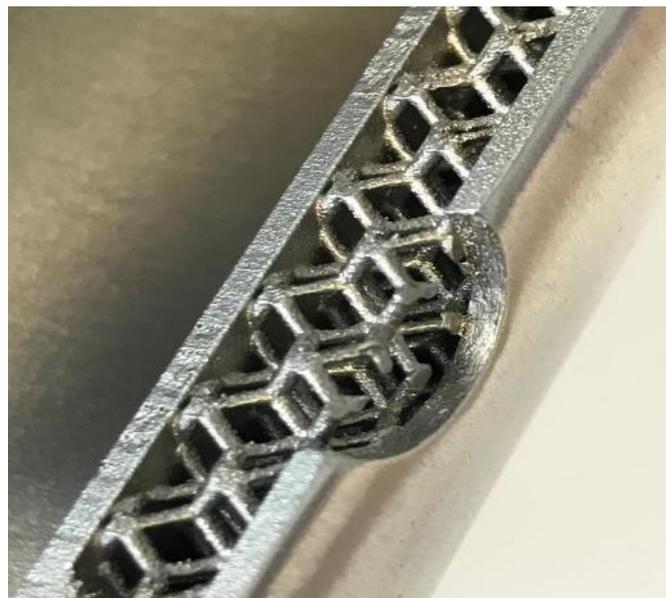
Цель научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ – разработка инновационной системы охлаждения ЖРД с аддитивными пористыми структурами в тракте и подтверждение эффективности ее использования. Аддитивные технологии, применяемые для изготовления охлаждающего тракта, позволяют достигнуть геометрической идентификации и однородности пористой структуры с постоянным диаметром ребер, что обуславливает возможность проведения исследований рабочих процессов во внутрипоровом пространстве с постановкой математической модели на основе уравнения Навье-Стокса и уравнения полной энергии, обеспечивая достоверность и точность результатов вычислительного эксперимента во всем объеме охлаждающего тракта.

Проведение исследований

В рамках исследований теплообменных процессов в тракте охлаждения ЖРД с аддитивной пористой структурой разработан экспериментальный образец участка охлаждающего тракта с ромбододекаэдрической пористой структурой и опытный образец ЖРД для проведения огневых испытаний. На рис. 1 представлена аддитивная пористая структура в охлаждающем тракте ЖРД [4].



a



б

Рисунок 1 – Пористая структура в охлаждающем тракте ЖРД:

a – элемент ромбододекаэдрической пористой структуры; *б* – фрагмент охлаждающего тракта ЖРД

Вычислительный эксперимент и теплогидравлические испытания проводились на экспериментальном образце участка охлаждающего тракта ЖРД с аддитивной пористой структурой. Исследования проводились для образцов охлаждающего тракта ЖРД с аддитивной пористой структурой с коэффициентом пористости в диапазоне 0,52-0,84 и диаметром ребер в диапазоне 0,9-1,8 мм (рис. 2).

