

Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей

© Ф.В. Пелевин, Н.И. Авраамов, С.А. Орлин, А.Л. Синцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены новый метод интенсификации теплообмена с использованием пористых сетчатых материалов и принцип межканальной транспирации теплоносителя, сочетающий высокую интенсивность теплообмена, присущую высокотеплопроводным пористым материалам, и низкие гидравлические потери. Приведены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления при одномерной и двумерной фильтрации теплоносителя. Получено обобщающее критериальное уравнение теплообмена при двумерном течении теплоносителя через пористый сетчатый материал. Определены оптимальные параметры материала. Показана высокая эффективность пористого теплообменного тракта с межканальной транспирацией теплоносителя по сравнению с гладким и оребренным трактами.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, теплообмен, пористые сетчатые материалы, интенсификация теплообмена.

Введение. Одним из перспективных и эффективных способов интенсификации теплообмена является использование в теплообменных устройствах пористых металлов (ПМ) [1]. Физическую основу этого способа составляет чрезвычайно высокая интенсивность теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их соприкосновения. Заполнение пространства теплообменного тракта между стенкой и пористым каркасом высокотеплопроводным пористым металлом с малым термическим сопротивлением максимально интенсифицирует теплообмен [2], однако при этом наблюдается резкое увеличение гидравлических потерь [3], что сдерживает широкое применение этого метода в регенеративной системе охлаждения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и в рекуперативных теплообменниках. Для уменьшения потерь давления приходится идти на уменьшение скорости движения теплоносителя в ПМ в результате увеличения проходного сечения тракта, что приводит к уменьшению интенсификации теплообмена и увеличению массы и габаритов тракта.

Уменьшить потери давления в теплообменном тракте с пористым наполнителем, не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта, можно, если перейти от общеизвестного продольно-каналь-

ного движения теплоносителя через ПМ, изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток, к межканальному (продольно-поперечному), так как при этом увеличивается площадь проходного сечения вследствие большого числа подводящих и отводящих каналов. Принцип межканальной транспирации теплоносителя (МКТТ) через ПМ позволяет создать высокоэффективный теплообменный тракт с большей эффективностью теплообмена, чем у известных высокооробренных теплообменных трактов. Тракт с МКТТ сочетает в себе высокую теплоотдачу, свойственную трактам, заполненным ПМ, и низкие гидравлические потери.

Теоретический анализ теплообменного тракта. Описание конструкции тракта охлаждения ЖРД. Выполнено теоретическое обоснование необходимости перехода от одномерного (продольно-канального) к двумерному (межканальному) движению теплоносителя сквозь ПМ в теплообменных аппаратах и системах тепловой защиты.

Из анализа модифицированного уравнения Дарси

$$-\frac{dP}{dZ} = \alpha \mu w + \beta \rho w^2$$

можно сделать следующие выводы.

1. Чтобы снизить потери давления в пористом тракте, надо сократить путь движения теплоносителя через ПМ и уменьшить вязкостный α и инерционный β коэффициенты сопротивления пористой среды.

2. Увеличение скорости w движения через ПМ (т. е. увеличение теплообмена) при заданных потерях давления также может быть достигнуто уменьшением пути движения и коэффициентов сопротивления ПМ.

Анализ модифицированного уравнения Дарси показывает, что отношение потерь давления в пористых трактах с МКТТ для несжимаемой жидкости при ламинарном режиме течения составляет

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{N_2^2}{N_1^2},$$

где N_1 и N_2 — число каналов в трактах.

При турбулентном режиме течения несжимаемой жидкости, свойственным теплонапряженным конструкциям ЖРД, отношение потерь давления составляет

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{N_2^3}{N_1^3}.$$

Для расчета потерь давления при течении сжимаемой жидкости можно воспользоваться уравнением состояния идеального газа. Тогда для ламинарного режима отношение потерь давления

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{2cp} T_1 N_2^2}{P_{1cp} T_2 N_1^2},$$

для турбулентного режима

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{N_2^3 P_{2cp} T_1}{N_1^3 P_{1cp} T_2},$$

где вычисление среднего давления жидкости P_{cp} в ПМ проводится одним из итерационных методов.

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

При турбулентном режиме течения теплоносителя через ПМ, характерном для современных систем тепловой защиты и рекуперативных теплообменных аппаратов, модифицированное уравнение Дарси принимает вид

$$\frac{\Delta P}{l} = \beta \rho w^2.$$

Выигрыш в скорости движения теплоносителя с МКТТ по сравнению с продольно-канальным (п-к) движением при одинаковых значениях ΔP , β , ρ составляет

$$\frac{W_{МКТТ}}{W_{п-к}} = \left(\frac{L}{l} \right)^{0,5},$$

где L — продольный размер теплообменного тракта; l — путь фильтрации теплоносителя через ПМ.

