

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 536.24: 621.45

Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Recuperative heat-exchange apparatus with porous metal for a liquid-propellant rocket engine

F.V. Pelevin, A.V. Ponomarev, P.Y. Semenov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: pelfv@rambler.ru, 9722525@mail.ru, pavel.y.semenov@rambler.ru

i Применение диффузионно-вакуумной сварки тканых металлических сеток для изготовления пористых металлов, а также использование принципа межканальной транспирации теплоносителя является основой для создания новых высокоэффективных пористых теплообменных трактов для рекуперативных теплообменных аппаратов. Представлен новый рекуперативный теплообменный аппарат на основе принципа межканальной транспирации теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл. Показано, что эффективность теплообмена в тракте с межканальной транспирацией теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл при межсеточной фильтрации теплоносителя выше, чем у других теплообменных трактов. Установлено, что эффективность тракта особенно велика при малых числах Рейнольдса в диапазоне $1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ и увеличивается с уменьшением пути движения теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл и с увеличением теплопроводности пористого сетчатого металла. Сформулированы рекомендации по оптимальному проектированию рекуперативного теплообменного аппарата на основе принципа межканальной транспирации теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл. Полученные результаты будут полезны при проектировании рекуперативных теплообменных аппаратов для наддува топливных баков жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: рекуперативный теплообменный аппарат, пористый сетчатый металл, межканальная транспирация теплоносителя, эффективность теплообмена.

i The application of diffusion-vacuum welding of woven metal meshes for manufacturing porous metals and the concept of inter-channel coolant transpiration is the basis for developing new high performance porous heat-exchange pathways for recuperative heat-exchange apparatuses. The paper presents a new recuperative heat-exchange apparatus based on the concept of inter-channel coolant transpiration through a porous mesh metal. It has been shown that the heat exchange efficiency in a pathway with inter-channel coolant transpiration through porous mesh metal with inter-mesh filtration of the coolant is higher when

compared to other heat-exchange pathways. It has been established that the pathway efficiency is particularly high at low Reynolds numbers in the range of $1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$. The efficiency increases when the path of the coolant movement through the porous mesh metal decreases, and the porous mesh metal thermal conductivity increases. Recommendations for the optimal design of recuperative heat-exchange apparatus based on the concept of inter-channel coolant transpiration through porous mesh metal have been presented. The results obtained can be used for designing recuperative heat-exchange apparatuses for pressurization of fuel tanks of liquid-propellant rocket engines.

Keywords: recuperative heat-exchange apparatus, porous mesh metal, inter-channel coolant transpiration, heat-exchange efficiency.

Рекуперативный теплообменный аппарат (РТА) входит в состав как жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), так и в состав авиационного газотурбинного двигателя (ГТД). Рекуперативный теплообменный аппарат, входящий в состав ЖРД, служит для испарения и нагрева жидкого азота или нагрева гелия, которые используются для наддува баков ракеты-носителя. Наддув баков необходим для поддержания безкавитационного режима насосов ЖРД, а использование РТА повышает работоспособность вытесняющего газа. Создание компактного высокоэффективного рекуперативного теплообменного аппарата для наддува топливных баков ЖРД — актуальная задача. Не менее важным является также охлаждение масла в узлах ГТД и воздуха для охлаждения его турбинных лопаток.

В настоящее время в ЖРД используются три типа РТА: кожухотрубчатые [1], цилиндрические с компланарными каналами [2] и пластинчато-ребристые [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. Однако вследствие своих больших габаритных размеров кожухотрубчатый РТА имеет невысокие коэффициенты теплоотдачи в трактах горячего и холодного теплоносителей, работает при низких давлениях в трактах теплоносителей, плохо работает при высоких динамических вибра нагрузках.

Цилиндрический РТА с компланарными каналами (применяется в двигателях с дожиганием газогенераторных газов РД-171, РД-170, РД-180) имеет меньшие габариты при высоких давлениях, выдерживает высокие динамические вибра нагрузки. 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 надежного качества пайки (планируется для установки на двигателях РД-180, РД-191).

Создание новых высококомпактных, технологичных, работоспособных при высоких давлениях и вибра нагрузках теплообменных аппаратов во многом зависит от эффективности теплообмена. В РТА, работающих при высоких давлениях теплоносителей, для наддува топливных баков в основном используются различные оребренные теплообменные тракты, тракты с компланарными каналами.