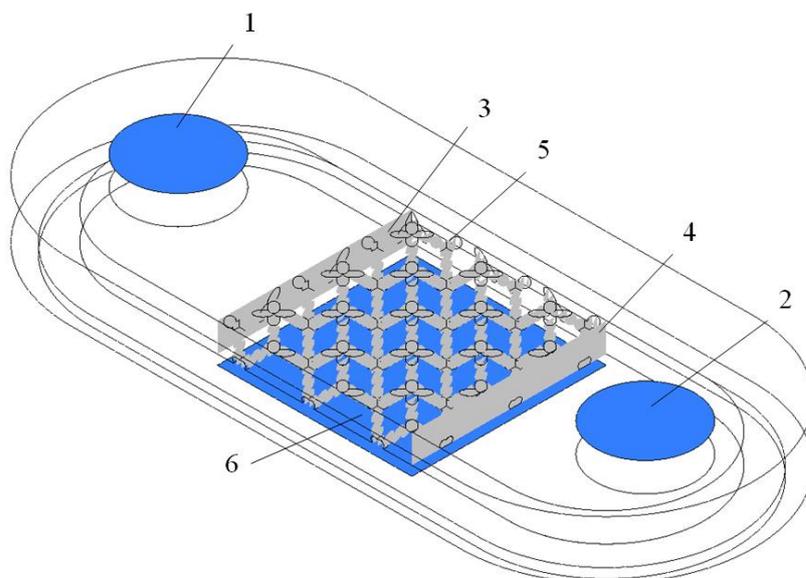


Рисунок 2 – Расчетная модель экспериментальный образец участка охлаждающего тракта ЖРД: 1 – вход в участок охлаждающего тракта; 2 – выход из участка охлаждающего тракта; 3 – вход в пористую структуру; 4 – выход из пористой структуры; 5 – металлический каркас, имитирующий стенки камеры ЖРД; 6 – нагревательный элемент

При нелинейной фильтрации процесс теплообмена однофазной рабочей среды при полной геометрической идентификации внутриворонного пространства описывается классическими уравнениями гидродинамики и теплообмена, представляющие собой уравнения Навье-Стокса и полной энергии.

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; ρ – плотность рабочей среды, кг/м³; 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; τ – тензор внутренних сдвиговых напряжений; S_M – слагаемое, определяющее влияние массовых и импульсных сил на процесс движения рабочего тела.

Уравнение полной энергии:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (3)$$

где h_{tot} – удельная полная энтальпия рабочей среды; λ – теплопроводность рабочей среды; S_E – слагаемое, определяющее влияние источников энергии на процесс движения рабочего тела; $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ – представляет собой работу, совершенную под действием вязкостных напряжений и называется работой (источником работы) вязкостных сил, определяющий нагрев за счет конечной вязкости рабочей среды, и может быть пренебрегаем в многих частных случаях.

Ключевыми параметрами пористой структуры и теплоносителя, оказывающими значительное влияние на процесс теплообмена в пористой структуре охлаждающего

тракта, является коэффициент пористости, средняя температура теплоносителя на входе и выходе из пористой структуры, средняя температура каркаса и теплоносителя во всем объеме пористой структуры. С целью определения указанных параметров был проведен вычислительный эксперимент более 130 расчетных точек для участка охлаждающего тракта с коэффициентом пористости в диапазоне от 0,52 до 0,84 в программном комплексе Ansys CFX.

Граничными условиями на входе в участок охлаждающего тракта являются давление теплоносителя при заданной температуре, на выходе массовый расход теплоносителя, мощность нагревательного элемента. Входные граничные условия в участок охлаждающего тракта – давление – 22075 Па (рис. 3а), давление на входе – 46100 Па (рис. 3б) Выходные граничные условия – массовый расход– 0,02764 кг/с (рис. 3а), массовый расход – 0,08299 кг/с (рис. 3б).

Результаты вычислительного эксперимента по двум расчетным точками представлены на рис. 3.

