

Рекуперативный теплообменный аппарат для наддува топливных баков жидкостного ракетного двигателя

10, октябрь 2014

Пелевин Ф. В., Авраамов Н. И., Семенов П. Ю.

УДК: 536.24: 621.45

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

pelfv@rambler.ru

Введение

Рекуперативный теплообменный аппарат (РТА), входящий в состав жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), служит для испарения и нагрева жидкого азота; нагрева гелия, которые затем используются для наддува баков ракеты-носителя. Наддув баков проводится для поддержания безкавитационного режима насосов ЖРД.

В настоящее время используются кожухотрубчатые РТА [1], цилиндрические РТА с компланарными каналами [2], пластинчато-ребристые РТА [3].

Кожухотрубчатый РТА применяется в двигателях РД-107, РД-108 и др., работающих по схеме без дожигания газогенераторного газа. Работоспособность и надежность кожухотрубчатого РТА доказана его многолетней эксплуатацией. Но кожухотрубчатый РТА малокомпактен из-за невысоких коэффициентов теплоотдачи в трактах горячего и холодного теплоносителей, работает при низких давлениях в трактах теплоносителей, плохо работает при высоких динамических вибронагрузках.

Цилиндрический РТА с компланарными каналами (применяется в двигателях с дожиганием газогенераторного газа РД-171, РД-170, РД-180) имеет меньшие габариты при высоких давлениях, выдерживает высокие динамические вибронагрузки. Основными недостатками этого типа РТА являются наличие большого объема в центральной зоне, который увеличивает габариты и массу аппарата, и сложная технология изготовления.

Пластинчато-ребристый РТА высококомпактен, надежен, но требует высокого качества пайки (планируется для установки на двигатели РД-180, РД-191).

Создание новых высококомпактных, технологичных, работоспособных при высоких давлениях и вибронагрузках теплообменных аппаратов во многом зависит от эффективности теплообмена.

Оребренный теплообменный тракт обеспечивает интенсификацию теплообмена по сравнению с гладким каналом $Nu/Nu_{г\lambda}$ в 1.5–3 раза. Причем эффективность оребренного

тракта уменьшается с ростом числа Рейнольдса Re . Применение искусственной шероховатости в теплообменных трактах при высоких числах Re ($Re \geq 10^4$) также не дает высокого эффекта. Степень интенсификации теплообмена $Nu/Nu_{гл}$ для преград различной формы достигает 1.3–1.7 раз, но при этом повышается относительная величина коэффициента гидравлического сопротивления $\xi/\xi_{гл}$ различных преград при вариации числа Рейнольдса Re от 20 до 100 раз. Поэтому теплогидравлическая эффективность трактов с искусственной шероховатостью $E=Nu/Nu_{гл}/(\xi/\xi_{гл})^{1/3}$ составляет 0.25–1.1 раза [4]. Причем наибольшее значение теплогидравлической эффективности E достигается в области низких значений чисел Рейнольдса $Re \approx 10^3$ – 10^4 , что для теплообменников для наддува баков нехарактерно.

В теплообменных трактах с компланарными каналами интенсификация теплообмена достигает 1.5–3 раз по сравнению с оребренными каналами, но их эффективность также снижается с ростом числа Re [2,5].

Возникает необходимость перехода к новым конструкциям и технологиям изготовления теплообменных трактов, обеспечивающих высокую компактность и эффективность теплообмена.

Цель работы – разработка нового рекуперативного теплообменного аппарата для наддува топливных баков ЖРД с использованием пористых сетчатых металлов (ПСМО и принципа межканальной транспирации теплоносителя (МКТТ) сквозь ПСМ.

Один из перспективных и эффективных методов интенсификации теплообмена заключается в использовании пористых металлов (ПМ) в теплообменных устройствах. Но хотя заполнение теплообменного тракта пористым высокотеплопроводным металлом с малым термическим сопротивлением между стенкой и пористым металлом максимально интенсифицирует теплообмен [6], наблюдается резкое увеличение гидравлического сопротивления, что сдерживает применение этого метода в РТА жидкостных ракетных двигателей. Для уменьшения потерь давления приходится идти на уменьшение скорости движения теплоносителя в ПМ за счет увеличения проходного сечения тракта, что приводит к снижению интенсификации теплообмена и повышению массы и габаритов тракта.

Уменьшить потери давления в пористом теплообменном тракте, не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта, можно, если перейти от общеизвестного продольно-канального к продольно-поперечному (межканальному) движению теплоносителя сквозь ПМ, изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток. Будем называть этот способ движения теплоносителя – межканальная транспирация теплоносителя сквозь пористый металл.

Научная новизна работы заключается в определении теплогидравлической эффективности пористого теплообменного тракта с МКТТ в составе рекуперативного теплообменного аппарата.