Оребренный теплообменный тракт обеспечивает интенсификацию теплообмена в 1,5–3 раза выше по сравнению с гладким каналом. Причем эффективность оребренного тракта снижается с ростом числа Рейнольдса (Re) и уменьшением коэффициента теплопроводности материала.

В теплообменных трактах с компланарными каналами интенсификация теплообмена в 1,5–3 раза выше (в зависимости от угла перекрещивания каналов) по сравнению с оребренными каналами, но их эффективность также снижается с ростом числа Re [4].

Один из перспективных и эффективных методов интенсификации теплообмена — использование пористых металлов (ПМ) в теплообменных устройствах. Однако, хотя заполнение теплообменного тракта пористым высокопроводным металлом с малым термическим сопротивлением между стенкой и пористым металлом максимально интенсифицирует теплообмен [5–9], наблюдается резкое увеличение гидравлического сопротивления, что сдерживает применение этого метода в РТА ЖРД и ГТД. Для снижения 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.

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

Цель работы — РТА для наддува топливных баков ЖРД с использованием пористых сетчатых металлов (ПСМ) и принципа межканальной транспирации теплоносителя (МКТТ) сквозь ПСМ [9].

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

В теплообменном тракте с МКТТ можно уменьшить потери давления в ПСМ без изменения габаритных размеров теплообменного тракта благодаря переходу от общеизвестного продольно-канального к продольно-поперечному (межканальному) движению теплоносителя сквозь ПСМ, изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток.

Принцип МКТТ в сочетании с межсеточной фильтрацией теплоносителя позволяет создать высокоэффективный пористый теплообменный тракт с большей эффективностью теплообмена, чем у лучших оребренных трактов [9]. Физическую основу этого способа теплообмена составляет чрезвычайно высокая интенсивность теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их соприкосновения.

Тракт с МКТТ обеспечивает высокую теплоотдачу, свойственную высокотеплопроводным пористым металлам (ПМ), и низкие гидравлические потери [9].

Принципиальная схема рекуперативного теплообменного аппарата с МКТТ представлена на рис. 1.

При переходе от продольно-канального (п-к) движения теплоносителя в кольцевом тракте длиной L и толщиной δ , заполненном ПСМ, к межканальному движению теплоносителя путь движения теплоносителя сквозь ПСМ уменьшается в L/l раз, где l — путь движения теплоносителя сквозь ПСМ при межканальной транспирации теплоносителя. При одинаковых перепадах давления, плотности теплоносителя, инерционных коэффициентах сопротивления пористого металла скорость движения теплоносителя при турбулентном режиме движения возрастает:

$$W_{\text{МКТТ}} / W_{\text{п-к}} = (L/l)^{0.5}.$$



Рис. 1. Рекуперативный теплообменный аппарат с МКТТ:

1 — внутренняя стенка; 2 — подводящие и отводящие каналы; 3 — фланец; 4 — вставка из пористо-сетчатого материала; 5 — корпус; 6 — подводящий и отводящий коллекторы

Интенсификация теплообмена в тракте с МКТТ по сравнению с продольно-канальным движением теплоносителя сквозь ПСМ при одинаковых перепадах давления составляет:

$$Nu_{\text{МКТТ}} / Nu_{\text{п-к}} = (L/l)^{0.4}.$$

Если $L \gg l$, то затраты мощности на прокачку теплоносителя сквозь ПСМ будут несоизмеримо малы с затратами мощности при движении теплоносителя сквозь кольцевой канал, заполненный ПСМ.

Важным преимуществом тракта с МКТТ является то, что площадь проходного сечения 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:

$$F_{\text{пр}} = NL\delta.$$

Из уравнения неразрывности следует, что при постоянном секундном массовом расходе теплоносителя m и плотности теплоносителя ρ в пористых трактах с МКТТ уменьшается скорость движения теплоносителя сквозь ПСМ, так как площадь проходного сечения тракта с МКТТ $F_{\text{пр МКТТ}}$ увеличивается по сравнению с площадью проходного кольцевого тракта $F_{\text{пр. п-к}}$:

$$F_{\text{пр МКТТ}} = L\delta\pi d_{\text{ср}}/l = F_{\text{пр. п-к}}L/l,$$

так как $N = \pi d_{\text{ср}}/l$, а $F_{\text{пр. п-к}} = \delta\pi d_{\text{ср}}$. Здесь $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр пористого материала.

Снижение скорости движения теплоносителя w сквозь ПСМ приводит к резкому уменьшению потерь давления ΔP (так как ΔP пропорциональна w^2).