Теплообменный тракт с МКТТ особенно эффективен при большой протяженности тракта ($L \gg l$) и турбулентном режиме движения, т. е. в области, где применение кольцевого тракта с пористым наполнителем становится малоэффективным. Увеличение безразмерного коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме и одинаковых числах Re составит

$$\frac{Nu_{МКТТ}}{Nu_{п-к}} = \left(\frac{L}{l} \right)^{0,4}.$$

Важным преимуществом тракта с МКТТ является то, что площадь его проходного сечения возрастает не в результате увеличения

поперечных размеров тракта, а вследствие большого числа подводящих и отводящих каналов (N). Площадь проходного сечения тракта с МКТТ равна $F_{пр} = NL\delta$. Увеличить интенсификацию теплоотдачи в тракте с пористым наполнителем можно также, применяя более теплопроводный пористый материал, не увеличивая при этом скорость фильтрации теплоносителя.

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

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

Этими свойствами обладают пористые сетчатые металлы, изготовленные методом диффузионной сварки сеток в вакууме, что доказано многолетней эксплуатацией американских кислородо-водородных двигателей SSME и RL-10.

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы охлаждения камеры ЖРД с МКТТ.

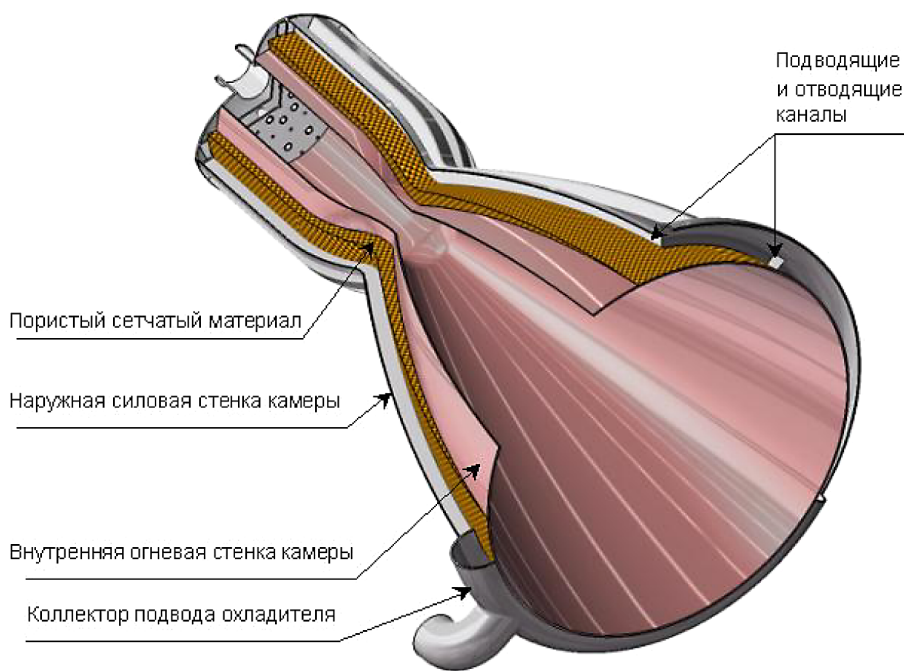


Рис. 1. Схема системы охлаждения камеры ЖРД с МКТТ

Организовать межканальную транспирацию теплоносителя через ПМ можно следующим образом (рис. 2). Теплоноситель из подводящего коллектора 1 попадает в подводящие каналы 5, выполненные в наружной силовой оболочке 2, заполняет их и под действием перепада давления движется через ПМ 7, охлаждая огневую стенку камеры 4, в два соседних отводящих канала 6. Подводящие и отводящие каналы, выполненные в наружной силовой оболочке, чередуются и расположены симметрично относительно друг друга. Торцы каналов непроницаемы. Из отводящих каналов теплоноситель поступает в отводящий коллектор 3, а применительно к камере ЖРД — в форсуночную головку. Изменяя число каналов N , можно добиться требуемых скоростей фильтрации теплоносителя через ПМ и, следовательно, необходимых потерь давления, не увеличивая толщину δ пористой вставки.