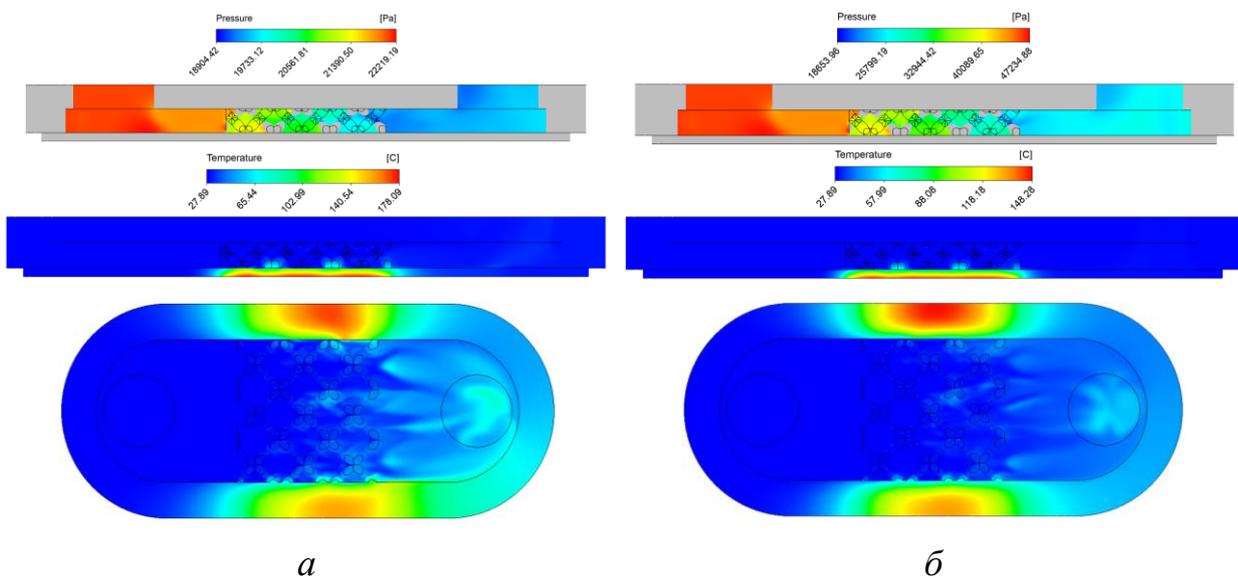
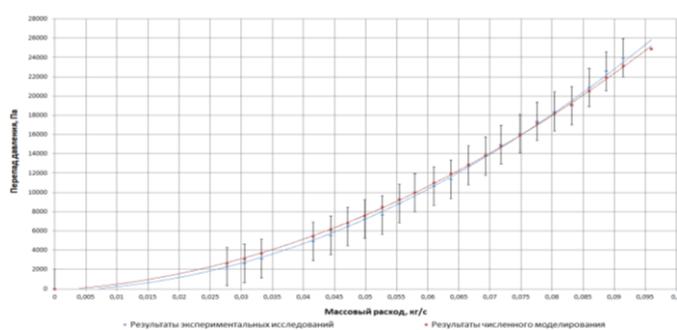
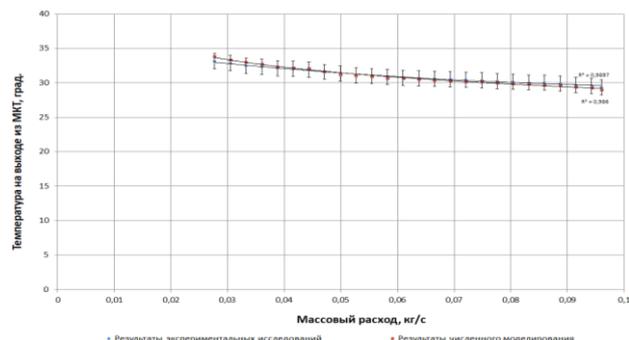


Рисунок 3 – Распределение полей давления и температуры теплоносителя участка охлаждающего тракта с коэффициентом пористости 0,74, мощностью нагревательного элемента 500 Вт и температурой теплоносителя 28 °С: а – поле давлений и температур при расходе 0,02764 кг/с; б – поле давлений и температур при расходе 0,08299 кг/с

Были проведены теплогидравлические испытания образца охлаждающего тракта с коэффициентом пористости 0,74 и диаметром граней 1,2 мм. Верификация данных, полученных в результате вычислительного эксперимента, и данных, полученных в результате теплогидравлических испытаний, представлена на рис. 4.



а



б

Рисунок 4 – Графики зависимостей:

а – перепада давления от массового расхода; б – температуры на выходе из образца

Результаты, полученные в ходе проведения вычислительного эксперимента (красный цвет на рис. 4а), являются достоверными, так как значения перепада давления находятся в пределах абсолютной погрешности, составляющей ± 2000 Па.

При верификации теплогидравлических испытаний с результатами вычислительного эксперимента была построена планка зависимости с учетом абсолютной погрешности температуры рабочей среды, которая составляет $\pm 1,1^\circ\text{C}$ (рис. 4 б). Таким образом, значения температуры рабочей среды на выходе из пористой структуры, полученные при вычислительном эксперименте, лежат в пределах абсолютной погрешности.

При процессе передачи теплоты от поверхности пористой структуры к рабочей среде основной характеристикой, отражающей рабочие процессы, являются поверхностный и объемный коэффициенты теплоотдачи. Средний по объему пористой структуры коэффициент теплоотдачи α_{Vcp} определяется по формуле [10]:

$$\alpha_{Vcp} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{ж.ср.вых} - T_{ж.ср.вх})}{V \cdot \Pi \cdot (T_{к.ср} - T_{ср.ж})}; \quad (4)$$

где F – площадь фильтрации; m – массовый расход рабочей среды; V – полный объем пористой структуры; $T_{ж.ср.вх}$, $T_{ж.ср.вых}$ – средняя температура на входе и выходе; $T_{к.ср}$ – средняя температура каркаса; $T_{ср.ж}$ – средняя температура рабочей среды; c_p – средняя удельная теплоемкость воды.

Для конвективной теплоотдачи имеет место следующее соотношение:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (5)$$

где Nu – число Нуссельта; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандля.

Движение охладителя в пористой структуре является вынужденным, поэтому числом Грасгофа, учитывающим подъемную силу при свободной конвекции, в соотношении (5) можно пренебречь, тогда имеем:

$$Nu = f(Re, Pr); \quad (6)$$

Функцию f в уравнении (6) выражают в виде степенной функции, дающей удовлетворительно точные результаты в широкой области значений, поэтому:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m; \quad (7)$$

где C , n и m – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Число Прандля:

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_m}; \quad (8)$$

где c_p – удельная теплоемкость рабочей среды; λ_m – коэффициент теплопроводности рабочей среды.

Для определения критерия Нуссельта использована формула [9, 10]:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{вср}} \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2}{\lambda} \quad (9)$$

где α – вязкостный коэффициент сопротивления; β – инерционный коэффициент сопротивления; λ – коэффициент теплопроводности рабочей среды.

Определив экспериментальным путем значения чисел Re , Pr и Nu при различных удельных массовых расходах среды, для пористых структур с коэффициентом пористости $0,52 \div 0,84$, методом наименьших квадратов необходимо получить значения коэффициентов C , n и m , входящих в равенство (8), решив систему уравнений из частных производных:

$$\begin{cases} S'_n(n, m, C) = n \sum_{i=1}^k \ln^2(\text{Re}) + m \sum_{i=1}^k \ln(\text{Re}) \cdot \ln(\text{Pr}) + C \sum_{i=1}^k \ln(\text{Re}) = \sum_{i=1}^k \ln(Nu) \cdot \ln(\text{Re}), \\ S'_m(n, m, C) = n \sum_{i=1}^k \ln(\text{Re}) \cdot \ln(\text{Pr}) + m \sum_{i=1}^k \ln^2(\text{Pr}) + C \sum_{i=1}^k \ln(\text{Pr}) = \sum_{i=1}^k \ln(Nu) \cdot \ln(\text{Pr}), \\ S'_C(n, m, C) = n \sum_{i=1}^k \ln(\text{Re}) + m \sum_{i=1}^k \ln(\text{Pr}) + C \cdot k = \sum_{i=1}^k \ln(Nu), \end{cases} \quad (10)$$

где $S(n, m, C)$ – функция, представляющая собой сумму квадратов отклонений табличных значений, полученных из экспериментальных данных, от искомой функции $C = \ln(c)$.

Полученные критериальные уравнения для определения числа Nu в пористых структурах с различным коэффициентом пористости приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Критериальные уравнения для определения числа Nu в пористых структурах с различным коэффициентом пористости

Коэффициент пористости	Критериальное уравнения для определения числа Nu
0,52	$Nu = 2,1981 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,2886} \cdot \text{Pr}^{-0,8825}$
0,60	$Nu = 2,4345 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,4369} \cdot \text{Pr}^{-1,1927}$
0,67	$Nu = 2,7570 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,3993} \cdot \text{Pr}^{-1,1510}$
0,74	$Nu = 1,1687 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,4535} \cdot \text{Pr}^{-0,7447}$
0,84	$Nu = 2,1330 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,4400} \cdot \text{Pr}^{-1,1060}$

Анализ критериальных уравнений $Nu = f(\text{Re}, \text{Pr})$ для образцов охлаждающего тракта с коэффициентом пористости 0,52-0,84 показал, что на значение числа Нуссельта оказывают значительное влияние геометрические характеристики пористой структуры, коэффициенты сопротивления и скорость течения теплоносителя.

Для подтверждения эффективности пористых систем охлаждения были проведены огневые испытания опытного образца ЖРД малой тяги, изготовленного аддитивными технологиями (рис. 5) [4].

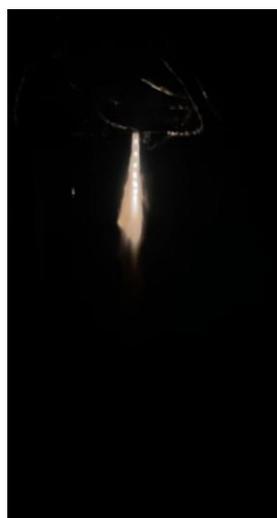


Рисунок 5 – Опытный образец ЖРД малой тяги со смесительными элементами

На рис. 6 представлены огневые испытания опытного образца ЖРД, работающего на компонентах топлива керосин и кислород, тяга двигателя 550 Н, номинальное значение давления в камере сгорания 55 атм.



а



б

Рисунок 6 – Проведение огневых испытаний экспериментального образца ЖРД малой тяги: а – ЖРД малой тяги на испытательном стенде; б – ЖРД малой тяги с характерными кольцами Маха

Во время огневых испытаний были отмечены характерные кольца Маха, что свидетельствует о сверхзвуковом характере истечения продуктов сгорания из сопла. Температура охладителя в охлаждающем тракте ЖРД в среднем на входе составила около 13 градусов, на выходе около 24 градусов, а общее время испытаний составило около 80 сек, что в совокупности свидетельствует об интенсивной охлаждающей способности системы охлаждения, что повышает ресурс двигателя.

Заключение

В ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была разработана инновационная система охлаждения ЖРД с аддитивными пористыми структурами в тракте. Были проведены теплогидравлические испытания и вычислительный эксперимент более 230 режимов работы системы охлаждения, в результате чего были получены критериальные зависимости для определения чисел Нуссельта, являющиеся основой всех инженерных методов расчета теплообменных процессов. Аддитивные технологии, заложенные в основу конструкторских решений разработанной системы охлаждения, обеспечивают возможность предварительного проектирования по инженерным методикам, основанным на полученных критериальных уравнениях числа Нуссельта, что сокращает сроки и стоимость разработки за счет замены на начальном этапе проектирования экспериментальных

исследований вычислительным экспериментом. В ходе огневых испытаний была подтверждена эффективность использования аддитивных пористых структур в охлаждающем тракте ЖРД и увеличение ресурса двигателя.

Список источников

1. Кислых В.В., Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Третьякова О.Н. О проблемах моделирования газодинамических течений в поршневой газодинамической установке для отработки изделий ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26754>
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. Соловьева О. В., Яфизов Р. Р., Соловьев С. А. Определение эффективной длины пористой структуры при конвективном теплообмене // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3. С. 113–122.
4. Шматов Д.П., Дроздов И.Г., Васильченко и др. Камера жидкостного ракетного двигателя. Патент № 2720596 РФ. 2020. Бюлл. № 14. 8 с.
5. 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.
6. Пелевин Ф. В., Авраамов Н. И., Семенов П. Ю. Новый подход к охлаждению ракетного кислородно-керосинового двигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 6. DOI: [10.7463/0612.0431608](https://doi.org/10.7463/0612.0431608)

7. 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.
8. Пелевин Ф.В., Авраамов Н.И., Синцов А.Л., Семенов П.Ю., Пономарев А.В. Конвективное охлаждение тепловых двигателей с использованием пористых материалов и принципа межканальной транспирации теплоносителя // 16 школа-семинар «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 21-25 мая 2007). - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т.1. 479 с.
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. Экспериментальные 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. Анисеев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамика. - М.: Изд-во МАИ, 2010. - 149 с.
19. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Физматгиз, 1960. - 715 с.
20. Бакланов А.В., Васильев А.А. Применение аддитивных технологий в вопросе исследования структуры течения формируемой горелками камер сгорания ГТД // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98895>

References

1. Kislykh V.V., Kudimov N.F., Panasenko A.V., Tret'yakova O.N. About modeling problems of gasdynamic flow Piston Gasdynamic Unit for development of products of space-rocket mechanics. *Trudy MAI*. 2011. No. 47. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26754>
2. Pelevin F.V., Avraamov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. Heat exchange efficiency in porous structural elements of liquid-propellant rocket engines. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013. No. 4. P. 1-14. (In Russ.)

3. Solov'eva O.V., Yafizov R.R., Solov'ev S.A. The porous structure effective thickness determination in the case of convective heat exchange. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020. V. 12, No. 3. P. 113–122. (In Russ.)
4. Shmatov D.P., Drozdov I.G., Vasil'chenko ets. Kamera zhidkostnogo raketnogo dvigatelya. Patent № 2720596 RF (Liquid-propellant engine chamber. Patent № 2720596 RU). 2020. Byull. No 14. 8 p.
5. Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu. Recuperative heat-exchange apparatus with porous metal for a liquid-propellant rocket engine. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2015. No. 6. P. 74-81. (In Russ.)
6. Pelevin F.V., Avraamov N.I., Semenov P.Yu. A new approach to cooling rocket oxygen-kerosene engine. 2012. No. 6. DOI: [10.7463/0612.0431608](https://doi.org/10.7463/0612.0431608)
7. Artemov A.L., Dyadchenko V.Yu., Luk'yashko A.V. ets. Development of design and technological solutions for the manufacture of prototypes of the inner shell of the combustion chamber of a multifunctional liquid rocket engine using additive technologies *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2017. No. 1. P. 50-62. (In Russ.)
8. Pelevin F.V., Avraamov N.I., Sintsov A.L., Semenov P.Yu., Ponomarev A.V. Convective cooling of heat engines using porous materials and the principle of interchannel coolant transpiration. *16 shkola-seminar «Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh»*, Saint Petersburg, May 2007. Moscow: Izdatel'skii dom MEI Publ., 2007. V.1, 479 p.
9. Polyayev V.M., Maiorov V.A., Vasil'ev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruktsii letatel'nykh apparatov* (Hydrodynamics and heat transfer in porous structural elements of aircraft). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 168 p.

10. Belov S.V. *Poristye metally v mashinostroenii* (Porous metals in mechanical engineering). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 247 p.
11. Rotermel' A.R., Yashkov S.A., Shevchenko V.I. Experimental study of aerodynamic characteristics in a supersonic wind tunnel ST-3 using a software and hardware complex. *Trudy MAI*. 2021. No. 119. (In Russ.). 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 Politekhnicheskogo universiteta Publ., 2011. 251 p.
13. Nekrasov B.B. *Gidravlika i ee primeneniya na letatel'nykh apparatakh* (Hydraulics and its applications on aircraft). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. 265 p.
14. Frik P.G. *Turbulentnost': modeli i podkhody* (Turbulence: models and approaches). Perm': PGTU Publ., 1998. 108 p.
15. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* (Boundary Layer Theory). Moscow: Nauka Publ., 1974. 712 p.
16. Ignatkin YU.M., Konstantinov S.G. Researches of aerodynamic characteristics of a main rotor helicopter using CFD method. *Trudy MAI*. 2012. No. 57. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30875>
17. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of liquid and gas). Moscow: Drofa Publ., 2003. 846 p.
18. Anikeev A.A., Molchanov A.M., Yanyshv D.S. *Osnovy vychislitel'nogo teploobmena i gidrodinamika* (Fundamentals of computational heat transfer and fluid dynamics). Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2010. 149 p.

19. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh strui* (Theory of turbulent jets). Moscow: Fizmatgiz Publ., 1960. 715 p.
20. Baklanov A.V., Vasil'ev A.A. Adaptive technologies application in the issue of studying the flow structure formed by the burners in the GTE combustion chamber. *Trudy MAI*. 2018. No. 102. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98895>

Статья поступила в редакцию 01.11.2024

Одобрена после рецензирования 17.11.2024

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 01.11.2024; approved after reviewing on 17.11.2024; accepted for publication on 25.02.2025