Потери давления при межканальном движении теплоносителя сквозь ПСМ могут быть

меньше, чем в оребренном тракте, несмотря на то, что коэффициент гидравлического сопротивления ξ пористого материала на несколько порядков больше коэффициента гидравлического сопротивления $\xi_{\text{гл}}$ гладкого канала. Это достигается благодаря меньшей скорости и пути движения теплоносителя сквозь ПСМ по сравнению с оребренным трактом.

В настоящее время существуют два метода изготовления ПСМ: метод прокатки пакета сеток и метод диффузионной сварки тканых металлических сеток. Методом прокатки пакета сеток можно получить тонкие пористые листы, из которых невозможно получить пористые цилиндрические заготовки для РТА.

Благодаря современной технологии получения ПСМ методом диффузионной сварки тканых металлических сеток в вакууме можно получить крупные осесимметричные заготовки высокой прочности из пористых сетчатых материалов, необходимые для изготовления трактов регенеративной системы охлаждения ЖРД и РТА.

Применение диффузионно-вакуумной сварки тканых металлических сеток для изготовления ПСМ (рис. 2, а) и принципа МКТТ является основой для создания новых высокоэффективных пористых теплообменных трактов для компактных теплообменных аппаратов.

Экспериментально установлено, что ПСМ является анизотропным материалом. При МКТТ происходит межсеточное движение теплоносителя и, как следствие, уменьшение гидравлических потерь. ПСМ обладает стабильными гидравлическими параметрами и самой высокой прочностью среди других пористых металлов [10].

В отличие от других пористых металлов ПСМ из тканых фильтровых сеток обладают регулярной структурой и стабильным гидрав-

лическим сопротивлением, так как они изготавливаются диффузионно-вакуумной сваркой гостированных фильтровых тканых сеток (ГОСТ 3187–76) при определенной их укладке [10]. ПСМ, полученные методом диффузионно-вакуумной сварки фильтровых тканых сеток, высокотехнологичны, поддаются любым видам обработки, просты в изготовлении.

Экспериментальные зависимости по теплоотдаче в трактах с МКТТ и значения коэффициентов сопротивления для ПСМ представлены в [9].

Как известно, для каждой конкретной технической задачи при определении конструктивной схемы теплообменного устройства существует 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.

Увеличение поверхности теплообмена в единице объема, как известно, максимально в ПСМ, а организация МКТТ сквозь ПСМ 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 [11] предлагается зависимость для площади теплообменной поверхности F , приходящейся на единицу тепловой мощности Q :

$$F/Q \approx (\xi/St^3)^{0.5}.$$

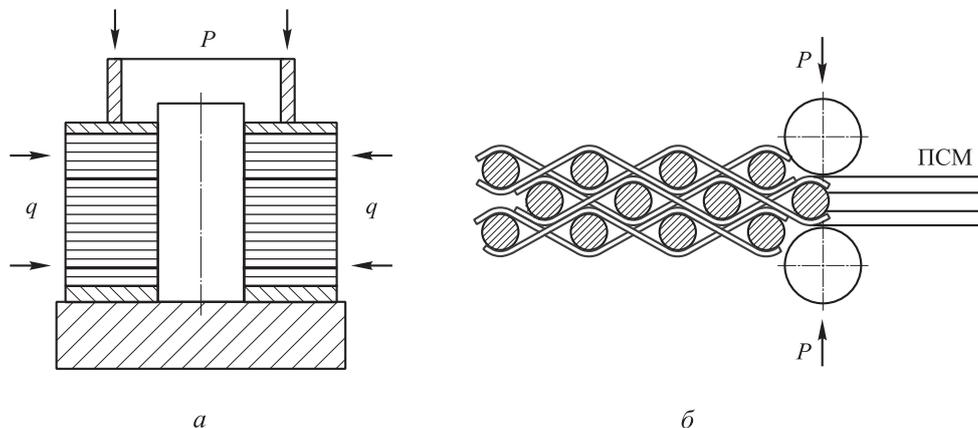


Рис. 2. Принципиальные методы изготовления ПСМ:

а — диффузионно-вакуумной сварки тканых металлических сеток (ПСМ); б — прокатки пакета сеток

Отсюда 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 $(\xi/St^3)^{0,5}$ показывает целесообразность использования при создании высокоэффективных компактных теплообменных устройств теплообменных трактов с большим коэффициентом гидравлического сопротивления ξ . По термогидродинамической аналогии Рейнольдса увеличение коэффициента гидравлического сопротивления приводит к повышению теплоотдачи:

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

Коэффициенты гидравлического сопротивления в ПСМ на несколько порядков больше,

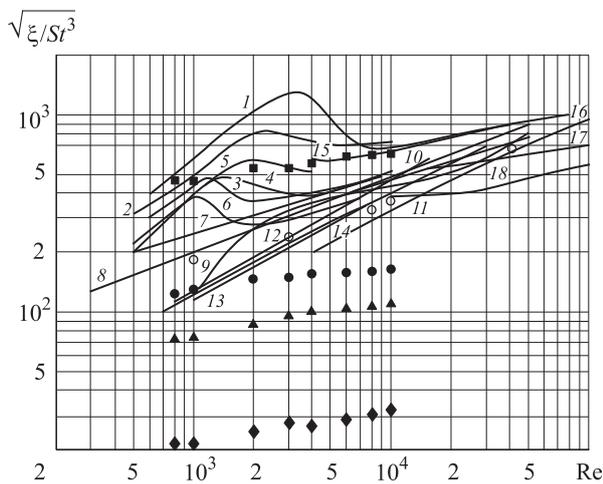


Рис. 3. Зависимость теплогидравлической эффективности пористого теплообменного тракта МКТТ от числа Re для различных поверхностей теплообмена (теплоноситель — воздух):
 1 — круглая труба; 2 — плоский канал; 3 — пережатый канал; 4 — пучок плоских пережатых труб;
 5 — шахматный пучок плоских труб; 6 — 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 — шахматное расположение решеток; 13 — коридорное расположение решеток; 14 — произвольное расположение решеток при пористости 0,5; 15 — пластинчато-ребристая поверхность с гладкими ребрами; 16 — коридорное расположение соседних решеток при пористости 0,83;
 17, 18 — трубы с кольцевыми диафрагмами:
 ● — 12X18Н10Т ПСМ П60, $P=0,48$, $l/\delta = 2,8$;
 ■ — 12X18Н10Т ПСМ П60 $P=0,48$, $l/\delta = 11,3$;
 ▲ — 12X18Н10Т ПСМ П60 $P=0,368$, $l/\delta = 1,42$;
 ◆ — медный ПСМ, $P=0,61$, $l/\delta = 0,93$; ○ — теплообменная поверхность с компланарными каналами $2\beta = 90^\circ$

чем в технически гладкой трубе [9]. Таким образом, следует ожидать и высокую теплоотдачу в канале, заполненном высокотеплопроводным пористым металлом, имеющим малое термическое сопротивление со стенкой канала. Этот вывод многократно подтвержден экспериментально [9, 10].

Чем выше теплопроводность ПСМ в направлении теплового потока и меньше коэффициент теплопроводности теплоносителя, тем эффективнее 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, как следствие, высокими коэффициентами гидравлического сопротивления ($\xi = 10^2 \dots 10^4$) наиболее соответствуют этому утверждению. Так, в тракте с МКТТ и ПСМ 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 $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ м, что для других теплообменных трактов невозможно. Уменьшение эквивалентного диаметра канала способствует увеличению коэффициента теплоотдачи α (так как α пропорционален $1/d_{\text{экв}}^{0,2}$) и уменьшению числа Рейнольдса (соответственно, потере давления). Так, уменьшение эквивалентного диаметра канала с $(1 \dots 1,6) \cdot 10^{-3}$ м, что характерно для оребренных фрезерованных каналов, до $1 \cdot 10^{-4}$ м в ПСМ увеличивает теплоотдачу в 1,7 раза при прочих равных условиях.

Зависимости эффективности теплообмена для различных теплообменных поверхностей от числа Re (данные работы [11]) и экспериментальные данные по эффективности теплообмена в пористых трактах с МКТТ и в цилиндрических трактах с компланарными каналами представлены на рис. 3. Для всех рассмотренных поверхностей теплообмена минимум отношения площади теплоотдающей поверхности к отводимой тепловой мощности соответствует минимально допустимому числу Рейнольдса. Для теплообменных трактов, заполненных ПСМ с высоким коэффициентом теплоотдачи, по сравнению с пустым каналом этот режим движения теплоносителя с малыми скоростями является наиболее благоприятным, так как позволяет достигать высокой теплоотдачи при малых гидравлических потерях.