Результаты исследований

Принцип межканальной транспирации теплоносителя в сочетании с межсеточной фильтрацией теплоносителя [6] впервые позволяет создать высокоэффективный пористый

теплообменный тракт с большей эффективностью теплообмена, чем у лучших оребренных трактов. Физическую основу этого способа составляет чрезвычайно высокая интенсивность теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их соприкосновения.

Тракт с межканальной транспирацией теплоносителя сочетает в себе высокую теплоотдачу, свойственную высокотеплопроводным ПМ, и низкие гидравлические потери [6].

На рис. 1 представлена принципиальная схема теплообменного аппарата для наддува топливных баков с МКТТ.

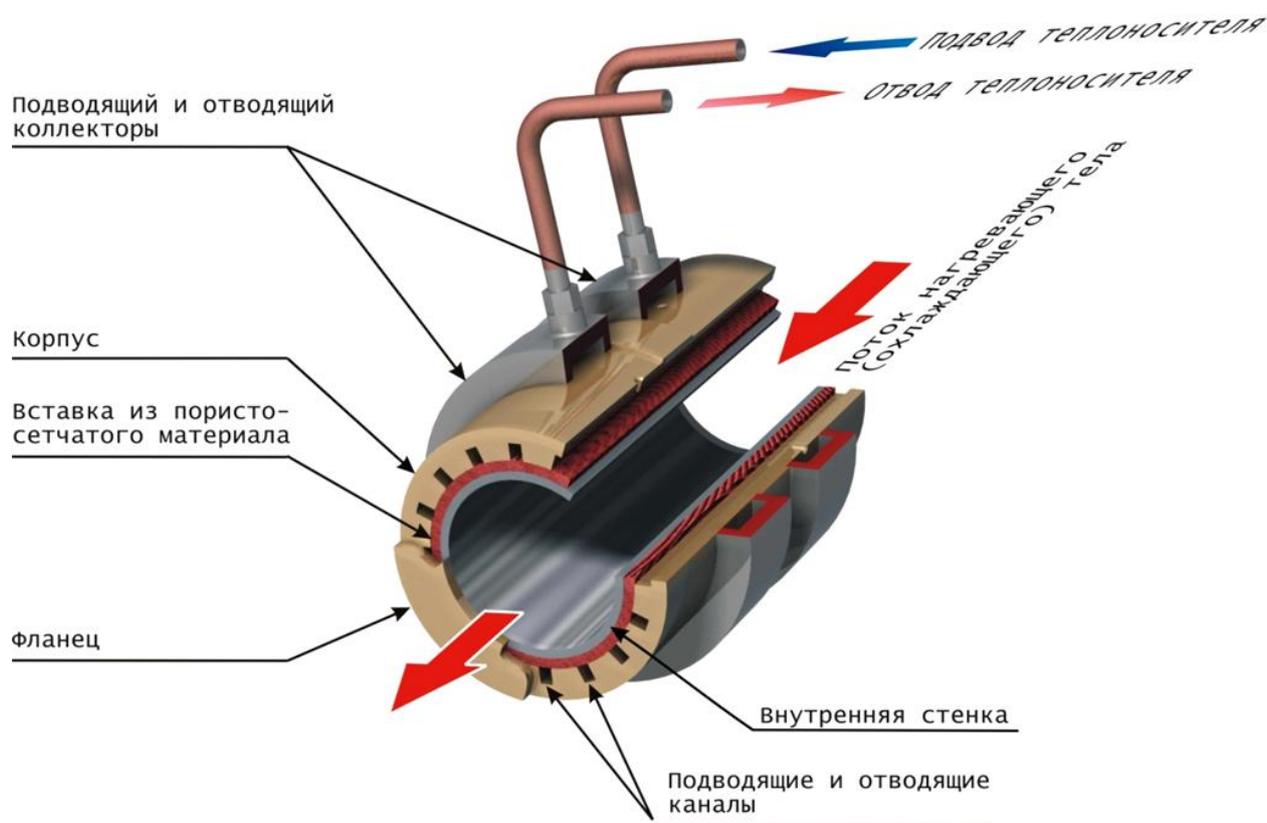


Рис. 1. Рекуперативный теплообменный аппарат с МКТТ для наддува топливных баков жидкостного ракетного двигателя

Организовать межканальную транспирацию теплоносителя сквозь 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 сквозь ПМ (7), нагреваясь от горячего ПМ, в соседние два отводящие (6) канала. Внутренняя стенка (4) непроницаема для теплоносителей. Подводящие и отводящие каналы, выполненные в наружной силовой оболочке, чередуются и симметрично расположены относительно друг друга. Торцы каналов непрони-

цаемые. Из отводящих каналов теплоноситель поступает в отводящий коллектор (3). Изменяя число каналов N , можно добиться требуемых скоростей фильтрации теплоносителя через ПМ и, следовательно, необходимых потерь давления не увеличивая толщину пористой вставки δ .

