



**ПЕЛЕВИН**  
Федор Викторович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**PELEVIN**  
Fedor Viktorovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**ПОНОМАРЕВ**  
Алексей Викторович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**PONOMAREV**  
Aleksey Viktorovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**СЕМЕНОВ**  
Павел Юрьевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**SEMEVNOV**  
Pavel Yur'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

## К вопросу о применении пористых металлов в регенеративной системе охлаждения жидкостных ракетных двигателей

**Ф.В. Пелевин, А.В. Пономарев, П.Ю. Семенов**

*Требования по повышению надежности, ресурса, увеличению удельного импульса тяги жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) обосновывают необходимость перехода к новым конструкциям и технологиям изготовления регенеративной системы охлаждения двигателя. В работе рассмотрена новая высокоэффективная система регенеративного охлаждения на основе принципа межканальной транспирации теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл (ПСМ). Исследовано влияние числа каналов на гидравлические потери и эффективность теплообмена. Установлена высокая интенсификация теплообмена в пористом тракте при малых гидравлических потерях. Впервые определены оптимальные параметры регенеративной системы охлаждения ЖРД с межканальной транспирацией теплоносителя. На основе экспериментальных зависимостей по гидравлическому сопротивлению и теплообмену расчетно-экспериментальным путем показана высокая эффективность охлаждения ЖРД с использованием межканальной транспирации теплоносителя сквозь ПСМ. Представлена математическая модель и результаты расчетного исследования полей давления, температуры теплоносителя и пористого каркаса стенки камеры ЖРД.*

**Ключевые слова:** регенеративная система охлаждения, пористый сетчатый металл, межканальная транспирация теплоносителя, интенсификация теплообмена, гидравлические потери, эффективность теплообмена.

## On the application of porous metals in regenerative cooling systems of liquid propellant engines

**F.V. Pelevin, A.V. Ponomarev, P.Yu. Semenov**

*To improve the reliability, service life, and specific impulse of a liquid propellant engine, new designs and manufacturing technologies of regenerative cooling systems are required. The paper deals with a new high-performance regenerative cooling system based on the principle of inter-channel coolant transpiration through a porous metal. The influence of the number of channels on the hydraulic losses and heat transfer efficiency is studied. The heat transfer intensification is established in a porous tract at low hydraulic losses. The optimum parameters of the regenerative cooling system of a rocket engine with inter-channel coolant transpiration are first determined. Using experimental dependences for hydraulic resistance and heat transfer, the high efficiency of liquid propellant engine*

*cooling with inter-channel coolant transpiration through a porous metal is demonstrated experimentally and by calculation. A mathematical model and the results of numerical analysis of pressure fields, coolant temperature, and porous engine chamber walls are presented. Porous heat exchange tracts with inter-channel coolant transpiration should be used as a regenerative cooling system in a liquid propellant engine and regenerative heat exchangers of various purposes.*

**Keywords:** regenerative cooling system, porous metal, inter-channel coolant transpiration, heat transfer intensification, hydraulic losses, heat transfer efficiency.

С ростом давления в камере сгорания и повышением коэффициента массового соотношения окислителя и горючего  $k_m$  увеличивается не только удельный импульс двигателя, но и удельный тепловой поток  $q$  в стенку камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Поэтому создание новых высокоэкономичных двигателей во многом зависит от эффективности системы регенеративного охлаждения камеры ЖРД.

В настоящее время в подавляющем большинстве эксплуатирующихся камер ЖРД используется оребренный тракт охлаждения, который обеспечивает интенсификацию теплообмена по сравнению с гладким каналом  $Nu/Nu_{г\lambda}$  в 1,5—3 раза [1]. Причем эффективность оребрения  $\eta$  уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Применение искусственной шероховатости на дне канала в трактах охлаждения ЖРД также не дает высокого эффекта. Наибольшее значение теплогидравлической эффективности  $E$  достигается в области низких значений чисел Рейнольдса  $Re \approx 10^4$ , что для ЖРД с оребренными трактами не характерно. Такой уровень интенсификации теплообмена зачастую не обеспечивает удовлетворительного температурного состояния конструкции при ограниченных гидравлических потерях в регенеративной системе охлаждения. Поэтому для уменьшения удельных тепловых потоков в стенку двигателя практически всегда используется внутреннее (завесное) охлаждение, которое

обуславливает потери удельного импульса и усложняет конструкцию двигателя.

Необходимы новые конструкции и технологии изготовления теплообменных трактов, обеспечивающих надежное высокоэкономичное регенеративное охлаждение камеры ЖРД.

**Теоретическое обоснование необходимости перехода от одномерного (продольно-канального) к двумерному (межканальному) движению теплоносителя сквозь пористый металл.** Один из перспективных и эффективных методов интенсификации теплообмена заключается в использовании высокотеплопроводных пористых сетчатых металлов (ПСМ) в теплообменных устройствах. Такие металлы давно используются в ЖРД в качестве фильтров, капиллярно-заборных устройств и при изготовлении проникаемых огневых днищ смесительных головок. Однако в качестве теплообменного элемента (рис. 1) в проточной системе охлаждения ЖРД ПСМ не применяется из-за сверхвысоких гидравлических потерь, связанных с большими продольными габаритами камеры ЖРД, высокими коэффициентами гидравлического сопротивления и скоростями движения теплоносителя сквозь ПСМ, хотя, заполнение теплообменного тракта пористым высокотеплопроводным металлом с малым термическим сопротивлением между стенкой и пористым металлом максимально интенсифицирует теплообмен [2—9]. Для уменьшения потерь давления следует снижать скорости движения теплоносителя в ПСМ за счет увеличения проходного сечения тракта, что приводит к уменьшению интенсификации теплообмена и повышению массы и габаритов тракта. Но есть и другие пути уменьшения потерь давления. Анализ модифицированного уравнения Дарси

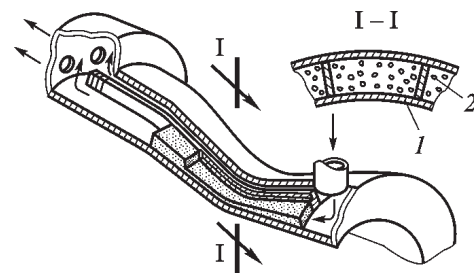


Рис. 1. Регенеративная система охлаждения ЖРД с пористым наполнителем [2]:

1 — внутренняя стенка камеры; 2 — пористый металл

$$-dp / dZ = \alpha \mu w + \beta \rho w^2 \quad (1)$$

( $p$  — давление;  $Z$  — координата;  $w$  — скорость движения;  $\rho$  — плотность;  $\mu$  — коэффициент динамический вязкости;  $\alpha, \beta$  — вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления ПСМ) показывает, что для снижения потерь давления в пористом теплообменном тракте, следует снижать скорость движения теплоносителя (на порядок и более), сократить путь движения теплоносителя сквозь ПСМ и уменьшить коэффициенты сопротивления ПСМ.

Для увеличения скорости движения теплоносителя через ПСМ и, соответственно, теплоотдачи, при заданных потерях давления, надо также уменьшать путь движения и коэффициенты сопротивления ПСМ.

Уменьшить потери давления в системе охлаждения без изменения габаритных размеров теплообменного тракта можно, если перейти от общеизвестного продольно-канального к продольно-поперечному (межканальному) движению теплоносителя сквозь ПСМ, изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток. Будем называть этот способ движения теплоносителя межканальная транспирация теплоносителя (МКТТ) сквозь ПСМ [2].

Организовать МКТТ сквозь ПСМ можно следующим образом (рис. 2). Теплоноситель из

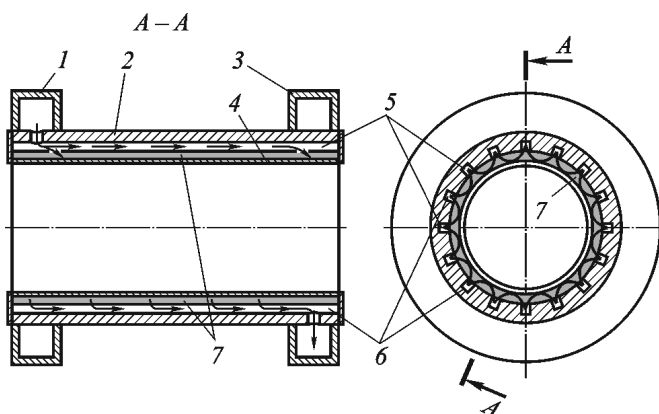


Рис. 2. Схема течения теплоносителя в тракте с МКТТ сквозь ПСМ:

- 1 — подводящий коллектор; 2 — наружная оболочка;
- 3 — сборный коллектор; 4 — внутренняя оболочка;
- 5 — подводящие каналы; 6 — отводящие каналы;
- 7 — ПСМ

подводящего коллектора 1 поступает в продольно расположенные в осесимметричной наружной оболочке 2 тракта подводящие каналы 5, заполняет их и под действием перепада давления движется сквозь ПСМ 7 в соседние отводящие каналы 6. Внутренняя оболочка 4 и торцы каналов непроницаемые для теплоносителя. Из отводящих каналов теплоноситель поступает в сборный коллектор 3, а в ЖРД — в смесительную головку. Подводящие и отводящие каналы чередуются и расположены симметрично относительно друг друга. Меняя число каналов, при заданном перепаде давления можно добиться требуемых скоростей движения теплоносителя сквозь ПСМ, не увеличивая толщину пористой вставки. Расстояние между подводящими и отводящими каналами может быть соизмеримо с толщиной пористого металла (3...5 мм).

При турбулентном режиме течения теплоносителя сквозь ПСМ, характерном для регенеративной системы охлаждения ЖРД, уравнение (1) принимает вид

$$\Delta p / l = \beta \rho v^2.$$

Здесь  $l$  — путь движения теплоносителя сквозь ПСМ из подводящего в отводящий канал;  $v$  — скорость движения теплоносителя через ПСМ.

Выигрыш в скорости движения теплоносителя в тракте с МКТТ по сравнению с продольно-канальным движением при одинаковых значениях  $\Delta p, \beta, \rho$  составляет

$$V_{\text{МКТТ}} / V_{\text{п-к}} = (L / l)^{0,5},$$

где  $L$  — продольный размер теплообменного тракта;  $V_{\text{п-к}}$  — скорость продольно-канального движения теплоносителя.

Теплообменный тракт с межканальной транспирацией теплоносителя особенно эффективен при большой протяженности тракта охлаждения ( $L \gg l$ ), т. е. в области, где кольцевой тракт с ПСМ становится малоэффективным.

Увеличение теплоотдачи при одинаковых числах  $Re$  и  $Pr$  составляет  $Nu_{\text{МКТТ}} / Nu_{\text{п-к}} = (L / l)^{0,4}$ .

Важным преимуществом тракта с МКТТ является то, что площадь проходного сечения проходного тракта возрастает не за счет увеличения поперечных габаритов тракта, а за счет

большого числа подводящих и отводящих каналов  $N$ . Площадь проходного сечения тракта с МКТТ

$$F_{\text{пр}} = NL\delta.$$

Здесь  $\delta$  — толщина пористого металла.

Для рассмотрения влияния числа каналов  $N$  на потери давления в тракте с МКТТ воспользуемся формулой (1). Для двух сравниваемых пористых теплообменных трактов с МКТТ секундный массовый расход теплоносителя  $\dot{m}$ , толщину ПСМ  $\delta$ , габариты тракта  $D$  и  $L$ , коэффициенты сопротивления ПСМ  $\alpha$ ,  $\beta$  и температуру теплоносителя  $T$  будем считать постоянными, а число каналов  $N$ , расстояние между каналами  $l$ , площадь проходного сечения  $F_{\text{пр}}$  — переменными. Число каналов и расстояние между каналами связаны зависимостью

$$N_1 l_1 = N_2 l_2.$$

Для несжимаемой жидкости на ламинарном режиме течения применим закон Дарси. Выражая скорость фильтрации через секундный массовый расход и учитывая, что  $F_{\text{пр}} = NL\delta$ , получим

$$\Delta p = \frac{\alpha \mu \dot{m} l}{\rho \delta N L}.$$

Потери давления в пористых трактах с МКТТ

$$\Delta p_1 / \Delta p_2 = N_2^2 / N_1^2.$$

Для турбулентного режима течения несжимаемой жидкости

$$\Delta p = \frac{\dot{m}^2 \beta l}{\rho \delta^2 N^2 L^2}.$$

Отношение потерь давления

$$\Delta p_1 / \Delta p_2 = N_2^3 / N_1^3.$$

Для расчета потерь давления при течении сжимаемой жидкости воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$\rho = \frac{p_{\text{ср}}}{RT_{\text{ср}}},$$

где  $p_{\text{ср}}$  — осредненное давление жидкости в пористом металле.

Тогда для ламинарного режима

$$\Delta p_1 / \Delta p_2 = \frac{p_{2\text{ср}} T_1 N_2^2}{p_{1\text{ср}} T_2 N_1^2};$$

для турбулентного режима

$$\Delta p_1 / \Delta p_2 = \frac{N_2^3 p_{2\text{ср}} T_1}{N_1^3 p_{1\text{ср}} T_2}.$$

Изменяя число каналов  $N$ , можно добиться требуемых скоростей фильтрации теплоносителя сквозь ПСМ и, следовательно, необходимых потерь давления, не увеличивая толщину пористого металла  $\delta$ .

Из приведенных выше зависимостей следует, что для уменьшения затрат мощности на прокачку теплоносителя необходимо использовать тракты с максимально большим числом каналов.

Правильный выбор пористого материала для теплообменных трактов повышает их теплогидравлическую эффективность.

Для эффективной работы теплообменного тракта с МКТТ пористый металл должен обладать следующими свойствами:

- 1) минимальным гидравлическим сопротивлением в направлении движения теплоносителя;
- 2) высокой теплопроводностью в направлении теплового потока;
- 3) высокой удельной прочностью, необходимой при изготовлении тонкостенных (2...5 мм) протяженных осесимметричных оболочек;
- 3) равномерной стабильной проницаемостью;
- 4) высокой технологичностью.

Всем этим требованиям отвечают ПСМ, изготовленные методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток [3]. Эти металлы характеризуются прогнозируемой структурой, стабильной проницаемостью, высокой теплопроводностью в направлении слоев сеток, высокой прочностью и технологичностью [3]. Среди всех пористых металлов ПСМ имеет самые лучшие прочностные свойства.

Пористый сетчатый металл — это анизотропный материал. При одинаковой пористости гидравлическое сопротивление, теплопроводность, прочность вдоль слоев сеток и поперек плоскости сеток различны. В тракте с МКТТ

анизотропия свойств ПСМ полностью учитывается, поэтому ПСМ можно применять в регенеративной системе охлаждения ЖРД и в рекуперативных теплообменных аппаратах.

Регенеративная система охлаждения камеры ЖРД с МКТТ представлена на рис. 3.

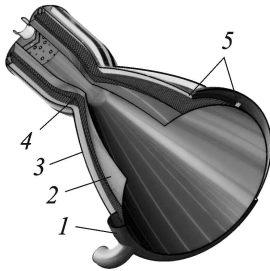


Рис. 3. Камера ЖРД с МКТТ:

1 — коллектор подвода охладителя; 2 — внутренняя огневая стенка камеры; 3 — наружная силовая стенка камеры; 4 — ПСМ; 5 — подводящие и отводящие каналы

**Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и теплообмена в ПСМ.** Анализируя результаты гидравлического сопротивления ПСМ при одномерной и двумерной фильтрации теплоносителя, следует отметить, что ПСМ, изготовленные из тканых фильтровых сеток, как говорилось выше, являются анизотропными материалами [2, 3]. Например, для ПСМ из тканой полотняной сетки П60 с пористостью  $\Pi = 0,48$  отношение вязкостных и инерционных коэффициентов ПСМ  $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}$  и  $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel}$  при фильтрации теплоносителя ортогонально к плоскости сварки сеток ( $\perp$ ) и при межсеточной фильтрации ( $\parallel$ ) составило  $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel} = 2,7$  и  $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel} = 2,4$ .

Для каждого типа сетки (полотняного, саржевого переплетения и др.) получены свои экспериментальные зависимости вязкостных и инерционных коэффициентов сопротивления ПСМ от пористости. Для ПСМ из полотняной сетки П60 получены следующие зависимости для вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления с восстановленной проницаемостью после механической обработки при межсеточной фильтрации теплоносителя:

$$\alpha = (-5,148 \cdot \Pi^4 + 7,917 \cdot \Pi^3 - 4,409 \cdot \Pi^2 + 1,034 \cdot \Pi - 0,0824) \cdot 10^{13};$$

$$\beta = (3,345 \cdot \Pi^4 - 5,232 \cdot \Pi^3 + 3,022 \cdot \Pi^2 - 0,7718 \cdot \Pi + 0,07531) \cdot 10^8. \quad (2)$$

Здесь пористость ПСМ  $\Pi = 0,291 \dots 0,476$ .

По сравнению с пористыми порошковыми металлами коэффициенты сопротивления ПСМ  $\alpha$  и  $\beta$  из тканой фильтровой полотняной сетки П24—П60 при одинаковой пористости и межсеточной фильтрации теплоносителя меньше в 10 и более раз [2, 3]. Это можно объяснить низкой шероховатостью ( $1 \cdot 10^{-6}$  м) холоднокатанной проволоки, меньшей извилистостью поровых каналов и регулярностью структуры.

Такое значительное уменьшение коэффициентов сопротивления резко увеличивает эффективность теплообмена и выдвигает пористый теплообменный тракт с МКТТ и межсеточной фильтрацией теплоносителя на первый план.

На основании экспериментальных данных получено обобщающее критериальное уравнение поверхностной теплоотдачи в тракте с МКТТ и двумерным движением теплоносителя в диапазоне изменения чисел  $Re = 20 \dots 2 \cdot 10^4$ , чисел  $Pr = 0,7 \dots 7$ , пористости ПСМ  $\Pi = 0,2 \dots 0,61$ , относительного пути движения теплоносителя  $l/\delta = 1,4 \dots 11,3$ . Критериальное уравнение теплоотдачи имеет вид

$$St = 0,57 Re^{-0,2} Pr^{-0,7} \varepsilon_l \varepsilon_{\lambda}. \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon_l$  — коэффициент, учитывающий теплообмен на начальном участке;  $\varepsilon_{\lambda}$  — коэффициент, учитывающий влияние теплопроводности материала сетки.

Из критериального уравнения (3) следует, что теплоотдача в пористом тракте с МКТТ в десятки раз больше, чем в гладком канале (трубе). Интенсификация теплообмена зависит от коэффициентов теплопроводности теплоносителя и ПСМ, а также от коэффициента  $\varepsilon_l$ , который учитывает увеличение теплоотдачи на начальном участке теплообмена в ПСМ. Как известно, интенсификация теплообмена происходит на начальном участке и в гладком канале.

Высокая интенсификация теплоотдачи в пористых трактах с МКТТ хорошо согласуется с данными работ [4—9].

Из характера зависимости (3) можно предположить, что зависимость будет действитель-

на и при больших числах Рейнольдса, так как развитый турбулентный режим движения полностью стабилизировался.

Влияние коэффициента теплопроводности теплоносителя на теплоотдачу учитывается с помощью числа  $Pr$ , а влияние коэффициента теплопроводности материала сетки  $\lambda$  на теплоотдачу — с помощью коэффициента  $\varepsilon_\lambda = (\lambda / \lambda_{12X18H10T})^{0,4}$ , где  $\lambda_{12X18H10T}$  — коэффициент теплопроводности хромоникелевой стали 12X18H10T.

Увеличение теплоотдачи с уменьшением отношения  $l/\delta$  учитывается введением поправочного коэффициента  $\varepsilon_l$ , который вычисляется по экспериментально полученной формуле [10]

$$\varepsilon_l = 0,5945 + 4,279(\delta / l) + 3,86(\delta / l)^2 - 4,995(\delta / l)^3,$$

справедливой в диапазоне толщин пористого металла  $\delta = (2...5,6) \cdot 10^{-3}$  м и расстояний между каналами  $l = (7,97...33,77) \cdot 10^{-3}$  м.

**Результаты моделирования температурного состояния камеры ЖРД с МКТТ.** Особенность расчета ЖРД с МКТТ заключается в том, что расход охлаждающего компонента по длине регенеративного тракта охлаждения камеры переменен. При постоянном по длине камеры перепаде давления охлаждающего компонента между подводящими и отводящими каналами и неизменном числе каналов из-за переменного расстояния между каналами в критическом сечении камеры расход охлаждающего компонента будет наибольший. С увеличением расстояния между каналами расход компонента уменьшается, что положительно сказывается на равномерности температуры стенки камеры по длине ЖРД. Изменяя толщину ПСМ, пористость, тип сетки ПСМ по длине камеры, можно регулировать расход (скорость) компонента, а следовательно и температуру огневой стенки камеры. Варьируя этими параметрами можно добиться практически постоянной температуры стенки по длине камеры и тем самым уменьшить термическое напряжение в огневой стенке камеры.

На основании проведенных экспериментальных исследований был разработан метод поверочного расчета температурного состоя-

ния внутренней стенки охлаждающего тракта ЖРД с использованием МКТТ сквозь ПСМ.

Отличие от общеизвестного алгоритма расчета наружного охлаждения ЖРД заключается в нахождении количества компонента  $m_i$ , протекающего через  $i$ -й участок камеры.

По известной методике поверочного расчета охлаждающего тракта ЖРД [1], используя зависимость (3), определяется температура стенки камеры со стороны охлаждающего компонента (жидкости)  $T_{ст.ж,i}$ , подогрев компонента на каждом участке разбиения  $\Delta T_i$ , суммарный подогрев компонента в тракте охлаждения ЖРД.

На основании методики расчета температурного состояния камеры ЖРД с МКТТ разработана компьютерная программа. Из примера расчета камеры разгонного двигателя, приведенного в таблице, следует, что при заданном постоянном перепаде давления 1,5 МПа компонента по длине камеры, числе подводящих и отводящих каналов  $N = 22$ , расход компонента  $O_{2ж}$  переменен по длине камеры и зависит от расстояния между каналами и от значения коэффициентов сопротивления ПСМ  $\alpha, \beta$  на участках разбиения камеры вдоль продольной оси (при одинаковых участках разбиения). При увеличении коэффициентов сопротивления ПСМ (пористость ПСМ уменьшилась с 0,29 до 0,23), снизился расход на 12-м участке и, следовательно, скорость компонента, а температура стенки камеры со стороны охлаждающего компонента возросла. Таким образом, можно получить почти постоянную температуру стенки камеры без резкого пика температуры в районе критического сечения.

Суммарный секундный расход компонента (жидкого кислорода)  $\Sigma m = 10,0$  кг/с;  $T_{вхO_2} = 108$  К;  $\Sigma \Delta T = 151,14$  К;  $\Sigma T_{вх} = 182,86$  К; средняя плотность, вязкость, теплоемкость жидкого кислорода:  $\rho = 752$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,4784 \cdot 10^{-04}$  кг/(м·с),  $C_p = 2074$  Дж/(кг·К); ПСМ из полотняной сетки П60; материал сетки — хромистая бронза БРХ-08,  $P = 0,29$ ; толщина пористой оболочки  $\delta = 0,00289$  м.

На основании результатов численного моделирования установлено, что минимальная температура огневой стенки при заданных потерях

Исходные данные и результаты расчета температурного состояния стенки камеры со стороны охлаждающего компонента

Номер участка	$\Delta X$ , м	$Q \cdot 10^{-7}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha \cdot 10^{-10}$ , м <sup>-2</sup>	$\beta \cdot 10^{-5}$ , м <sup>-1</sup>	w, м/с	Re $\cdot 10^{-4}$	$\dot{m}$ , кг/с	$\Delta T$ , К	$T_{ст.ж}$ , К
1	0,105	3,95	3,31	1,7	0,795	7,85	3,988	160,8	433,2
2	0,015	4,07	3,31	1,7	0,800	7,95	0,576	161,8	438,0
3	0,015	4,30	3,31	1,7	0,811	8,15	0,584	163,3	447,2
4	0,0155	4,77	3,31	1,7	0,829	8,55	0,637	166,9	465,9
5	0,012	5,47	3,31	1,7	0,866	8,77	0,538	164,2	483,9
6	0,010	6,51	3,31	1,7	0,910	9,22	0,486	164,4	514,9
7	0,010	7,44	3,31	1,7	0,950	9,41	0,473	161,5	537,9
8	0,010	7,74	3,31	1,7	0,971	9,27	0,466	156,4	539,4
9	0,010	5,64	3,31	1,7	0,953	7,40	0,490	130,4	448,4
10	0,0125	2,91	3,31	1,7	0,883	5,19	0,675	97,8	327,1
11	0,0175	1,69	3,31	1,7	0,790	4,17	0,870	85,1	271,9
12	0,016	1,01	150	15	0,226	3,19	0,216	227,4	456,7

давления в регенеративном тракте охлаждения устанавливается при расстоянии между каналами в районе критического сечения около 8...10 мм и высокотеплопроводном ПСМ на основе хромистой бронзы. Толщина пористого сетчатого металла соответствует оптимальной высоте оребренного тракта (3...4 мм). Для достижения оптимальной толщины ПСМ при заданном перепаде давления и числе каналов пористость ПСМ по длине камеры должна составлять 0,35...0,23.

Варьирование пористостью ПСМ по длине камеры ЖРД способствует выравниванию температуры огневой стенки по длине камеры и уменьшению термической деформации камеры. Низкие значения пористости ПСМ наблюдаются в области малых тепловых потоков. Низким значениям пористости ПСМ соответствует более высокая прочность пористого материала.

**Математическая модель и результаты численных расчетов полей давления и температуры в пористом тракте с МКТТ.** Для качественного понимания структуры двумерного движения теплоносителя и распределения температуры в ПСМ рассчитаны поля давления и температуры для ячейки тракта с МКТТ.

Когда отношение  $l/\delta$  мало течение сжимаемой жидкости в элементарной ячейке тракта с МКТТ носит двумерный характер. При расчете течения

и теплообмена в тракте с МКТТ необходимо использовать численное моделирование.

Рассмотрим пористое тело произвольной формы, частично заключенное в непроницаемую оболочку и имеющее включения из непроницаемого однородного материала. Часть внешней границы пористого тела нагревается. Охлаждение тела осуществляется прокачкой вязкого сжимаемого газа через пористую среду, движение газа происходит вследствие разности давления газа на входной и выходной границах. Пористая среда имеет анизотропную теплопроводность и проницаемость.

При построении математической модели процесса тепло- и массообмена в пористой среде для ее последующего численного решения методом контрольных объемов необходимо учесть следующие особенности:

1) вектор массовой скорости  $\rho w$  является фильтрационной скоростью и определяется как предел отношения секундного расхода теплоносителя через площадку, нормальную к направлению максимального расхода, к величине этой площадки при стремлении последней к нулю [10]. Поэтому при определении граничных условий на непроницаемых границах следует задаваться условием, что  $(\rho w, n) = 0$ , а не условием прилипания  $|w| = 0$ ;

2) при задании граничных условий для уравнения неразрывности на проницаемых участках внешней границы вместо задания расхода можно задавать распределение давления газа. Это вызвано тем, что дискретные аналоги для определения поля давления получаются интегрированием уравнения неразрывности;

3) граничные условия для уравнения энергии теплоносителя для соблюдения интегрального теплового баланса при численном решении уравнения энергии и уравнения теплопроводности для каркаса должны задаваться соотношением

$$\left( (\rho c)_G \mathbf{w} T_G - \lambda_G \text{grad} T_G, \mathbf{n} \right) = f_G(\mathbf{r}, \tau).$$

Для расчета температурного состояния пористого элемента при двумерном движении теплоносителя необходимо решить уравнения [11]:

$$u = - \frac{1}{\mu \alpha_1 + \rho \beta_1 |\mathbf{w}|} \frac{\partial p}{\partial x} + S^u; \quad (4)$$

$$v = - \frac{1}{\mu \alpha_2 + \rho \beta_2 |\mathbf{w}|} \frac{\partial p}{\partial y} + S^v; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (\rho c)_G \varepsilon \frac{\partial T_G}{\partial \tau} + \text{div} \left( (\rho c)_G \mathbf{w} T_G - \lambda_G \text{grad} T_G \right) = \\ = h_V (T_S - T_G); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (\rho c)_S (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_S}{\partial \tau} + \text{div} \left( - \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}_S \text{grad} T_S \right) = \\ = h_V (T_G - T_S) + q_V, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathbf{w} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ ;  $S^u, S^v$  — источниковые члены в уравнениях движения для  $u$  и  $v$ ;  $u, v, T_G, T_S, p$  — неизвестные величины. Вязкость охлаждающего газа задана, плотность определяется из уравнения состояния. Уравнение (4) может рассматриваться, как уравнение для определения  $u$  — проекции вектора  $\mathbf{w}$  на ось  $x$ , уравнение (5) — для определения  $v$  — проекции вектора  $\mathbf{w}$  на ось  $y$ , уравнение (7) — для определения температуры охладителя  $T_G$ , уравнение (8) — для определения температуры каркаса ПМ  $T_S$ . Для прямого определения давления

$p$  уравнения нет, оно определяется косвенно через уравнение неразрывности (6).

В работе [11] приведено описание математической модели гидродинамики и теплообмена в ячейке тракта с МКТТ. Подводящие и отводящие каналы выполнены в ПСМ. Расчетная схема ячейки тракта с МКТТ представлена на рис. 4.

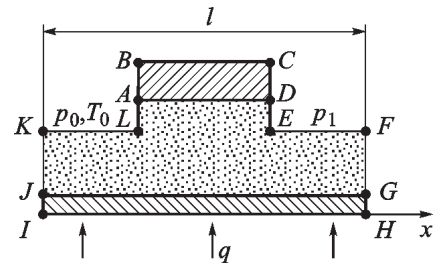


Рис. 4. Расчетная схема ячейки тракта с каналами в теле ПСМ:

$p_0$  — давление на входе;  $p_1$  — давление на выходе

При моделировании процесса теплообмена при МКТТ сквозь ПСМ были заданы следующие параметры ПСМ:

- вязкостной коэффициент сопротивления  $\alpha = 3,97 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ ;
- инерционный коэффициент сопротивления  $\beta = 3,03 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ ;
- теплопроводность ПСМ вдоль плоскости сеток  $\lambda = 8,19 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Массовый расход газообразного кислорода через пористую вставку составил 0,620 кг/с. Поля давлений и температур при перепаде давления  $\Delta p = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$  изображены на рис. 5, 6.

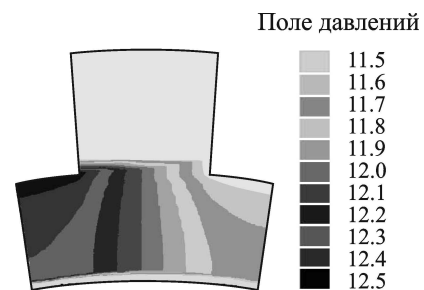


Рис. 5. Поле давлений в ячейке тракта с МКТТ

На рисунке 5 видно, что застойные зоны наблюдаются вблизи теплоотдающей поверхности (огневой стенки) в зонах подвода и отвода теплоносителя и в теле ПСМ при непроницае-



мых боковых стенках подводящего и отводящего каналов.

На проницаемом дне подводящего канала температура теплоносителя минимальная (рис. 6, а). По мере приближения к отводящему каналу она постепенно растет. На дне отводящего канала наблюдаются потоки теплоносителя с разной температурой. У непроницаемой боковой стенки отводящего канала температура теплоносителя минимальная, а у центра канала — почти максимальная. Максимальная температура теплоносителя наблюдается в застойных зонах у теплоотдающей стенки напротив центров подводящего и отводящего каналов.

На рисунке 6, б видно, что поле температуры каркаса ПСМ в ячейке тракта качественно соответствует полю температуры теплоносителя. Отличие наблюдается только в численных значениях.

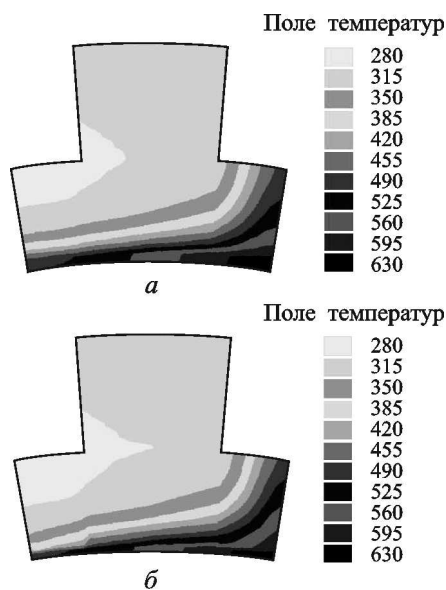


Рис. 6. Поле температуры в ячейке тракта с МКТТ: а — теплоносителя; б — каркаса ПСМ

Для снижения температуры и выравнивания ее полей необходимо использовать высокотеплопроводный ПСМ на основе сеток из хромистой бронзы.

## Выводы

1. Теоретически обоснован переход от традиционного продольно-канального движения к продольно-поперечному движению охладите-

ля (межканальному движению) сквозь ПСМ с целью достижения максимально возможной интенсификации теплообмена в теплообменном тракте при минимальных потерях давления в нем.

2. Расчетно-экспериментальным путем определено температурное состояние камеры.

3. Установлены параметры тракта охлаждения ЖРД с МКТТ.

4. Переход от оребренного тракта охлаждения камеры ЖРД к тракту с МКТТ на основе ПСМ из хромистой бронзы позволяет уменьшить потери давления в тракте охлаждения ЖРД в 3 раза.

## Литература

- [1] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
- [2] Леонтьев А.И., Пилиugin Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М., ред. *Научные основы технологий XXI века*. Москва, УНПЦ ЭНЕРГОМАШ, 2000. 136 с.
- [3] Резник С.В., ред. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее*. В 3 т. Т. 2: *Передовые технологии производства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с.
- [4] Зейгарник Ю.А., Поляев В.М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных сред в условиях вынужденного движения в пористых структурах. *Инженерно-физический журнал*, 2000, т. 73, № 6, с. 1125–1134.
- [5] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. К оценке теплогидравлических характеристик пористых структур. *Тр. 5 Рос. нац. конф. по теплообмену*. В 8 т. 2010, т. 5, с. 172–175.
- [6] Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Башкирцев Г.В. Теплообмен и сопротивление при течении однофазного теплоносителя в высокопористой вставке. *Тр. 5 Рос. нац. конф. по теплообмену*. В 8 т. 2010, т. 5, с. 176–179.
- [7] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах. *ТВТ*, 2010, т. 48, № 3, с. 402–408.
- [8] Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А. Геометрические и теплофизические характеристики высокопористой структуры. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2010, № 2, с. 49–52.
- [9] Коротеев А.С., ред. *Ядерные ракетные двигатели*. Москва, ООО Норма-Информ, 2001. 416 с.
- [10] Пелевин Ф.В., Лозовецкий В.В., Семенов П.Ю. Теплообмен и гидродинамика в пористых металлах при двумерном течении теплоносителя. *XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену*. Минск, 10–13 сентября 2012. *Тез. докл. и сообщ.*, т. 1, ч. 2, с. 577–579.
- [11] Пелевин Ф.В., Лозовецкий В.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Моделирование гидродинамики и теплообмена в пористой среде при двумерном течении теплоносителя. 17-я Школа-семинар под руков. Академика А.И. Леонтьева. *Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях*. Жуковский, 25–29 мая 2009 г., т. 1, с. 221–224.

## References

- [1] Dobrovolskii M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid rocket engine]. Moscow, Bauman Press, 2005. 488 p.
- [2] *Nauchnye osnovy tekhnologii 21 veka* [Scientific bases of technology of the 21 century]. Ed. Leont'ev A.I., Piliugin N.N.,

Polezhaev Iu.V., Poliaev V.M. Moscow, UNPTs Energomash publ., 2000. 136 p.

[3] *Materialy i pokrytiia v ekstremal'nykh usloviakh. Vzglia d v budushchee* [Materials and coatings under extreme conditions. Prospection]. *Peredovye tekhnologii proizvodstva* [Advanced production technology]. Ed. Reznik S.V. Vol. 2, Moscow, Bauman Press, 2002. 296 p.

[4] Zeigarnik Yu.A., Polyaev V.M. Heat Exchange and Hydrodynamics of Two-Phase Media under Conditions of Forced Motion in Porous Structures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2000, vol. 73, no. 6. pp. 1093–1101.

[5] Zeigarnik Iu.A., Ivanov F.P. *K otsenke teplogidravlicheskhk kharakteristik poristykh struktur* [Estimating the thermal and hydraulic characteristics of porous structures]. *Trudy 5 Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [5 Proceedings of the Russian National Conference on Heat]. 2010, vol. 5, pp. 172–175.

[6] Kirsanov Iu.A., Nazipov R.A., Bashkirtsev G.V. *Teploobmen i protivivlenie pri techenii odnofaznogo teplonositelia v vysokoporistoi vstavke* [Heat transfer and flow resistance in a single-phase coolant in highly porous insert]. *Trudy 5 Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [5 Proceedings of the Russian National Conference on Heat]. 2010, vol. 5, pp. 176–179.

[7] Zeigarnik Yu.A., Ivanov F.P. Generalization of experimental data on internal heat transfer in porous structures. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 3, pp. 382–387.

[8] Kirsanov Yu.A., Nazipov R.A., Danilov V.A. Geometric and thermophysical characteristics of a highly-porous structure. *Russian Aeronautics*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 191–197.

[9] Demianko Iu. G., Koniukhov G. V., Koroteev A. S., Kuz'min E. P., Pavel'ev A. A. *Iadernye raketnye dvigateli* [Nuclear rocket engines]. Moscow, OOO Norma-Inform publ., 2001. 416 p.

[10] Pelevin F.V., Lozovetskii V.V., Semenov P.Iu. *Teploobmen i gidrodinamika v poristykh metallakh pri dvumernom techenii teplonositelia* [Heat transfer and hydrodynamics in porous metals with two-dimensional flow of the coolant]. *15 Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo-i massoobmenu* [15 Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer]. Minsk, 10–13 September 2012, vol. 1, pt. 2, pp. 577–579.

[11] Pelevin F.V., Lozovetskii V.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Iu. *Modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena v poristoi srede pri dvumernom techenii teplonositelia* [Modeling hydrodynamics and heat transfer in porous media with two-dimensional flow of the coolant]. *17-ia Shkola-seminar pod rukovodstvom Akademika A.I. Leont'eva Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v aerokosmicheskikh tekhnologiiakh* [17<sup>th</sup> School-workshop led by Academician Leontiev A.I. problems of gas dynamics and heat and mass transfer in aerospace technology]. Zhukovskii, 25–29 May 2009, vol. 1, pp. 221–224.

Статья поступила в редакцию 16.01.2014

## Информация об авторах

**ПЕЛЕВИН Федор Викторович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pelfv@rambler.ru).

**ПОНОМАРЕВ Алексей Викторович** (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 9722525@mail.ru).

**СЕМЕНОВ Павел Юрьевич** (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pavel.y.semenov@rambler.ru).

## Information about the authors

**PELEVIN Fedor Viktorovich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: pelfv@rambler.ru).

**PONOMAREV Aleksey Viktorovich** (Moscow) — Post-Graduate of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: 9722525@mail.ru).

**SEMENOV Pavel Yur'evich** (Moscow) — Post-Graduate of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: pavel.y.semenov@rambler.ru).