В условиях турбулентного течения ($Re > 10^4$) эффективность теплообмена для непористых трактов 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 (см. рис. 3). При этом растут гидравлические потери, эффективность теплообмена снижается. Следует увеличивать эффективность теплообмена не за счет повышения скорости движения теплоносителя, а за счет развития поверхности теплообмена. Применение ПСМ с хорошо развитой поверхностью теплообмена и переход от традиционного продольно-канального движения теплоносителя к межканальному движению теплоносителя сквозь ПСМ позволяет достичь максимальной эффективности теплообмена при малых числах Re .

Эффективность тракта с МКТТ особенно велика при малых числах Рейнольдса в диапазоне $1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$. 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 сильно зависит от теплопроводности материала проволоки сетки, пористости ПСМ, относительного пути движения теплоносителя l/δ сквозь ПСМ (см. рис. 3).

Эффективность возрастает с увеличением пористости ПСМ. Эффективность тракта с медным ПСМ достигает 20–30-кратного увеличения по сравнению с технически гладкой трубой. 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 в тракте с МКТТ достигаются при значительно более меньших числах Рейнольдса, чем у оребренных трактов, что способствует уменьшению гидравлических потерь по сравнению с оребренными трактами.

При проектировании РТА с МКТТ следует придерживаться следующих практических рекомендаций:

- толщина пористой вставки δ зависит от коэффициента теплопроводности ПСМ и увеличивается с ростом коэффициента теплопроводности ($\delta = 2 \dots 5$ мм);
- число каналов N должно соответствовать минимальному значению относительного пути движения теплоносителя l/δ сквозь ПСМ;
- для достижения максимально возможной скорости в ПСМ при заданном перепаде давления ΔP необходимо уменьшать инерционный коэффициент ПСМ (использовать ПСМ с высокой пористостью из крупнопористой полотняной фильтровой сетки П60–П24);
- материал сетки должен быть высокотеплопроводным (БРХ08, медь).

Выводы

1. Эффективность теплообмена в тракте с МКТТ сквозь ПСМ при межсеточной фильтрации теплоносителя выше, чем у других теплообменных трактов.

2. Эффективность тракта особенно велика при малых числах Рейнольдса в диапазоне $1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ и увеличивается с уменьшением относительного пути движения теплоносителя сквозь ПСМ с повышением теплопроводности и пористости ПСМ.

3. Полученные результаты имеют практическое значение. Теплообменный тракт с МКТТ сквозь ПСМ при межсеточной фильтрации теплоносителя рекомендуется использовать в РТА для наддува топливных баков ЖРД.

Литература

- [1] Громыко Б.М., Ключева О.Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 1. Кожухотрубчатый испаритель азота двигателя РД107. *Тр. НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко*. Москва, Изд-во НПО Энергомаш, 2006, № 24, с. 246–255.
- [2] Ключева О.Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171. *Тр. НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко*. Москва, Изд-во НПО Энергомаш, 2006, № 24, с. 256–271.
- [3] Белов Е.А., Григоркин Н.М., Ключева О.Г. Опыт создания и обеспечения работоспособности пластинчато-ребристых теплообменников для наддува баков ракет-носителей.

- Тр. НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко. Москва, Изд-во НПО Энергомаш, 2010, № 27, с. 167–271.
- [4] Пелевин Ф.В., Ильинская О.И., Орлин С.А. Применение компланарных каналов в технике. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2014, № 37, с. 71–85.
- [5] Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. Теплоотдача в оболочках из пористых сетчатых материалов. *Теплоэнергетика*, 2009, № 3, с. 46–52.
- [6] Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче в проницаемых оболочках из пористых сетчатых материалов. *Теплоэнергетика*, 2010, № 6, с. 57–62.
- [7] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. К оценке теплогидравлических характеристик пористых структур. *Тр. Пятой Рос. национальной конф. по теплообмену*. Москва, Изд-во МЭИ, 2010, т. 5, с. 172–175.
- [8] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах. *Теплофизика высоких температур*, 2010, т. 48, № 3, с. 402–408.
- [9] Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М., ред. *Научные основы технологий 21 века*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 136 с.
- [10] Резник С.В., ред. *Конструкционные пористые материалы. В 3 т. Т. 2. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Передовые технологии производства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, с. 186–254.
- [11] Демянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С., Кузьмин Е.П., Павельев А.А. *Ядерные ракетные двигатели*. Москва, ООО Норм-Информ, 2001. 416 с.