Рассмотрены два варианта конструктивного выполнения теплообменного тракта с МКТТ. В первом варианте подводящие (5) и отводящие (6) каналы выполняют в наружной оболочке (2) тракта (рис. 2). Во втором варианте каналы выполняются в пористом металле, но при этом боковые поверхности каналов непроницаемы для теплоносителя.

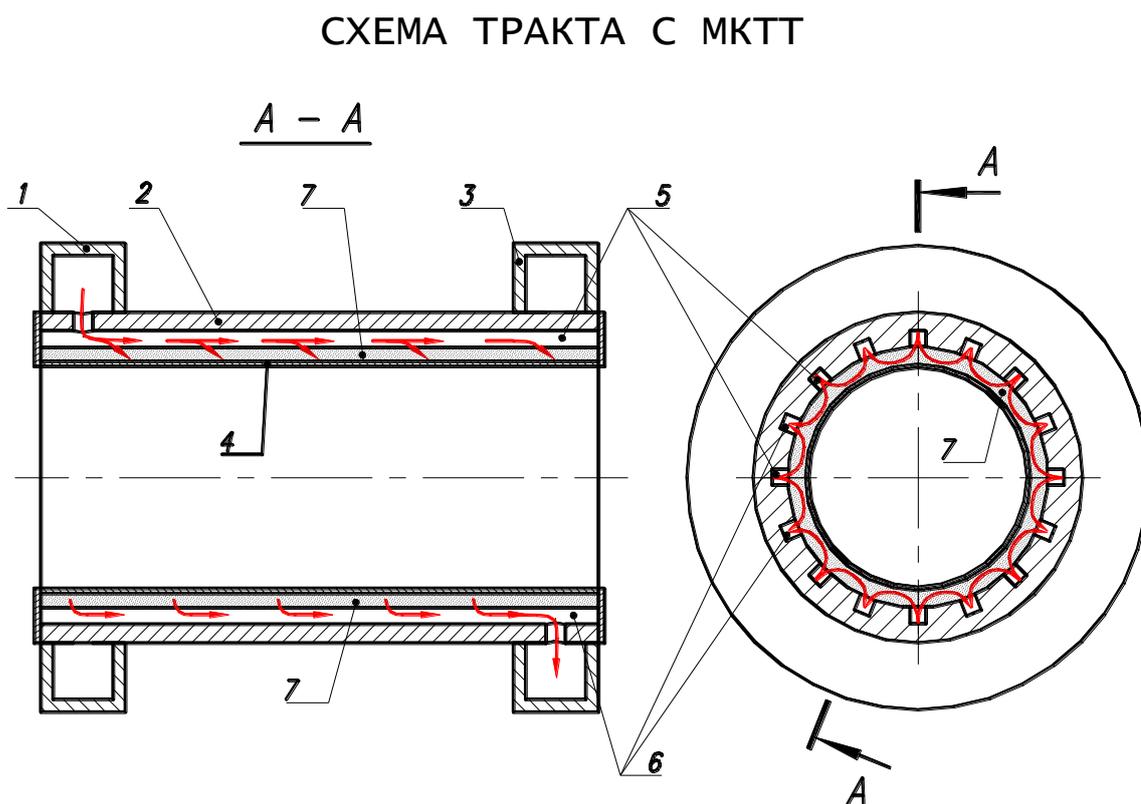


Рис. 2. Схема движения теплоносителя в тракте с МКТТ сквозь ПМ

Применение диффузионно-вакуумной технологии изготовления ПМ из тканых металлических сеток (ПСМ) (рис. 3) для теплообменных аппаратов является основой для создания новых компактных высокоэффективных пористых теплообменных трактов. ПСМ обладает стабильными гидравлическими параметрами, что доказано многолетней эксплуатацией американских кислородо-водородных жидкостных ракетных двигателей SSME и RL-10.

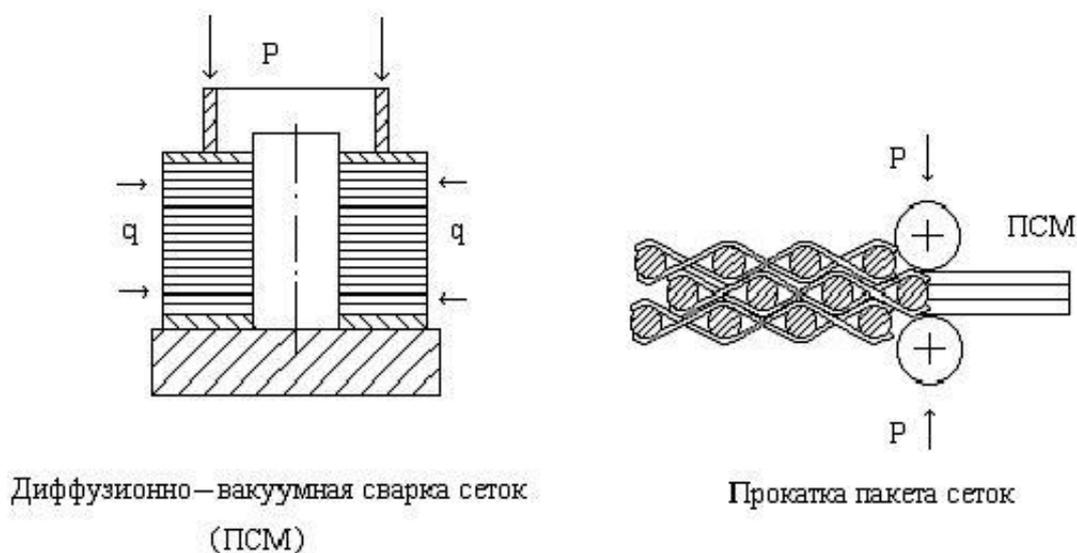


Рис.3 Технологии изготовления PCM

PCM высокотехнологичны, поддаются любым видам обработки, просты в изготовлении [7].

Эффективность теплообмена

Как известно, для каждой конкретной технической задачи при определении конструктивной схемы теплообменного устройства возникает проблема выбора оптимальной конструкции теплообменной поверхности.

Под оптимальной поверхностью будем понимать такую конструкцию теплоотдающей поверхности, которая при прочих равных условиях соответствует максимальной интенсификации теплообмена при минимальных затратах энергии на прокачку теплоносителя.

Развитие поверхности теплообмена в единице объема, как известно, максимально в PCM, а организация межканальной транспирации теплоносителя [6] сквозь PCM позволяет получить гидравлические потери в допустимых пределах без увеличения массы и габаритов теплообменного тракта при высоких коэффициентах теплоотдачи, свойственных пористым теплообменным трактам.

Существуют различные зависимости для определения эффективности теплообмена и сравнения эффективности различных теплообменных поверхностей. Например, в работе [8] предлагается зависимость для площади теплообменной поверхности (F), приходящейся на единицу тепловой мощности (Q):

$$F/Q \approx (\xi/St^3)^{0,5}.$$

Тогда минимум площади теплообмена при прочих равных условиях соответствует минимуму комплекса $(\xi/St^3)^{0,5}$ в зависимости от числа Рейнольдса. Этот комплекс может служить критерием эффективности теплообмена. Комплекс $(\xi/St^3)^{0,5}$ предполагает целесообразность использования при создании высокоэффективных компактных теплообменных устройств теплообменных трактов с большим коэффициентом гидравлического сопротивления ξ . По термогидродинамической аналогии Рейнольдса увеличение коэффициента гидравлического сопротивления так же приводит к увеличению теплоотдачи:

$$St = (\xi / 8) Re.$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления в ПСМ на несколько порядков больше, чем в технически гладкой трубе. Следовательно, следует ожидать и высокую теплоотдачу в канале, заполненном высокотеплопроводным пористым металлом, имеющим малое термическое сопротивление со стенкой канала. Этот вывод многократно подтвержден экспериментально [6,8].

Чем выше теплопроводность ПСМ в направлении теплового потока, и чем меньше коэффициент теплопроводности теплоносителя, тем интенсивнее идет теплообмен в пористом тракте, так как передача теплоты от теплоотдающей поверхности в теплоноситель в основном идет по высокотеплопроводному пористому каркасу.

Пористые сетчатые металлы с высокоразвитой поверхностью теплообмена и соответственно высокими коэффициентами гидравлического сопротивления ($\xi = 10^2-10^4$) как нельзя лучше подходят под это утверждение. Так, в тракте с межканальной транспирацией теплоносителя и пористым медным сетчатым металлом при $Re = 1 \cdot 10^4$ интенсификация теплообмена достигает 177 раз, при использовании сетки из хромоникелевой стали – 76 раз (теплоноситель - воздух).

Кроме того, в ПСМ можно практически реализовать движение теплоносителя в каналах с эквивалентным диаметром около $1 \cdot 10^{-4}$ м, что для других теплообменных трактов невозможно. Уменьшение эквивалентного диаметра канала приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи $\alpha \approx 1/d_{\text{экр}}^{0,2}$ и уменьшению числа Рейнольдса (соответственно, потеря давления). Так уменьшение эквивалентного диаметра канала с $(1,-1,6) \cdot 10^{-3}$ м, что характерно для орбренных фрезерованных каналов, до $1 \cdot 10^{-4}$ м в пористых сетчатых металлах увеличивает теплоотдачу в 1.7 раза при прочих равных условиях.

На рис. 4 представлены зависимости эффективности теплообмена для различных теплообменных поверхностей от числа Re (данные работы [8]) и экспериментальные данные по эффективности теплообмена в пористых трактах с межканальной транспирацией теплоносителя, и цилиндрических трактах с компланарными каналами. Для всех рассмотренных поверхностей теплообмена минимум отношения площади теплоотдающей поверхности к снимаемой тепловой мощности соответствует минимально допустимому числу Рейнольдса. Для теплообменных трактов, заполненных пористым сетчатым металлом, с высоким коэффициентом гидравлического сопротивления по сравнению с пустым каналом этот режим движения теплоносителя (ламинарный, переходный) с малыми скоростями

ми является наиболее благоприятным, так как позволяет достигать высокой теплоотдачи при малых гидравлических потерях.

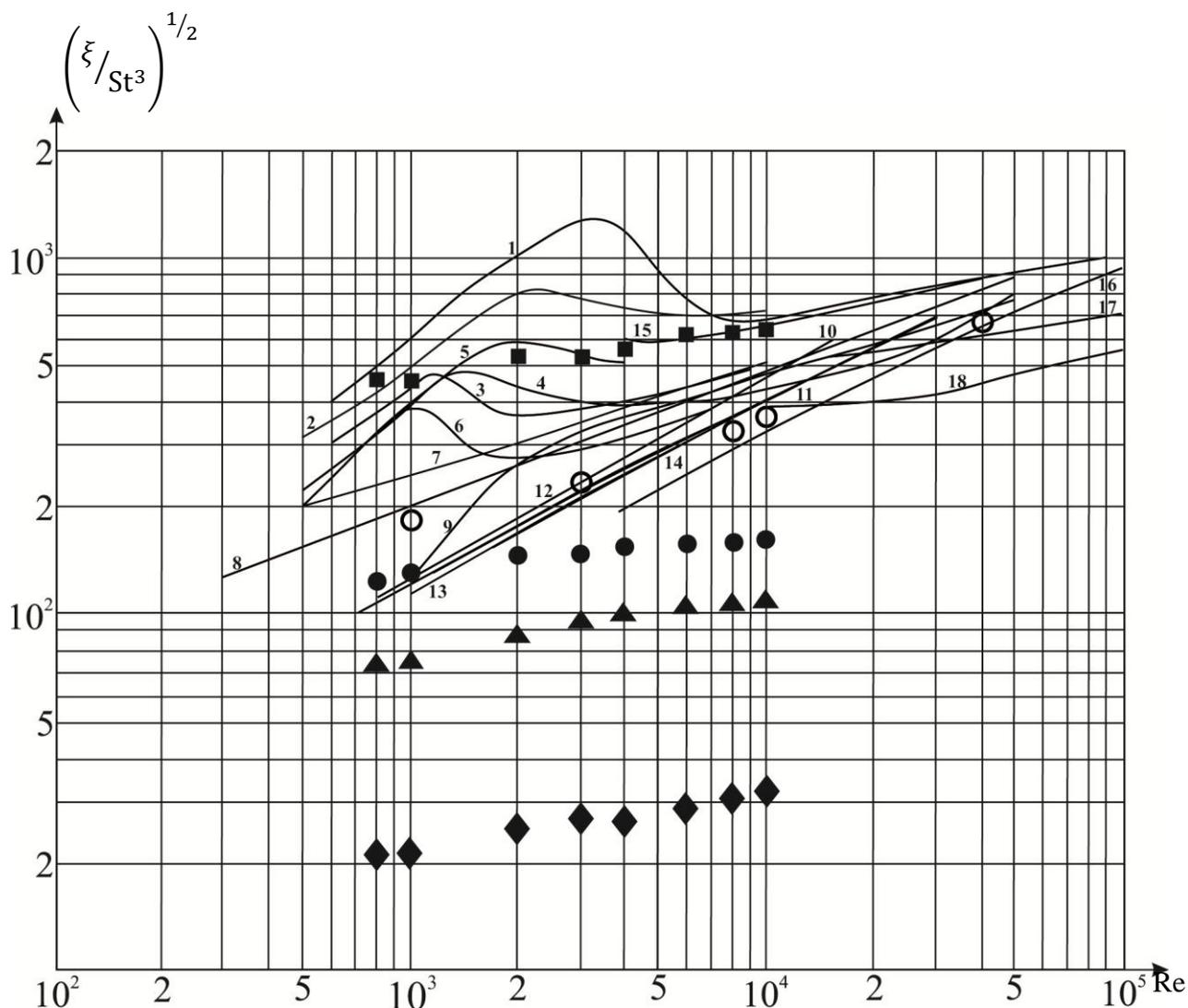


Рис. 4. Зависимость теплогидравлической эффективности от числа Re для различных поверхностей теплообмена (теплоноситель – воздух):

1 – круглая труба; 2 – плоский канал; 3 – пережатый канал; 4 – пучок плоских пережатых труб; 5 – шахматный пучок плоских труб; 6 – коридорный пучок круглых труб; 7 – гофрированная перфорированная насадка, создающая совместно с основными пластинами систему прямоугольных зигзагообразных каналов постоянного сечения; 8 – шаровая насадочная поверхность с беспорядочным расположением шаров и пористостью 0,37 – 0,39; 9 – трубы с кольцевыми вставками; 10, 11 – шахматный пучок труб с поперечным обтеканием; 12 – шахматным расположением решёток, 13 – коридорное расположение решёток, 14 – произвольное расположение решёток при пористости 0,5; 15 – пластинчато-ребристая поверхность с гладкими рёбрами; 16 – коридорное расположение соседних решёток при пористости 0,83; 17, 18 – трубы с кольцевыми диафрагмами. Пористый теплообменный тракт с МКТТ: ● – 12X18H10T ПСМ П60, $\Pi=0,48$, $l/\delta = 2,8$; ■ – 12X18H10T ПСМ П60 $\Pi=0,48$, $l/\delta = 11,3$; ▲ – 12X18H10T ПСМ П60 $\Pi=0,368$, $l/\delta = 1,42$; ◆ – медный ПСМ, $\Pi=0,61$, $l/\delta = 0,93$. Цилиндрический тракт с компланарными каналами: ○ – угол перекрещивания компланарных каналов $2\beta = 90^\circ$

Из рис. 4 видно, что в условиях развитого турбулентного течения ($Re > 10^4$) эффективность теплообмена слабо зависит от формы теплообменной поверхности, так как турбулизация потока за счет увеличения скорости потока становится велика, и влияние формы теплообменной поверхности на общую турбулизацию потока уменьшается. При этом растут гидравлические потери, эффективность теплообмена снижается.

Эффективность теплообмена уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Отсюда следует вывод, что увеличивать эффективность теплообмена надо не за счет увеличения скорости движения теплоносителя, а за счет развития поверхности теплообмена. Применение пористых сетчатых металлов с хорошо развитой поверхностью теплообмена и переход от традиционного продольно-канального движения теплоносителя к межканальному движению теплоносителя сквозь ПСМ позволяет работать при малых числах Re и максимальной эффективности теплообмена (рис. 4).

Эффективность тракта особенно велика при малых числах Рейнольдса в диапазоне $1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$. При дальнейшем увеличении скорости движения теплоносителя растут гидравлические потери, эффективность теплообмена уменьшается. Это характерно и для различных трактов с интенсификаторами теплообмена без пористого наполнителя.

Установлено, что эффективность теплообмена в ПСМ при двумерном движении теплоносителя особенно сильно зависит от теплопроводности материала проволоки сетки, пористости ПСМ, относительного пути движения теплоносителя l/δ сквозь ПСМ.

Оценку эффективности теплообмена можно проводить и по соотношению, предложенному в [9]. Интенсификация теплообмена будет эффективна, если

$$(Nu/Nu_{гл})^{3,5} > (\xi/\xi_{гл}).$$

На рис. 5 показаны зависимости эффективности теплообмена в виде комплекса $E = \left(\frac{St}{St_{гл}}\right)^3 \left(\frac{\xi_{эл}}{\xi}\right)$ от числа Рейнольдса Re для различных значений пористости (Π) ПСМ тракта с МКТТ, коэффициента теплопроводности материала λ сеток (хромоникелевой, медной сетки) и отношении длины пути теплоносителя l сквозь ПСМ к толщине δ пористой вставки ($l/\delta = 0.93 - 2.8$). Представлены значения эффективности теплообмена для цилиндрического теплообменного тракта с компланарными каналами.

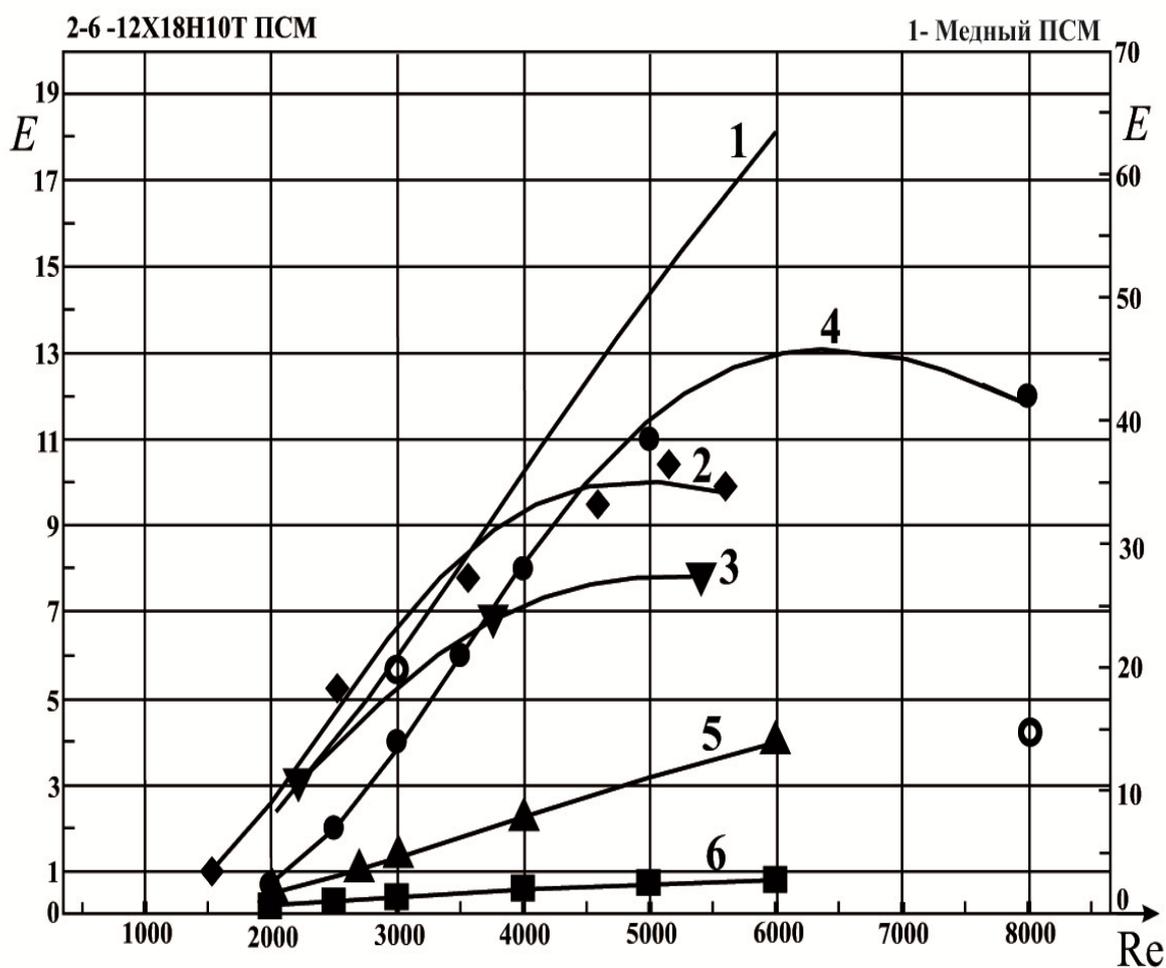


Рис. 5. Эффективность теплообмена E в пористом тракте с МКТТ (теплоноситель – воздух): 1 – медный ПСМ ($l/\delta=0.93$, $\Pi=0.61$); 2 – ПСМ из хромоникелевой сетки полотняного переплетения П24 ($l/\delta=1.56$; $\Pi=0.345$); 3 – ПСМ из хромоникелевой сетки полотняного переплетения П60 ($l/\delta=1.42$; $\Pi=0.368$); 4, 5, 6 – ПСМ из хромоникелевой сетки полотняного переплетения П60 ($l/\delta=2.8$; $\Pi=0.48$; 0.37; 0.22 соответственно). Цилиндрический тракт с компланарными каналами: \circ – угол перекрещивания компланарных каналов $2\beta=90^\circ$

Эффективность пористого тракта с МКТТ возрастает с увеличением пористости ПСМ, коэффициента теплопроводности ПСМ, числа Рейнольдса, с уменьшением относительного пути движения теплоносителя. Как видно из рисунка 5, при пористости ПСМ $\Pi=0.22$ (линия 6) тракт с МКТТ из тканой хромоникелевой сетки полотняного переплетения П60 менее эффективен, чем гладкий канал. Но эффективность резко возрастает при увеличении пористости ПСМ (линии 4,5,6). Эффективность тракта на турбулентном режиме течения с пористостью ПСМ $\Pi=0.48$ из хромоникелевой сетки полотняного переплетения П60 и отношением $l/\delta=2.8$ в 12 раз выше по сравнению с кольцевым трактом, не заполненным пористым металлом. Эффективность тракта с медным ПСМ достигает семидесятикратного увеличения по сравнению с технически гладким каналом. Эффективность теплообмена в теплообменном тракте с компланарными каналами меньше по сравнению с пористым трактом с МКТТ и с увеличением числа Re уменьшается.

Высокие коэффициенты теплоотдачи α в тракте с межканальной транспирацией теплоносителя достигаются высокоразвитой поверхностью теплообмена между пористым сетчатым материалом и теплоносителем при значительно более меньших числах Рейнольдса, чем у оребренных трактов, что приводит к уменьшению гидравлических потерь по сравнению с оребренными трактам.

На рисунке 6 представлены типичные значения коэффициентов теплоотдачи α для тракта с МКТТ и оребренного тракта в зависимости от числа Re . Установлено, что значения коэффициентов теплоотдачи α для тракта с МКТТ значительно выше, чем у лучших оребренных трактов даже при меньших числах Re и, следовательно, при меньших гидравлических потерях.

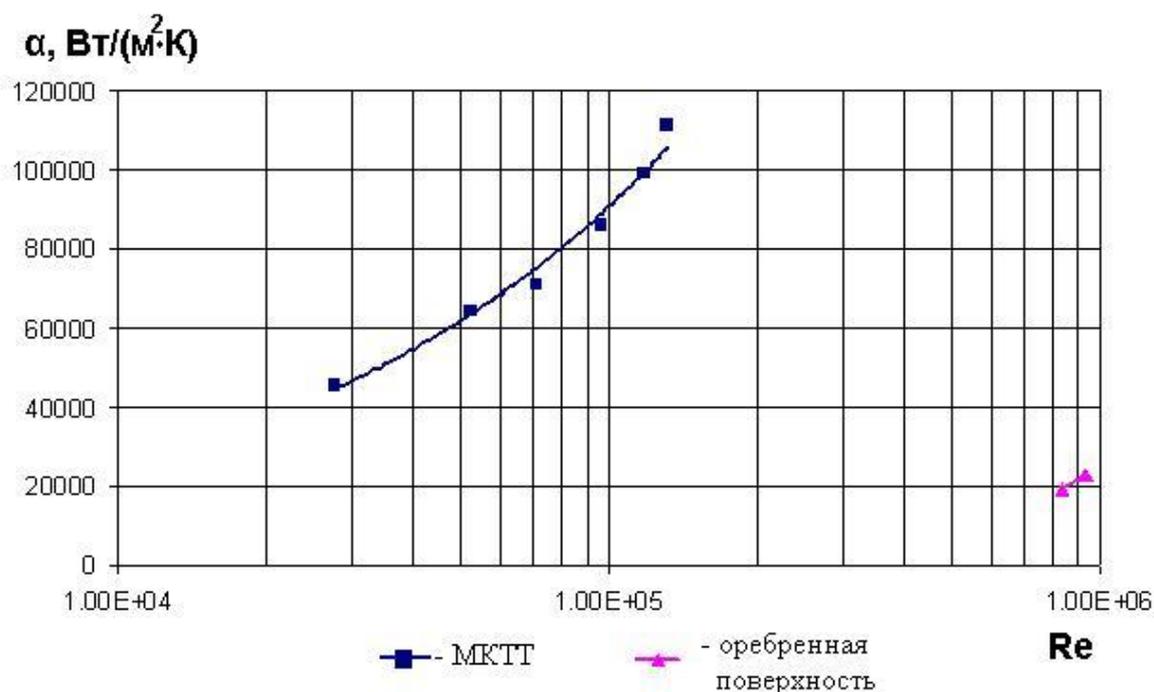


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re

Заключение

Эффективность теплообмена в тракте с межканальной транспирацией теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл при межсеточной фильтрации теплоносителя, рассчитанная по двум общепризнанным критериям теплогидравлической эффективности, выше, чем у других теплообменных трактов. Установлено, что эффективность тракта особенно велика при малых числах Рейнольдса в диапазоне $1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ и увеличивается с уменьшением пути движения теплоносителя сквозь ПСМ и с увеличением теплопроводности ПСМ.

Теплообменный тракт с межканальной транспирацией теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл при межсеточной фильтрации теплоносителя рекомендуется использовать в рекуперативных теплообменных аппаратах для наддува топливных баков ЖРД.

Список литературы

1. Громыко Б.М., Ключева О.Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Часть 1. Кожухотрубчатый испаритель азота двигателя РД107 // Труды НПО «Энергомаш» им. академика В.П.Глушко. М.: НПО Энергомаш, 2006. № 24. С. 246–255.
2. Ключева О.Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Часть 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Труды НПО «Энергомаш» им. академика В.П.Глушко. М.: НПО Энергомаш, 2006. № 24. С. 256–271.
3. Белов Е.А., Григоркин Н.М., Ключева О.Г. и др. Опыт создания и обеспечения работоспособности пластинчато-ребристых теплообменников для наддува баков ракет-носителей // Труды НПО «Энергомаш» им. академика В.П.Глушко. М.: НПО Энергомаш, 2010. № 27. С. 167–271.
4. Богатко Т.В., Терехов В.И., Халатов А.А. Структура течения и теплообмен при турбулентном обтекании одиночных преград различной формы в трубе // Тепловоы процессы в технике. 2012. Т.4. №4. С.146–155.
5. Пелевин Ф.В., Ильинская О.И., Орлин С.А. Применение компланарных каналов в технике // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. № 37. С. 71–86.
6. 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.
7. Никифоров Н.А., Пелевин Ф.В. Конструкционные пористые материалы. В кн. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. В 3т.- Т.2. Передовые технологии производства / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др. Под ред.С.В. Резника.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. С. 186–254.
8. Ядерные ракетные двигатели / Ю.Г. Демянко, Г.В. Конюхов, А.С. Коротеев и др. ООО «Норма-Информ», 2001. 416 с.
9. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.Л. Интенсификация теплоотдачи в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 206 с.