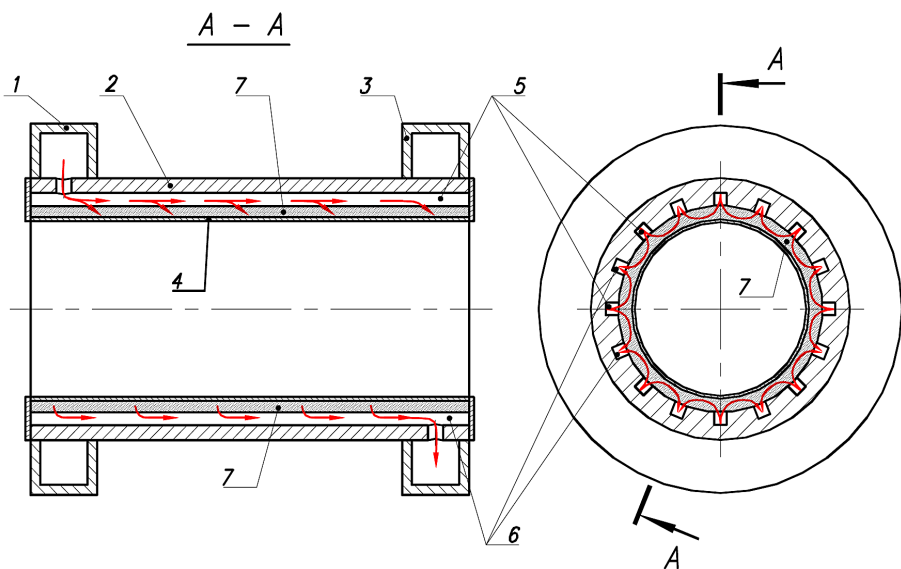


Рис. 2. Схема течения теплоносителя в тракте с МКТТ

Гидравлическое сопротивление пористых сетчатых материалов (ПСМ) при одномерной и двумерной фильтрации теплоносителя. В работе представлены результаты экспериментального исследования по определению коэффициентов гидравлического сопротивления ПСМ при одномерной и двумерной фильтрации теплоносителя. Пористый сетчатый материал характеризуется стабильными гидравлическими параметрами.

При исследовании гидравлического сопротивления ПСМ определялись вязкостный α и инерционный β коэффициенты пористой среды (по методу Ю.В. Ильина). Используя эти коэффициенты, входящие в модифицированное уравнение Дарси, можно с большой точно-

стью определять потери давления в пористом наполнителе. Для сравнения эффективности пористых теплообменных трактов между собой и с трактами без ПМ определялись также коэффициенты гидравлического сопротивления в зависимости от числа Re , пористости (Π), типа сетки: $\xi_d = f(Re_d, \Pi, \text{тип сетки})$. За линейный размер принимался эквивалентный гидравлический диаметр кольцевого канала, не заполненного ПМ: $d_{\text{эkv}} = 2\delta$.

Анализируя результаты гидравлического сопротивления ПСМ при одномерной фильтрации теплоносителя, можно отметить, что ПСМ, изготовленные из тканых фильтровых сеток, являются анизотропными материалами. Например, для ПСМ из сетки П60 с пористостью $\Pi = 0,48$ отношение вязкостных $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}$ и инерционных $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel}$ коэффициентов ПСМ при фильтрации теплоносителя ортогонально к плоскости сварки сеток (\perp) и при межсеточной фильтрации (\parallel) составило $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel} = 2,7$ и $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel} = 2,4$.

Пористые сетчатые материалы из сетки с квадратной ячейкой практически изотропны из-за способа плетения проволок и хаотической укладки сетки в пакетах. Несмотря на высокую пористость, ПСМ из сетки с квадратной ячейкой и диаметром проволоки 0,1 мм имеет более высокие коэффициенты сопротивления, чем ПСМ из фильтровой сетки П24 или П60. Это объясняется высокоразвитой внутренней структурой ПСМ. Гидравлическое сопротивление ПСМ из сетки с квадратной ячейкой нестабильно из-за возможного сдвига проволок в сетке и ее произвольной укладки.

Установлено, что гидравлическое сопротивление ПСМ зависит не только от пористости, но и от типа сетки. Так, при одинаковой пористости ($\Pi \approx 0,3$) гидравлическое сопротивление ПСМ из крупнопористой сетки П60 меньше, чем из мелкопористой сетки С120:

$$\frac{\alpha_{\text{С120}}}{\alpha_{\text{П60}}} = 3,9; \quad \frac{\beta_{\text{С120}}}{\beta_{\text{П60}}} = 2,3.$$

Пористые сетчатые материалы из сетки С120 имеют более сложную внутреннюю структуру с высокоразвитой поверхностью. При использовании ПСМ из еще более мелкопористой сетки С600/2200 наблюдается дальнейшее увеличение гидравлического сопротивления:

$$\frac{\alpha_{\text{С600}}}{\alpha_{\text{П60}}} = 7; \quad \frac{\beta_{\text{С600}}}{\beta_{\text{П60}}} = 92.$$

Вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления ПСМ из сетки П60 с восстановленной проницаемостью после механической обработки при межсеточной фильтрации теплоносителя можно определить зависимостями

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

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

где $\Pi = 0,291 \dots 0,476$.

Исследовалось также гидравлическое сопротивление медного высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) как возможного материала для пористого теплообменного тракта с МКТТ. Несмотря на высокую пористость ($\Pi = 0,75$) и большой средний диаметр пор ($d_{\text{ср}} \approx 1,5$ мм) у ВПЯМ, коэффициенты сопротивления α и β у него больше, чем у ПСМ, что можно объяснить высокой шероховатостью внутренней поверхности, извилистостью поровых каналов и нерегулярностью структуры ($\alpha = 2,27 \cdot 10^9$; $\beta = 1,95 \cdot 10^5$).

При двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя наблюдается увеличение коэффициентов гидравлического сопротивления ПСМ по сравнению с указанными коэффициентами при одномерной фильтрации теплоносителя.

Это объясняется неоднородностью массовой скорости теплоносителя по высоте δ пористого наполнителя. В ПСМ с малой пористостью и малым отношением l/δ (l — расстояние между каналами в пористом тракте с МКТТ) большая часть расхода теплоносителя движется у наружной оболочки, фактическая площадь проходного сечения тракта уменьшается, что приводит к увеличению перепада давления и увеличению коэффициентов сопротивления α и β ПСМ. С ростом отношения l/δ сопротивление уменьшается и приближается к сопротивлению ПСМ при одномерном движении. К потерям давления в ПСМ добавляются потери давления при течении теплоносителя в подводящих и отводящих каналах, складывающиеся из потерь на трение теплоносителя о стенки каналов и гидродинамических потерь при подводе и отводе теплоносителя через проницаемую поверхность канала.

При двумерном течении теплоносителя в тракте с МКТТ подтверждена тенденция уменьшения коэффициентов гидравлического сопротивления ПСМ с уменьшением числа основных и поперечных нитей в сетке и с увеличением пористости ПСМ (рис. 3 и 4).

Из-за двумерности течения теплоносителя в трактах с МКТТ коэффициенты сопротивления ПСМ зависят и от толщины δ пористой вставки (см. рис. 3 и 4). Например, у ПСМ из сетки П60 ($\Pi = 0,37$) с увеличением δ от 3 мм до 5,6 мм и у ПСМ с пористостью 0,48 при $\delta = 2 \dots 3$ мм наблюдается увеличение коэффициентов сопротивления. Для ВПЯМ также наблюдается рост коэффициентов сопротивления с уменьшением отношения l/δ .

Теплообмен при двумерном течении теплоносителя в ПСМ. В этом случае отмечено уменьшение теплоотдачи по сравнению с теплоотдачей при одномерном течении теплоносителя через ПМ [2].

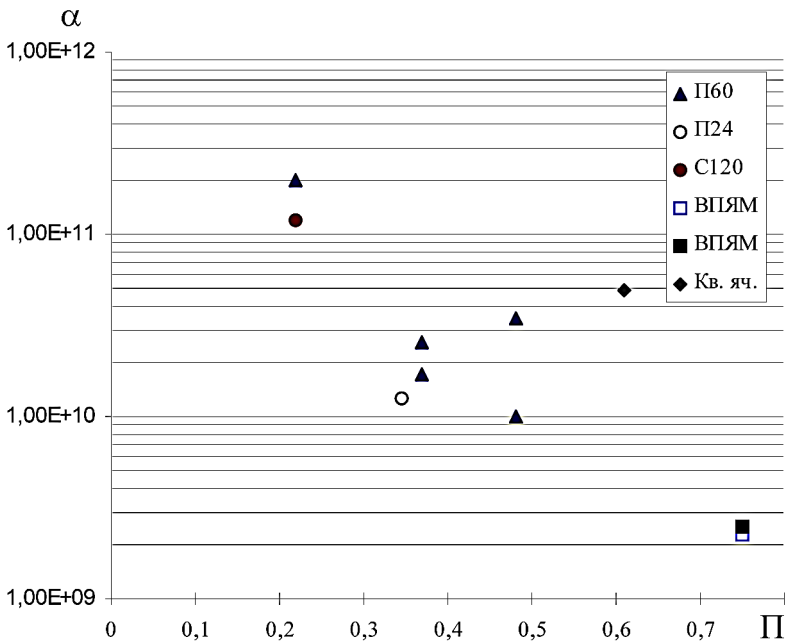


Рис. 3. Вязкостные коэффициенты сопротивления ПСМ при двумерной фильтрации теплоносителя

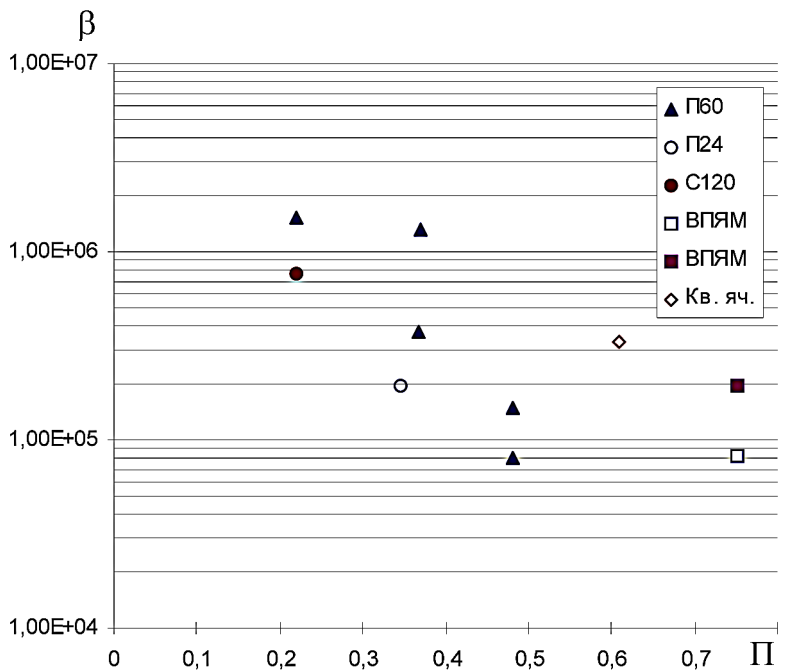


Рис. 4. Инерционные коэффициенты сопротивления ПСМ при двумерной фильтрации теплоносителя

Это объясняется значительно большим гидравлическим сопротивлением для ПСМ при одномерном движении теплоносителя, чем при межсеточном движении теплоносителя в случае МКТТ. Уменьшение скорости фильтрации теплоносителя в ПМ у теплоотдающей поверхности, наличие в ПМ зон с малыми скоростями фильтрации, расположенных напротив подводящих и отводящих каналов у теплоотдающей поверхности, также уменьшают теплообмен в пористом тракте с МКТТ по сравнению с кольцевым трактом, заполненным ПСМ.

В исследованном диапазоне чисел Re не обнаружено заметного влияния пористости и типа сетки на теплоотдачу в тракте с МКТТ. Наблюдается незначительное увеличение теплоотдачи с увеличением пористости ПСМ. Это можно объяснить тем, что с увеличением пористости ПСМ уменьшается гидродинамическая неравномерность течения теплоносителя по высоте пористого наполнителя и у горячей охлаждаемой поверхности реализуется больший расход теплоносителя, что увеличивает теплоотдачу в тракте с МКТТ. Кроме того, с увеличением пористости ПСМ увеличивается поверхность теплообмена в ПСМ вследствие уменьшения пятен контакта между соседними сетками, следовательно, растет внутриворонная теплоотдача. Но при увеличении пористости уменьшается теплопроводность ПСМ, что приводит к уменьшению теплоотдачи в тракте. В результате суперпозиции этих противоречащих факторов теплоотдача с увеличением пористости не уменьшается, как в кольцевом канале, заполненном ПСМ, что положительно влияет на эффективность теплообмена в тракте с МКТТ.

Установлено, что с уменьшением относительного пути l/δ движения теплоносителя через ПСМ теплоотдача увеличивается (рис. 5), что характерно и для каналов, не заполненных ПМ. Уменьшение относительного пути движения l/δ от 11,3 до 2,8 увеличило теплоотдачу примерно в 2,4 раза при прочих равных условиях.

Увеличение теплоотдачи с уменьшением отношения l/δ учитывается введением поправочного коэффициента ϵ_l , который вычисляется по формуле

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

справедливой в диапазоне толщин пористого наполнителя $\delta = 2,0...5,6$ мм и расстояний между каналами $l = 7,97...33,77$ мм.

Исследовано влияние коэффициентов теплопроводности ПСМ и теплоносителя на теплоотдачу в тракте, заполненном ПМ. С увеличением коэффициента теплопроводности материала проволоки сетки ПСМ теплоотдача повышается. Так, в результате замены нержавеющей сетки П60 никелевой сеткой С600/2200 теплоотдача в тракте с МКТТ увеличилась на 20 %. Применение медной сетки с квадратной

ячейкой 0,7 позволяет еще больше повысить теплоотдачу (рис. 6). Увеличение теплоотдачи будет более интенсивным, если замена материала не сопровождается изменением структуры ПСМ, так как в результате увеличения гидравлического сопротивления увеличивается неравномерность расхода теплоносителя по толщине ПСМ, что уменьшает теплоотдачу в тракте с МКТТ.

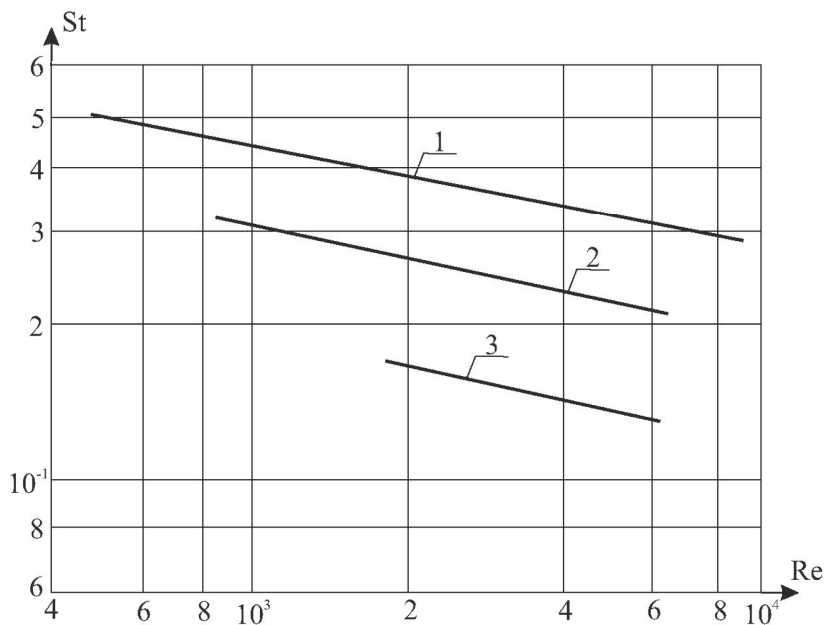


Рис. 5. Влияние относительного пути l/δ движения теплоносителя на теплообмен при двумерном течении сквозь ПСМ из коррозионно-стойкой сетки с пористостью 0,48:

1 — $l/\delta = 2,8$; 2 — $l/\delta = 4,3$; 3 — $l/\delta = 11,3$

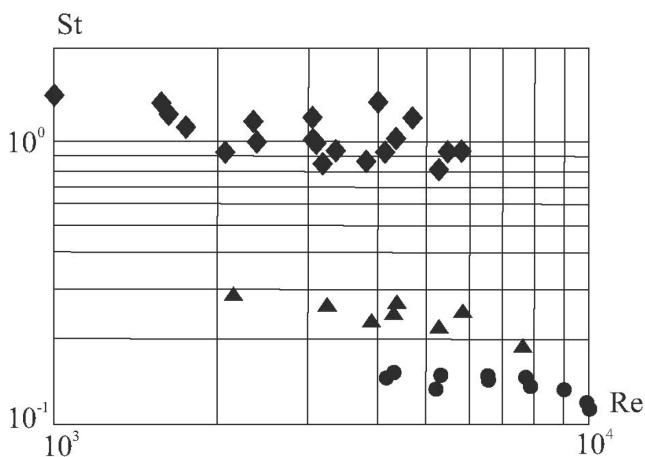


Рис. 6. Теплообмен в медных ПМ:

◆ — медный ПСМ (кв. яч. 0,7; $\Pi = 0,61$; $l/\delta = 0,93$); ● — медный ВПЯМ ($\Pi = 0,751$; $l/\delta = 6,7$); ▲ — медный ВПЯМ ($\Pi = 0,751$; $l/\delta = 3,2$)

Использование медного ВПЯМ в трактах с МКТТ не дало ожидаемого высокого результата — теплоотдача оказалась невысокой (см. рис. 6). Это связано с низким коэффициентом теплопроводности ВПЯМ. Подтвердилось влияние отношения l/δ на теплоотдачу в трактах с МКТТ, заполненных ВПЯМ.

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

теплопроводности коррозионно-стойкой стали 12X18H10T.

Обобщающее критериальное уравнение поверхностной теплоотдачи в тракте с МКТТ в диапазоне изменения чисел $Re = (20...2) \cdot 10^4$, чисел $Pr = 0,7...7,0$, пористости ПСМ $\Pi = 0,2...0,61$, относительного пути движения теплоносителя $l/\delta = 1,4...11,3$ имеет вид

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

Увеличение теплообмена в трактах с МКТТ по сравнению с теплообменом в канале без пористого наполнителя достигает 60 раз для ПСМ из коррозионно-стойких стальных сеток и еще выше для медного ПСМ.

Установлено, что значения коэффициента теплоотдачи α для тракта с МКТТ значительно выше, чем для оребренных трактов, даже при меньших числах Re (рис. 7) и, следовательно, при меньших гид-

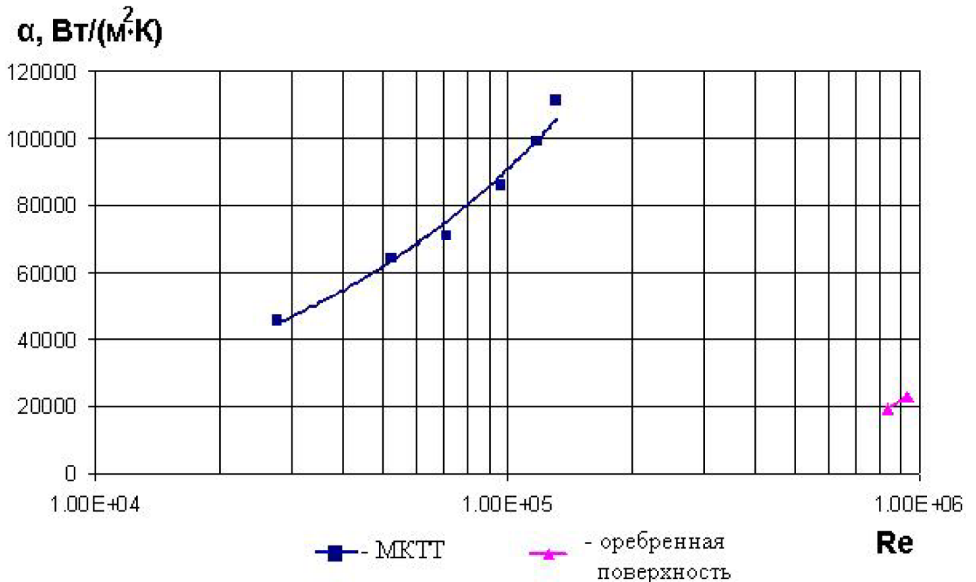


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re

равлических потерях. Высокие значения α подтверждаются данными работы [4]. На рис. 7 представлены значения коэффициента теплоотдачи α для тракта с МКТТ и оребренного тракта от числа Re (теплоноситель — керосин).

На рис. 8 показаны зависимости эффективности теплообмена в виде $\left(\frac{St}{St_{г\text{л}}}\right)^3 \left(\frac{\xi_{г\text{л}}}{\xi}\right)$ от числа Re для различных значений пористости ПСМ тракта с МКТТ, теплопроводности материала сеток (коррозионно-стойкой, медной сетки) и отношения $l/\delta = 1,42...2,80$.

Эффективность пористого тракта с МКТТ возрастает с увеличением пористости ПСМ, коэффициента теплопроводности ПСМ, числа Re, с уменьшением относительного пути движения теплоносителя. Как видно на рис. 8, при пористости ПСМ из тканой коррозионно-стойкой сетки П60 0,22 (линия 6) тракт с МКТТ менее эффективен, чем гладкий канал. Зато его эффективность резко возрастает при увеличении пористости (линии 4–6). Эффективность тракта при турбулентном режиме течения с пористостью ПСМ $\Pi = 0,48$ из коррозион-

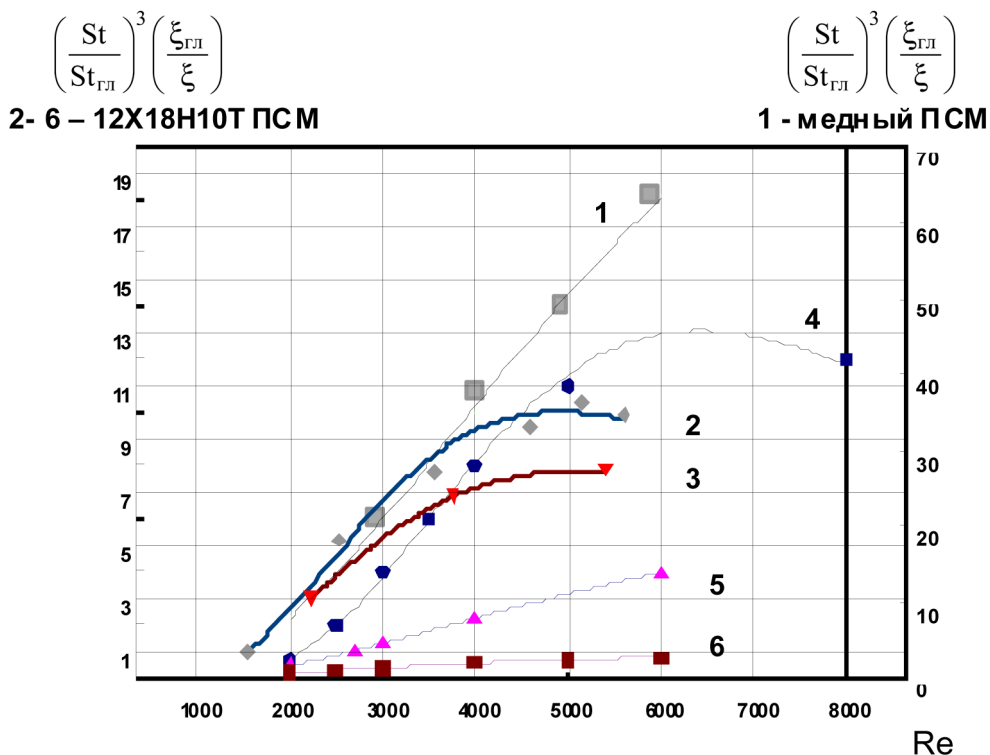


Рис. 8. Эффективность пористого тракта с МКТТ:

1 — медный ПСМ ($\Pi = 0,61$); 2 — ПСМ из сетки П24 ($l/\delta = 1,56$; $\Pi = 0,345$); 3 — ПСМ из сетки П60 ($l/\delta = 1,42$; $\Pi = 0,368$); 4–6 — ПСМ из сетки П60 ($l/\delta = 2,8$; $\Pi = 0,48$; $0,37$; $0,22$ соответственно)

но-стойкой сетки П60 и отношением $l/\delta = 2,8$ достигает одиннадцатикратного увеличения по сравнению с кольцевым трактом, не заполненным ПМ. Эффективность тракта с медным ПСМ достигает семидесятикратного увеличения.

Выводы.

1. Разработан новый метод охлаждения ЖРД с использованием принципа межканальной транспирации теплоносителя сквозь пористый сетчатый материал, позволяющий уменьшить температуру огневой стенки при заданных потерях давления и тем самым повысить надежность работы двигателя.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость перехода от одномерного к двумерному движению теплоносителя через пористый металл с точки зрения повышения эффективности теплообмена.

3. Экспериментально исследовано гидравлическое сопротивление пористых сетчатых материалов, полученных методом диффузионной сварки металлических тканых сеток в вакууме, при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Установлены анизотропия гидравлических свойств пористых сетчатых материалов, а также влияние механической обработки на проницаемость пористых сетчатых материалов.

4. Экспериментально исследован теплообмен в пористых сетчатых материалах при двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя.

5. Экспериментально доказана высокая эффективность теплообмена в пористых трактах с межканальной транспирацией теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. *Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1988, 168 с.
- [2] Поляев В.М., Морозова Л.Л., Харьбин Э.В. и др. Интенсификация теплообмена в кольцевом канале. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1976, № 2, с. 86–89.
- [3] Белов С.В. *Пористые металлы в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1981, 248 с.
- [4] Харитонов В.В. *Теплофизика лазерных зеркал*. Москва, МИФИ, 1993, 152 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ф.В. Пелевин, Н.И. Авраамов, С.А. Орлин, А.Л. Синцов. Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/698.html>

Пелевин Федор Викторович родился в 1958 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г.; д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; специалист в области гидравлики и теплообмена в структурно-сложных средах. e-mail: zaytseva@power.bmstu.ru

Авраамов Николай Иванович родился в 1947 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971; заместитель заведующего отделом ЭМ1.1 НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук; специалист в области гидравлики и теплообмена в структурно-сложных средах. e-mail: zaytseva@power.bmstu.ru

Орлин Сергей Андреевич родился в 1937 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г.; канд. техн. наук, работал в РКК «Энергия» в области создания космических двигателей; в настоящее время доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — изучение различных способов повышения удельного импульса жидкостных ракетных двигателей. e-mail: zaytseva@power.bmstu.ru

Синцов Александр Леонидович родился в 1947 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г., канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; специалист в области гидравлики и теплообмена в структурно-сложных средах. e-mail: zaytseva@power.bmstu.ru