References

- [1] Gromyko V.M., Kliueva O.G. Sovershenstvovanie teploobmennikov dlia nadduva bakov rakety-nositelia. Ch. 1. Kozhukhotrubchatyi isparitel' azota dvigatel'ia RD107 [Improvement of heat exchangers for tank pressurization launcher. Pt. 1. Shell and tube evaporator nitrogen RD107 engine]. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of the NGO Energomash named after Academician V.P. Glushko]. Moscow, NPO Energomash publ., 2006, no. 24, pp. 246–255.
- [2] Kliueva O.G. Sovershenstvovanie teploobmennikov dlia nadduva bakov rakety-nositelia. Ch. 2. Tsilindricheskii teploobmennik dvigatel'ia RD171 [Improvement of heat exchangers for tank pressurization launcher. Pt. 2. The cylindrical heat engine RD171]. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of the NGO Energomash named after Academician V.P. Glushko]. Moscow, NPO Energomash publ., 2006, no. 24, pp. 256–271.
- [3] Belov E.A., Grigorkin N.M., Kliueva O.G. Opyt sozdaniia i obespecheniia rabotosposobnosti plastinchato-rebristyx teploobmennikov dlia nadduva bakov raket-nositelei. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of the NGO Energomash named after Academician V.P. Glushko]. Moscow, NPO Energomash publ., 2010, no. 27, pp. 167–271.
- [4] Pelevin F.V., Il'inskaia O.I., Orlin S.A. Primenenie komplanarnykh kanalov v tekhnike [Using coplanar channels in technology]. *Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaia tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2014, no. 37, pp. 71–85.
- [5] Polyakov A.F., Strat'ev V.K., Tretyakov A.F., Shekhter Yu.L. Heat transfer in envelopes made of porous network materials. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 227–234.
- [6] Polyakov A.F., Shekhter Yu.L., Strat'ev V.K., Tretyakov A.F. Generalization of experimental data on heat transfer in permeable shells made of porous reticular materials. *Thermal Engineering*, 2010, vol. 57, no. 6, pp. 516–521.
- [7] Zeigarnik Iu.A., Ivanov F.P. K otsenke teplogidravlicheskiykh kharakteristik poristykh struktur [Estimation of thermal-hydraulic characteristics of porous structures]. *Trudy Piatoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Transfer]. Moscow, MEI publ., 2010, vol. 5, pp. 172–175.
- [8] 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.

- [9] *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.
- [10] *Materialy i pokrytiia v ekstremal'nykh usloviakh. Vzgliad v budushchee. V 3-kh tomakh. Tom 2. Peredovye tekhnologii proizvodstva* [Materials and coatings under extreme conditions. A look into the future. In 3 vol. Vol. 2. Advanced production technology]. Ed. Reznik S.V. Moscow, Bauman Press, 2002. pp. 186–254.
- [11] 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.

Статья поступила в редакцию 15.04.2015

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).

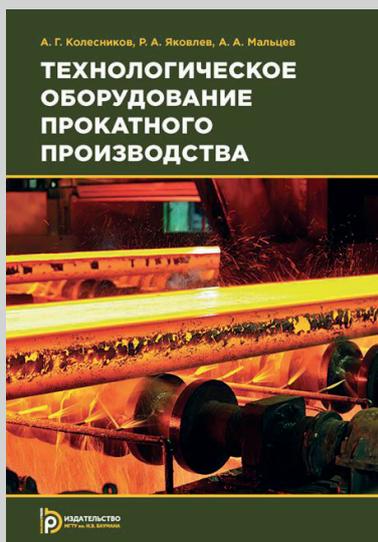
СЕМЕНОВ Павел Юрьевич (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pavel.y.semenov@rambler.ru).

Information about the authors

PELEVIN Fedor Viktorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pelfv@rambler.ru).

PONOMAREV Aleksey Viktorovich (Moscow) — Post-Graduate, Department of Rocket Engines. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 9722525@mail.ru).

SEMENOV Pavel Yurievich (Moscow) — Post-Graduate, Department of Rocket Engines. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pavel.y.semenov@rambler.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
А.Г. Колесникова, Р.А. Яковлева, А.А. Мальцева

«Технологическое оборудование прокатного производства»

Рассмотрено основное и вспомогательное оборудование широко распространенных на производстве типов прокатных станов. Наиболее полно раскрыты вопросы конструирования и расчета рабочих клеток прокатных станов и их приводов. Приведены основные этапы динамического расчета деталей привода прокатного стана и вероятностная оценка их долговечности.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru