

ОБЗОРЫ

УДК 536.24:532.685

*В. А. Майоров, Л. Л. Васильев, В. М. Поляев***ПОРИСТЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ —
КЛАССИФИКАЦИЯ, КОНСТРУКЦИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ**

Теплообмен между пористым материалом и протекающим сквозь него теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их контакта характеризуется чрезвычайно высокой интенсивностью, поэтому использование пористых матриц в теплообменных устройствах является одним из перспективных и эффективных направлений интенсификации процесса. Практическая его реализация стала возможной в последние два-три десятилетия по мере того, как развитие порошковой металлургии позволило создавать разнообразные пористые материалы. Широкий диапазон структурных, гидравлических, теплофизических, химических и других свойств таких материалов, возможность изготовления из них элементов конструкций энергетических установок, особенности теплообмена при фазовых превращениях теплоносителя создают условия и перспективы их широкого многоцелевого применения в различных областях науки и техники.

Классификация пористых теплообменных элементов. Пористыми теплообменными элементами (ПТЭ) будем называть устройства, в которых осуществляется теплообмен между пористой матрицей и потоком жидкости внутри нее. При этом теплоноситель может претерпевать фазовые или химические превращения. Рассмотрим ПТЭ, в которых течение вызвано перепадом внешнего давления (а не капиллярным эффектом).

Несмотря на большое разнообразие теплообменных устройств с пористыми элементами по назначению, конструктивному оформлению, свойствам и фазовому состоянию теплоносителя, общей чертой их является теплообмен между пористым материалом и теплоносителем, а основное отличие заключается в условиях подвода тепла внутрь пористой структуры. По способу подвода тепла все ПТЭ форсированного режима работы можно разделить на следующие основные типы (рис. 1—4).

Элементы транспирационного охлаждения (рис. 1) — подвод тепла q конвекцией или излучением к внешней поверхности непрозрачной пористой стенки. Охладитель с удельным массовым расходом G движется навстречу и поглощает подводимый тепловой поток.

Элементы с объемным тепловыделением q_v внутри пористого материала (рис. 2), которое может иметь различную физическую природу: омический нагрев, деление ядерного топливного материала, объемное поглощение проникающей радиации или лучистого теплового потока внутри полупрозрачной среды. Направление движения теплоносителя может как совпадать, так и быть противоположным лучистому и радиационному потокам.

ПТЭ с подводом (отводом) тепла внутрь пористого материала теплопроводностью от имеющей с ним совершенный тепловой контакт герме-

тичной нагреваемой (охлаждаемой) поверхности (рис. 3). Здесь можно выделить четыре основных варианта: канал с проницаемой вставкой (а); межтрубное пространство, заполненное пористой матрицей (б); поверхность с ребрами, вершины которых соединены с проницаемой перегородкой (в); поверхность, покрытая слоем пористого материала, в котором имеются каналы (г). В последних двух вариантах теплоноситель проходит сквозь пористую структуру и движется по каналам вдоль поверхности.

Регенеративные ПТЭ с периодическим нагревом проницаемой насадки потоком G_1 горячего теплоносителя и последующей отдачей тепла потоку G_2 холодного (рис. 4).

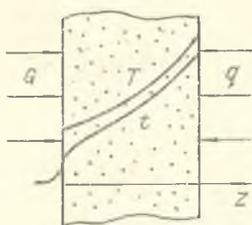


Рис. 1. Элемент транспирационного охлаждения

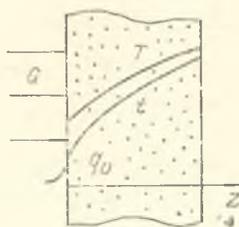


Рис. 2. Проницаемый элемент с объемным тепловыделением

В изображенных на рис. 1—4 основных типах ПТЭ использованы пористые однородные материалы. Эффективность ПТЭ резко возрастает при применении многослойных проницаемых структур с различными свойствами и функциональным назначением отдельных слоев.

Элементы пористого охлаждения. Способ транспирационного охлаждения конструкций, на которые воздействуют внешние тепловые конвективные или лучистые потоки высокой плотности (см. рис. 1), обладает рядом существенных достоинств по сравнению с другими видами тепловой защиты: а) высокой эффективностью использования охладителя; б) значительным уменьшением внешнего конвективного теплового потока, достигающего поверхности — эффект вдува; в) снижением внешнего лучистого теплового потока при подаче лучепоглощающего газа или паров; г) отсутствием ограничений по величине внешнего теплового потока при сохранении неизменности формы и целостности охлаждаемой поверхности. В ряде случаев при чрезвычайно высоких тепловых потоках, сложной конструкции или малой доступности поверхности пористое охлаждение — единственно возможный метод тепловой защиты.

Указанные свойства обусловили широкое практическое применение этого метода: теплозащита поверхностей аэродинамического нагрева, охлаждение камер сгорания и сопел газотурбинных и ракетных двигателей, лопаток газовых турбин, электродуговых нагревателей газа и МГД генераторов, охлаждение проницаемых тоководов в криогенные электроустройства. Системы пористого газового охлаждения к настоящему времени исследованы достаточно подробно, их результаты обобщены в работах [1—7].

Дополнительным преимуществом транспирационного охлаждения при использовании его в электродуговых нагревателях газа (ЭДНГ) является существенное повышение КПД плазмотрона, так как все поглощенное охлаждающим газом тепло снова поступает в основной поток. Этот способ применим для охлаждения различных элементов (анода [8], межэлектродных вставок [9]), а интенсивный вдув плазмообразующего газа через пористую стенку разрядного канала стабилизирует дуговой разряд, позволяет регулировать его мощность и энтальпию по-

тока изменением напряженности электрического поля при ограниченной силе тока. Отмеченные свойства открывают перспективу снижения эрозии электродов, создания электродуговых устройств с высокой плотностью энерговыделения и большим ресурсом работы при возможности использования рабочих газов, химически активных по отношению к материалу стенки [4, 10].

Качественно новые явления наблюдаются при охлаждении пористых электродов электроразрядных устройств и МГД генератора вдувом инертного газа с добавкой ионизирующей присадки щелочных металлов. В этом случае наряду с тепловой и химической защитой электродов имеет место и защита их от эрозии, так как добавление в инжектант

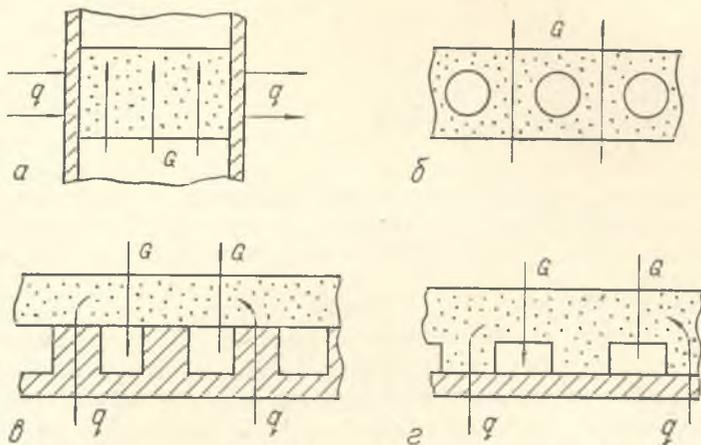


Рис. 3. ПТЭ с подводом (отводом) тепла внутрь проницаемой матрицы теплопроводностью от герметичной стенки

ионизирующей присадки позволяет достичь высокой плотности тока на катоде до 15 А/см^2 в режиме распределенного бездугового разряда при температуре рабочей поверхности $1200\text{--}1600 \text{ К}$ [11—13].

Транспирационное охлаждение при вдуве лучепоглощающих газов или паров может быть применено для ослабления теплового излучения от нагретых элементов с целью инфракрасной защиты [14].

Система пористого охлаждения приобретает ряд качественно новых свойств при использовании жидкостного испаряющегося внутри проницаемой стенки охладителя: существенное повышение эффективности последнего за счет теплоты парообразования; малый удельный объем жидкостного охладителя; возможность достижения низких, в том числе криогенных, температур. Такие свойства определяют и новые области применения этой системы. Анализ данных теоретического и экспериментального исследований выполнен в работах [15, 16].

Особенно эффективны для теплозащиты пористые стенки из тугоплавких металлов при испарительном охлаждении жидким металлом [17], а также при пропитке или продавливании сублимирующего состава. Применение щелочных металлов позволяет сочетать теплозащиту с одновременным вводом паров в рабочий поток в МГД генераторах в качестве ионизирующей присадки. Электродуговой испаритель, трубчатый проницаемый электрод которого охлаждается испаряющимся металлом, может быть использован для получения мелкодисперсного металлического порошка [18].

В работе [19] приведены схема установки и результаты испытаний пористого металлокерамического инжектора для ЖРД. Исследовано несколько вариантов таких инжекторов (рис. 5). В конструкции, представленной на рис. 5, а, оба компонента топлива смешивались, испарялись и начинали реагировать внутри проницаемого вольфрама. В пори-

стом алюминиевом инжекторе (рис. 5, б) подача компонентов осуществлялась раздельно. Такие устройства позволяют удачно решать проблему тепловой защиты инжектора при одновременном испарении компонентов топлива, что приводит к значительному сокращению габаритов камеры сгорания ЖРД.

Надежность работы системы транспирационного охлаждения существенно повышается при использовании многослойной стенки. Известно несколько таких вариантов [20—22]. В работе [23] показано, что наиболее подходящей является двухслойная стенка [22], внутренний конструкционный слой которой выполнен из теплопроводного материала

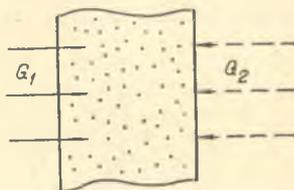


Рис. 4. Регенеративный ПТЭ

малой пористости, высокой прочности, имеющего большое гидравлическое сопротивление. Наружный теплозащитный слой изготовлен из тугоплавкого материала низкой теплопроводности, высокой пористости и пропиаемости.

Нагреваемая солнечным излучением проникаемая зачерненная металлическая стенка применяется в эффективных низкотемпературных солнечных воздухонагревателях [24—26]. При малой плотности используемых матриц (многослойных сеток [24], перфорированной фольги [25] или войлока [26]) поглощение излучения в них приобретает объемный характер и такие устройства следует отнести к ПТЭ с объемным тепловыделением.

Пористые элементы с объемным тепловыделением. Основной областью применения пористых электронагревателей является подогрев газов и жидкостей [27—32]. Существенное преимущество их перед обычными омическими при высокотемпературном нагреве газа заключается в том, что при одинаковой предельной температуре тугоплавкого материала температура газа в пористом нагревателе достигает наибольшей величины вследствие высокой интенсивности объемного теплообмена [28, 30].

Пористый электронагреватель может быть использован также и в качестве парогенератора [33—35], например, в пароструйных вакуумных насосах [34, 35]. В этом случае для повышения надежности его работы на внутренней входной поверхности размещается дополнительный, контролирующий поток жидкости слой из проникаемого электроизоляционного малотеплопроводного материала повышенного гидравлического сопротивления, который исключает закипание жидкости до входа в пористую структуру и обеспечивает равномерное распределение ее по поверхности [33, 35, 36].

Другая область применения ПТЭ с объемным тепловыделением — топливные элементы ядерных реакторов. На рис. 6 приведен поперечный разрез трубчатого твэла с пористым топливным материалом 1, который содержится между внутренней сетчатой оболочкой 2 из нержавеющей

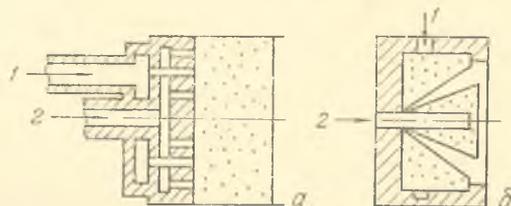


Рис. 5. Пористые металлокерамические инжекторы ЖРД [19]: 1 — горючее; 2 — окислитель

стали и внешней пористой керамической конструкционной оболочкой 3. Теплоноситель 4 подается по центральному каналу, а затем радиально проходит сквозь проницаемую массу, содержащую частицы ядерного топлива или сферические микротрещлы [37].

Подробное исследование температурных полей ПТЭ с постоянным объемным тепловыделением при работе в режиме нагрева однофазного потока выполнено в работе [38], а в режиме парогенератора — в [39—41].

Газопроницаемая стенка из полупрозрачного материала, расположенная в фокусе параболического концентратора солнечной энергии, может быть применена в качестве высокотемпературного источника

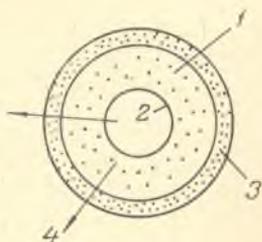


Рис. 6. Пористый трубчатый твэл ядерного реактора [37]

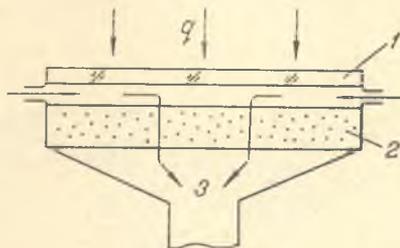


Рис. 7. Высокотемпературный объемный гелиоприемник [42]

тепла для непосредственного нагрева рабочего тела в ракетных двигателях [42]. Солнечное излучение, проходящее через прозрачную кварцевую стенку 1 объемного гелиоприемника (рис. 7), поглощается, рассеивается и переизлучается в объеме пористой полупрозрачной матрицы 2, нагревая ее. Высокая поглощательная способность и развитая поверхность теплообмена создают значительные преимущества объемных гелиоприемников перед поверхностными при высокотемпературном нагреве газа 3, особенно при прямоточном течении, когда направления потоков газа и падающего излучения совпадают. В этом случае количество энергии, поглощенное пористой насадкой, возрастает в направлении течения газа и его максимальная температура достигается в глубине насадки. При этом входные, менее нагретые слои матрицы экранируют излучение от внутренних, более нагретых, благодаря чему эффективное обратное излучение насадки снижается. Поступающий в корпус холодный газ предварительно охлаждает кварцевую стенку, поэтому в данном варианте возможен нагрев газа до температуры, значительно превышающей допустимую температуру кварцевого стекла (1170 К). Наилучший режим работы такого гелиоприемника обеспечивается в случае, когда пористый материал является прозрачным и нерассеивающим в солнечном спектре излучения, но непрозрачным и рассеивающим в инфракрасном [43].

Использование жидкостного теплоносителя при противоточной схеме позволяет получить в объемном гелиоприемнике перегретый до высокой температуры пар.

Объемное тепловыделение по экспоненциальному закону в зависимости от расстояния $q_v = q_{v0} \exp(-\gamma z)$ имеет место в элементах тепловой защиты ядерных реакторов вследствие поглощения проникающей радиации. Изготовление их из пористого материала и прямоточное охлаждение пронизывающим потоком охладителя позволяет значительно снизить температуру и ее градиенты по сравнению с обычным конвективным охлаждением сплошных элементов [44].

Пористые теплообменные элементы с подводом тепла от сплошной стенки. Основное назначение таких ПТЭ — интенсификация теплообмена между поверхностью и омывающим ее потоком теплоносителя. Здесь

качественно меняется механизм переноса тепла: оно от стенки передается теплопроводностью через каркас внутрь проницаемой матрицы и затем поглощается потоком теплоносителя за счет интенсивного внутрипорового теплообмена. Пористый наполнитель должен иметь высокую теплопроводность и совершенные тепловой и механический контакты со стенкой.

Этот метод интенсификации позволяет с помощью однофазного теплоносителя охлаждать сплошную стенку, подверженную воздействию больших тепловых потоков, например при конвективном охлаждении стенок ракетных двигателей (рис. 8) и лопаток их газовых турбин, элементов электронной аппаратуры и других теплонапряженных устройств

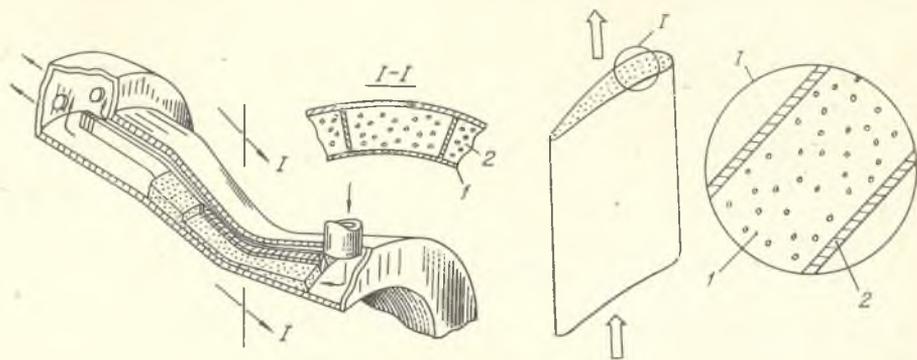


Рис. 8. ЖРД, стенка 1 горловины сопла которого охлаждается компонентом топлива, прокачиваемого сквозь проницаемую вставку 2 [45]

Рис. 9. Малогабаритная проницаемая лопатка газовой турбины [46]

[45—48]. В частности, за счет охлаждения прокачкой воды через проницаемую подложку была обеспечена надежная работа лазерного отражателя при тепловом потоке до $8 \cdot 10^7$ Вт/м², а толщина обогреваемой стенки уменьшена до нескольких десятков микрон [48]. Такой способ охлаждения в настоящее время единственный при малых размерах или сложной форме нагреваемых конструкций, в которых невозможно заполнить каналы для охладителя. Например, лопатки малых газовых турбин ракетных двигателей с максимальной толщиной профиля порядка 3 мм, хордой около 2 см и длиной от 1 до 2 см обычно не охлаждаются, что ограничивает температуру газового потока и эффективность таких турбин. Изготовление лопаток из волокнистого металла 1 (рис. 9), покрытого снаружи тонким герметичным слоем керамики 2 и охлаждаемого продольным потоком газа, вытекающего через вершину, позволяет снять эти ограничения [46].

Очевидная физическая идея указанного метода интенсификации теплообмена послужила причиной того, что одновременно с развитием технологии изготовления пористых металлов было предложено большое количество конструкций разнообразных теплообменных устройств, в которых каналы или межтрубное пространство заполнены такими металлами. Публикации с результатами исследования, в том числе экспериментального [47—49], появились с большим запозданием и только в самое последнее время наблюдается быстрый рост их числа. Обобщение известных в литературе аналитических данных по этой проблеме, а также наиболее полное теоретическое и экспериментальное исследование интенсификации конвективного теплообмена в каналах с проницаемым наполнителем выполнено в работах [50, 51].

Основные конструкции теплообменных устройств с использованием ПТЭ данного типа приведены на рис. 10.

На рис. 10, а изображен теплообменник, в котором пористые поперечные вставки 1 размещены как во внутренней, так и во внешней

трубе [52]. Эти вставки имеют одинаковую толщину и расположены в одной плоскости.

Как видно из рис. 10, б, проникаемая матрица 1 заполняет зазор между стенками, образуя два диаметрально противоположных канала 2, 3 для продольного подвода и отвода теплоносителя 4 [53]. Здесь реализуется его продольно-поперечное движение: продольное — в подводящем 2 и отводящем 3 каналах; поперечное — сквозь насадку 1 в окружающем направлении.

На рис. 10, в пористый материал 1 также заполняет пространство между двумя оболочками, но продольные подводящие 2 и отводящие 3 каналы расположены равномерно по окружности и примыкают к стен-

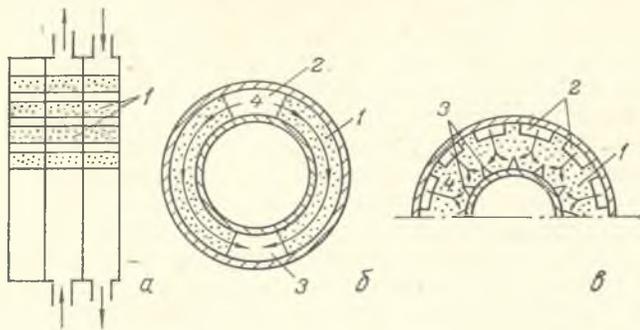


Рис. 10. Теплообменные устройства с проникаемыми высокотеплопроводными вставками в каналах: а — данные работы [52]; б — [53]; в — [54, 55]

кам [54, 55]. Поперечное течение теплоносителя 4 сквозь матрицу осуществляется в радиальном направлении, что позволяет предельно снизить затраты мощности на его прокачку. Интересно отметить, что здесь проникаемый каркас может передавать значительные механические усилия от внутренней трубы к внешней. Если внутренняя стенка является оболочкой твэла, то это позволяет полностью разгрузить ее от давления газообразных продуктов деления и изготовить предельно тонкой. В работе [55] конструкцию, представленную на рис. 10, в, предложено использовать для охлаждения элементов, подверженных воздействию больших механических нагрузок, например подшипников.

Описание более сложных конструкций теплообменников, в которых используются ПТЭ с подводом тепла через сплошную стенку, можно найти в работах [56—59].

Для упрощения изготовления значительных по размерам устройств с ПТЭ в работе [60] предложено собирать их из отдельных модулей. Последние состоят из трубы, окруженной слоем проникаемой матрицы, и имеют такой контур, что могут плотно собираться вместе в теплообменник желаемой формы.

Перспективным является использование сетчатых металлов для изготовления теплорассеивающих панелей. В работе [61] приведено несколько их вариантов и установлено, что такие панели значительно более эффективны, чем обычное оребрение в условиях как вынужденной, так и свободной конвекции.

Качественно новые свойства достигаются при фазовом превращении потока теплоносителя внутри примыкающего к сплошной стенке проникаемого материала. В первую очередь перенос тепла от стенки теплопроводностью через пористый каркас (или в обратном направлении) исключает высокое термическое сопротивление у стенки, создаваемое сплошной паровой пленкой при кипении теплоносителя или сплошной пленкой конденсата при конденсации потока пара в гладких каналах. Это позволяет полностью осуществить фазовое превращение потока при высокой интенсивности теплообмена. Кроме того, капиллярные силы

создают равномерную насыщенность пористой структуры жидкостью, чем устраняется расслоение двухфазного потока в канале под действием внешних сил. Поэтому такой способ организации форсированного теплообмена при фазовых превращениях типичен, например, для систем при изменении их ориентации относительно направления силы тяжести или в условиях пониженной гравитации.

Анализ особенностей и количественных характеристик теплообмена и сопротивления в каналах с пористым высокотеплопроводным заполнителем при испарении или конденсации потоков теплоносителя выполнен в работах [62—64].

Все приведенные выше теплообменные устройства с пронизаемым высокотеплопроводным заполнителем в каналах или межтрубном пространстве (например, на рис. 3 и 10) могут быть использованы для организации фазового превращения потока теплоносителя. Отметим некоторые наиболее интересные конструкции. В работе [65] описан испарительный элемент для сброса тепла, подводимого к сплошной поверхности (см. рис. 3, г). Охлаждающая жидкость распределяется по каналам и при движении сквозь пористую матрицу в окружающее пространство она поглощает тепло и испаряется. В испарительном элементе [66] пористое покрытие на теплоотдающей поверхности не имеет каналов, но выполнено трехслойным с различной пронизаемостью боковых и среднего слоев, причем последний имеет наиболее высокое гидравлическое сопротивление. Охлаждающая жидкость распределяется по теплоотдающей поверхности внутри примыкающего к ней слоя высокой пронизаемости. Далее направления потоков тепла и испаряющейся жидкости в пористой структуре совпадают — по нормали от теплопередающей поверхности.

Основным элементом конденсатора [67] является пористая металлическая пластина с размещенными в ней трубами для протока охладителя (рис. 3, б). Под действием перепада давления пар поступает внутрь охлаждаемой структуры, полностью конденсируется и образующийся конденсат выдавливается из нее в отводящий коллектор.

Пористая металлокерамическая перегородка с размещенными внутри нее охлаждаемыми трубами применена в работе [68] для создания сублимационного конденсатора. Пары сублимированного продукта намораживаются в виде пронизаемой структуры на ее входной поверхности, а неконденсирующийся газ проходит сквозь замороженный продукт и пористую перегородку. Для периодического оттаивания замороженного продукта внутри пористой матрицы дополнительно размещены электронагреватели.

Кроме того, известны также кожухотрубные конденсаторы [69—71], в которых конденсационный ПТЭ имеет конструкцию, близкую к изображенной на рис. 3, в. В них трубы для протока охладителя могут иметь различную форму, но общим является то, что они окружены пронизаемой металлокерамической перегородкой, соединенной с трубой с помощью ребер или выступов таким образом, что между стенкой охлаждаемой трубы и пористой перегородкой образуются продольные каналы. Пар продавливается через пронизаемую перегородку, полностью конденсируется внутри нее и по продольным каналам конденсат поступает в отводящий коллектор. Выделяющееся при конденсации тепло теплопроводностью отводится из пористого металла через области соединения его со стенкой охлаждаемой трубы.

Другие конструкции парогенераторов с ПТЭ предложены в работах [72, 73], а в [74—76] дается описание конденсаторов-сепараторов с ПТЭ для разделения парогазовой смеси и осушения воздуха.

Пористые теплообменные элементы с химически реагирующим теплоносителем. Развитая поверхность пронизаемых матриц, обладающих необходимыми каталитическими свойствами, наряду с интенсивным подводом или отводом тепла ускоряет протекание химических реакций

в потоке теплоносителя. Это дает возможность создавать компактные химические реакторы.

Так, например, применение в газовых инфракрасных излучателях каталитически активных пористых материалов и сеток, изготовленных из жаростойких материалов и сплавов, покрытых или пропитанных палладием, платиной, осмием, рутением, родием или иридием, позволяет значительно (до 400 °С) снизить температуру сжигания газозвушной смеси, а следовательно, и температуру излучающей поверхности. Такой каталитический излучатель дает мягкое излучение, которое при сушке

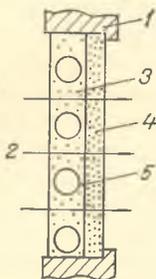


Рис. 11. Фильтр-теплообменник [85]

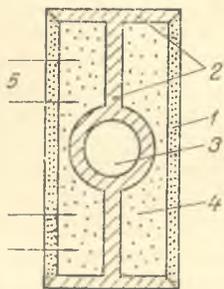


Рис. 12. Криосорбционная панель вакуумного насоса [86]

растительных или других материалов предохраняет их от разложения [77].

На основе пористых металлов разработаны также и газопламенные горелки с широким однородным факелом [78, 79]. Основным их элементом является металлокерамическая перегородка, для предотвращения оплавления которой применяется боковое водяное охлаждение или охлаждение с помощью змеевика, размещенного внутри пористого металла по схеме рис. 3, б. Такие горелки позволяют получать плоское однородное пламя в широком диапазоне изменения состава горючей смеси и скорости ее истечения.

Выполненный в работах [80—83] анализ пористого охлаждения с использованием диссоциирующего охладителя выявил значительное повышение его эффективности вследствие поглощения тепла при протекании эндотермической реакции разложения. Кроме того, разложение охладителя приводит к уменьшению молекулярного веса вдуваемой газовой смеси, что увеличивает блокирующий эффект охлаждения при конвективном нагреве.

Различные схемы ПТЭ могут быть использованы для организации разложения однокомпонентного топлива в газогенераторах ракетных двигателей или в гибридных и однокомпонентных ракетных двигателях [84]. Скорость реакции контролируется выбором проницаемой матрицы с требуемыми каталитическими свойствами.

Пористые теплообменные элементы многоцелевого назначения. Специфические свойства пористых материалов позволяют наряду с интенсивным теплообменом организовать протекание ряда других важных процессов. Рассмотрим некоторые представляющие интерес примеры.

Наиболее широко пористая металлокерамика применяется для фильтрования жидкостей и газов. На рис. 11 изображен фильтр-теплообменник [85], содержащий установленную в корпусе 1 пористую фильтрующую металлокерамическую перегородку из расположенных последовательно по потоку 2 слоев грубой 3 и тонкой 4 очистки с размещенными в первом слое теплообменными трубами 5. Такое устройство позволяет проводить фильтрование в термостатированных условиях при нагреве или охлаждении различных жидкостей, газов, расплавов, в том числе и

химически активных, в широком диапазоне температур от криогенных до температур расплавленных металлов.

Двойную функцию фильтра и тепловой защиты выполняет проникаемая металлокерамическая стенка 1 в приведенной на рис. 12 криосорбционной панели вакуумного насоса [86, 87]. Замкнутая полость между пористым экраном 1 и профилем 2, охлаждаемым протекающей по каналу 3 криогенной жидкостью, заполнена кристаллическим адсорбентом 4. Откачиваемый газ 5 проходит сквозь пористую стенку, в ней охлаждается и затем поглощается адсорбентом. Экран воспринимает падающий на него лучистый тепловой поток и переносимое откачиваемым газом тепло и теплопроводностью передает его охлаждаемому профилю. Таким образом, пористая стенка выполняет функцию тепловой защиты, препятствуя попаданию тепла на адсорбент, и одновременно является фильтром, удерживающим мелкозернистый адсорбент от распыления по вакуумной системе. Это позволяет сделать конструкцию криосорбционного насоса высокотехнологичной и предельно компактной.

Лиофобные или лиофильные свойства проникаемых материалов в сочетании с малым диаметром пор обеспечивают достаточно эффективную сепарацию парожидкостной смеси, что особенно важно, например, в условиях невесомости. В работах [88, 89] описываются конструкция и рабочие параметры трубчатого испарителя для получения паров ртути в ионном двигателе. Пористая вставка из вольфрама внутри молибденовой трубки нагревается размещенным на ее внешней поверхности электрическим нагревателем. Жидкая ртуть под давлением подается в проникаемую вставку и испаряется. Вставка одновременно выполняет и роль парожидкостного сепаратора, препятствуя потоку сквозь нее жидкой ртути. В том случае, когда жидкость смачивает нагреваемую пористую матрицу, на ее выходную поверхность для исключения прорыва жидкости и получения сухого пара помещают слой проникаемого лиофобного материала, например фторопласта [90]. Описание конденсаторов-сепараторов с ПТЭ для разделения парогазовой смеси выполнено в указанных ранее работах [74—76].

Значительный перепад давления, создаваемый на пористой структуре при движении сквозь нее парожидкостной смеси, используется в ПТЭ для реализации дроссельного эффекта (рис. 13). Дроссельный элемент выполнен в виде трубы 1, заполненной металлом малой пористости, которая помещена внутрь теплообменной трубы 2 с металлом высокой проникаемости. Жидкостный хладагент 3 поступает во внутреннюю трубу, постепенно испаряется за счет падения давления при течении сквозь пористую насадку и подается в испаритель. В противоточном направлении сквозь кольцевой канал, окружающий внутреннюю трубу, движется поток 4 холодного пара из испарителя. Он охлаждает двухфазный поток во внутренней трубе, тем самым понижая конечную температуру хладагента и увеличивая холодопроизводительность установки, а затем подается в компрессор.

Дроссельный теплообменный элемент в виде заполненной проникаемой матрицей трубы, помещенной в криогенную жидкость, используется для ее термостабилизации [92]. Здесь незначительная часть жидкости проходит через такой дроссель, где ее температура понижается, далее она испаряется и поглощает тепло от оставшейся жидкости, охлаждая ее.

Термическое сопротивление пористого материала, заключенного в герметичную оболочку, можно регулировать в широком диапазоне путем дозированного ввода газа или жидкости, в частности жидких металлов [93]. Это позволяет плавно изменять его эффективную теплопроводность в пределах от 10^{-3} до 10^4 Вт/(м·К). «Сверхвысокая» теплопроводность таких ПТЭ достигается за счет кипения жидкости и конденсации пара внутри проникаемой структуры вблизи обогреваемой и охлаждаемой герметичных поверхностей. Указанное устройство может быть исполь-

зовано для организации интенсивного теплообмена, например, в работе [94] предложена конструкция охлаждаемых таким способом электродов дугового нагревателя газа.

Пористые теплообменные элементы в криогенной технике. Интенсификация теплообмена особенно необходима в криогенных системах, где только так можно свести к минимуму площадь наружных поверхностей теплообменной аппаратуры, а следовательно, и теплопритоки в нее в условиях, когда при очень низких температурах отвод тепла становится все сложнее и дороже. Некоторые из разобранных ранее теплообменных устройств с пористым наполнителем внутри каналов или в межтрубном пространстве разработаны специально для криогенных температур. Например, в теплообменнике (рис. 10, а) во избежание снижения его эффективности за счет продольной теплопроводности пористый материал выполнен не сплошным, а в виде последовательно расположенных отдельных встав-

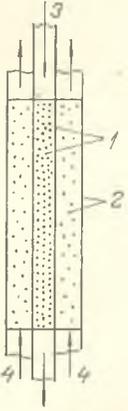


Рис. 13. Дроссель-теплообменник [91]

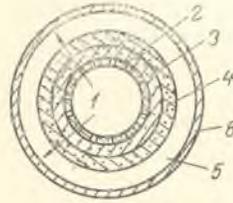


Рис. 14. Сверхпроводящий кабель [97]

вок. В работе [95] предложена конструкция теплообменника с пористым металлом для быстрого захлаживания тел до криогенных температур.

Кроме обычных теплообменников, существуют различные устройства, работающие при криогенных температурах, в них для интенсификации теплообмена применяются пористые материалы. Известно несколько конструкций сверхпроводящих линий электропередачи, в которых пористая матрица используется для охлаждения сверхпроводящих проводников [96—98]. Наиболее эффективное охлаждение достигается в сверхпроводящем кабеле, изображенном на рис. 14. При подаче охлаждающего гелия 1 под давлением во внутреннюю перфорированную трубу 2 часть его проходит сквозь пористый токоведущий элемент 3 и электроизоляцию 4 в радиальном направлении, эффективно охлаждая их, после чего отводится по зазору 5 вблизи оболочки 6. Чередующиеся слои проводника и электроизоляции могут быть использованы для пропускания как однофазного, так и многофазного тока.

Важной задачей при разработке различного криогенного электрооборудования является организация эффективного охлаждения тоководов. Основной способ ее решения заключается в использовании паров испаряющегося в криостате гелия для продольного охлаждения пористого токовода. Одна из первых конструкций — это токовод из собранного в жгут набора проволочных оплеток [99]. Близки конструктивно к указанному тоководу, предложенные в работах [100—103]. В работе [104] приведен композиционный токовод, резистивная часть которого состоит из спеченного металлического порошка, армированного продольными элементами неразрывной структуры, например капиллярными трубками или сеткой. Кроме того, сверхпроводящие шины некоторой долей размещены в пористой резистивной части, чем достигается их неразъемное соединение. Обобщение известных данных по вопросам расчета тоководов с пористыми матрицами для криогенного оборудования проведено в работе [105].

Пористые высокотеплопроводные металлы используются также и при изготовлении теплообменников сосредоточенного теплообмена (дискретного типа) в рефрижераторах растворения для получения сверхнизких температур [106]. Предельно развитая поверхность теплообмена пористой структуры позволяет уменьшить граничное термическое сопротивление Капицы, вызывающее температурный скачок на границе раздела жидкость—твердое тело, через которую передается тепло. Такой теплообменник представляет собой блок, содержащий две камеры, заполненные проницаемым высокотеплопроводным материалом с большой удельной поверхностью [107]. Обычно и пористая матрица и блок выполняются из меди. При растворении He^3 в He^4 на пористой насадке в одной из камер температура получаемой смеси может понизиться до 0,011 К. За счет этого происходит охлаждение всего блока и протекающего через другую камеру потока He^3 . Результаты аналитического и экспериментального исследований таких теплообменников приведены, например, в работах [108, 109].

Теплообмен и сопротивление при движении теплоносителя в пористых материалах. Для теплового и гидравлического расчетов различных типов ПТЭ необходима информация по теплопроводности пористых материалов, а также по механизму и количественным характеристикам теплообмена и сопротивления при движении однофазного и с фазовым превращением потоков теплоносителя в пористых материалах различной структуры. В настоящее время происходит интенсивное накопление таких данных.

Из всех пористых материалов наиболее подходящими для изготовления ПТЭ являются металлы, что объясняется их свойствами: высокая теплопроводность, прочность, термостойкость, коррозионностойкость, развитая внутрипоровая поверхность, возможность регенерации и изготовления элементов любой формы, хорошая технологичность соединения их друг с другом и с элементами конструкции, возможность контроля и изменения в широком диапазоне многих из указанных свойств. Технология изготовления изделий из пористых порошковых, волокнистых и сетчатых металлов достаточно подробно изложена в работе [110]. Там же обобщены полученные к настоящему времени результаты по исследованию закономерностей движения однофазных жидкостей и газов в таких структурах. В дополнение к этому в работе [111] на основании тщательного анализа известных работ показано, что основной причиной нежелательного явления неравномерного и невоспроизводимого уменьшения потока очищенной от механических загрязнений капельной жидкости при движении ее в проницаемых матрицах со средним размером пор больше микрона (облитерация) является забивание пор выделяющимися пузырьками растворенного в жидкости газа. Для предотвращения этого необходима предварительная ее дегазация. Все известные данные по теплопроводности пористых металлов систематизированы в работе [112], а сведения по интенсивности внутрипорового объемного конвективного теплообмена при движении в них однофазного теплоносителя проанализированы в работе [7].

Выполненное в [15] исследование выявило практически полное отсутствие информации по механизму и количественным характеристикам теплообмена и сопротивления при движении испаряющегося или конденсирующегося потоков теплоносителя в пористых материалах. С тех пор в работах [40, 41, 62—64, 113—115] приведены данные, в значительной мере устраняющие этот пробел.

Основными трудностями, сдерживающими в настоящее время широкое практическое внедрение теплообменных устройств с ПТЭ, являются очень жесткие требования по чистоте теплоносителей и еще не отработанная технология их получения. Например, при продолжительной работе должна производиться непрерывная очистка теплоносителя от механических загрязнений фильтрами, средний размер пор которых

в 3—4 раза меньше размера пор ПТЭ. Однако можно надеяться, что раскрытые в данном обзоре качественно новые свойства и существенные преимущества их перед другими видами теплообменников, а также чрезвычайно широкие области использования ПТЭ вызовут у читателей интерес к ним, который обеспечит дополнительный толчок в развитии исследований по их применению.

Figure Captions

- Fig. 1. Element of transpiration cooling.
 Fig. 2. Permeable element with volumetric heat release.
 Fig. 3. Porous heat transfer elements with supply (removal) of heat into the interior of a permeable matrix due to heat conduction from the sealed wall.
 Fig. 4. Regenerative porous heat transfer element.
 Fig. 5. Porous metal-ceramics injectors of the liquid-reactive motor [19]: 1, fuel; 2, oxidant.
 Fig. 6. Porous tubular fuel element of the nuclear reactor [37].
 Fig. 7. High-temperature volumetric helioreceiver [42].
 Fig. 8. Liquid-reactive motor, whose nozzle throat wall 1 is cooled by the component of the fuel pumped through the permeable insert 2 [45].
 Fig. 9. Small-size permeable blade of the gas turbine [46].
 Fig. 10. Heat transfer devices with permeable high heat-conducting inserts in the channels: a, data of [52]; б, [53]; в, [54, 55].
 Fig. 11. Filter-heat exchanger [85].
 Fig. 12. Cryosorption panel of the vacuum pump [86].
 Fig. 13. Throttle-heat exchanger [91].
 Fig. 14. Superconducting cable [97].

Литература

- Grootenhuis P. The mechanism and application of effusion cooling.—The J. of the Royal Aeronautical Society, 1959, vol. 63, N 578, p. 73—89.
- Kelley J. B., L'Escuyer M. R. Transpiration cooling — its theory and application.—JPC 422, Report N TM-66-5, 1966.— 153 p.
- Бэйли, Торнер. Пористое охлаждение элементов конструкции газовых турбин.—Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Сер. А. Энергетические машины и установки, 1970, т. 92, № 4, с. 1—9.
- Жуков М. Ф., Аньшаков А. С., Засыпкин И. М. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками.—Новосибирск: Наука, 1981.— 221 с.
- Елифанов В. М., Манушин Э. А. Некоторые результаты исследования пористого охлаждения лопаток газовых турбин.—ИФЖ, 1975, т. 28, № 3, с. 533—544.
- Майоров В. А. Исследование устойчивости системы проникаемого газового охлаждения пористой стенки с внешним теплоподводом.—Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 2, с. 157—160.
- Майоров В. А. Течение и теплообмен однофазного охладителя в пористых металлокерамических материалах.—Теплоэнергетика, 1978, № 1, с. 64—70.
- Боффа, Пфендер. Регулируемое пористое охлаждение анода мощного плазмотрона.—Теплопередача. Сер. С, 1973, т. 95, № 4, с. 84—90.
- Курочкин Ю. В., Пустогогаров А. В. Исследование плазмотронов с подачей рабочего тела через пористую межэлектродную вставку.—В кн.: Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977, с. 82—104.
- Карабут А. Б., Курочкин Ю. В., Мельников Г. Н., Пустогогаров А. В. Плазмотроны со стабилизацией разряда вдувом через пористую стенку.—ТВТ, 1979, т. 17, № 3, с. 618—625.
- А. с. № 256116 (СССР). Пористый токосъемный электрод для кондукционного МГД генератора /Г. М. Шеголев, Ю. П. Кукота, В. М. Слепцов.—Опубли. в Б. И., 1969, № 32.
- А. с. № 506146 (СССР). Электрод электроразрядного устройства /В. О. Герман и др.—Опубли. в Б. И., 1978, № 17.
- Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А. и др. Экспериментальное исследование работы пористого МГД преобразователя при вдуве аргона с присадкой калия.—ТВТ, 1973, т. 11, № 3, с. 623—638.
- Quick D. H., Viskanta R., Winter E. R. F. Radiation shielding of a porous surface by transpiration of an absorbing gas.—AIAA paper No 72-277, 1972.
- Майоров В. А., Васильев Л. Л. Теплообмен и устойчивость при движении охладителя, испаряющегося в пористых металлокерамических материалах.—ИФЖ, 1979, т. 36, № 5, с. 914—934.
- Майоров В. А. Теплообмен в области испарения охладителя внутри нагреваемой пористой стенки.—Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 6, с. 141—145.
- Патент США № 3883096, 1975.

18. А. с. № 678735 (СССР). Электродуговой испаритель / Г. А. Горяев и др.— Опубл. в Б. И., 1979, № 29.
19. Kahrs J., Corbett A. D. Propellant injection through porous media.— AIAA paper N 67—463, 1967, p. 1—10.
20. Патент США № 2941759, 1960.
21. Патент США № 3138009, 1964.
22. Патент США № 3793861, 1974.
23. Майоров В. А. Разработка устойчивой системы двухфазного пористого охлаждения.— ИФЖ, 1977, т. 32, № 5, с. 870—877.
24. Хамид, Бекман. Характеристики набранных из проволочных сеток матриц при радиационном обогреве и воздушном охлаждении.— Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Сер. А. Энергетические машины и установки, 1971, т. 93, № 2, с. 57—61.
25. Чоу, Эль-Вакил. Теплообмен и гидравлические характеристики пористых матриц при нагреве излучением.— Теплопередача. Сер. С, 1966, т. 88, № 1, с. 73—82.
26. Lansing F. L., Clarke V. A high performance porous flat-plate solar collector.— Energy, 1979, vol. 4, N 4, p. 685—694.
27. А. с. № 163305 (СССР). Электронагреватель газового потока / А. А. Деметьев.— Опубл. в Б. И., 1964, № 12.
28. А. с. № 182262 (СССР). Устройство для высокотемпературного нагрева газа / М. П. Погорелко.— Опубл. в Б. И., 1966, № 11.
29. А. с. № 299036 (СССР). Электронагреватель для текучих сред / Н. А. Кудрин, Л. А. Лукьянов, В. Н. Белокрыльцев.— Опубл. в Б. И., 1971, № 11.
30. А. с. № 369449 (СССР). Высокотемпературный омический нагреватель газа / А. Л. Искра и др.— Опубл. в Б. И., 1973, № 10.
31. Патент США № 3833791, 1974.
32. А. с. № 746960 (СССР). Электронагреватель текучих сред / Л. Л. Васильев и др.— Опубл. в Б. И., 1980, № 27.
33. Патент США № 3688083, 1972.
34. Патент Великобритании № 1446417, 1976.
35. Патент США № 3943330, 1976.
36. Pai V. K., Bankoff S. G. Film boiling of liquid nitrogen from porous surface with vapor suction: experimental extensions.— AIChE Journal, 1966, vol. 12, N 4, p. 727—736.
37. Патент Великобритании № 1241441, 1971.
38. Макаров В. С. Исследование процессов нагрева жидкости или газа в пористых телах применительно к созданию специальных электротермических установок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— М.: МЭИ, 1977.— 20 с.
39. Vasiliev L. L., Maiorov V. A. An analytical study of resistance, heat transfer and stability in evaporative cooling of a porous heat-producing element.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1979, vol. 22, N 2, p. 301—307.
40. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Теплообмен в области испарения охладителя внутри пористого тепловыделяющего элемента.— ИФЖ, 1984, т. 46, № 1, с. 8—14.
41. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Физические особенности испарительного жидкостного охлаждения пористого металлокерамического тепловыделяющего элемента.— ИФЖ, 1984, т. 46, № 2, с. 189—195.
42. Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полуэктов В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов.— М.: Машиностроение, 1975.— 248 с.
43. Лейн, Эдвардс. Совместное излучение, теплопроводность и конвекция в спектрально селективном, эмитирующем и рассеивающем пористом покрытии.— Теплопередача. Сер. С, 1966, т. 88, № 2, с. 91—100.
44. El-Wakil M. M., Choudhury W. U., Marr W. W. Heat transfer and fluid flow in porous fuel elements and thermal shields.— Nuclear Engineering and Design, 1971, vol. 17, N 3, p. 329—340.
45. Патент США № 4245469, 1981.
46. Stepka F. S. Thermal and flow analysis of a convection, air-cooled ceramic coated porous metal concept for a turbine vanes.— ASME paper N 81-HT-48, 1981.— 7 p.
47. Мегерлин, Мэрфи, Берглес. Интенсификация теплообмена в трубах с помощью сетчатых и щеточных вставок.— Теплопередача. Сер. С, 1974, т. 96, № 2, с. 30—38.
48. Аполлонов В. В., Барчуков А. И., Бородин В. И. и др. Повышение порогов оптического разрушения металлических зеркальных поверхностей при их охлаждении через структуры с открытой пористостью.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, вып. 19, с. 1193—1197.
49. Поляев В. М., Морозова Л. Л., Харьбин Э. В., Авраамов Н. И. Интенсификация теплообмена в кольцевом канале.— Изв. вузов. Машиностроение, 1976, № 2, с. 86—90.
50. Майоров В. А., Поляев В. М., Васильев Л. Л., Киселев А. И. Интенсификация конвективного теплообмена в каналах с пористым высокотеплопроводным наполнителем. I. Теплообмен при локальном тепловом равновесии внутри пронцаемой матрицы.— ИФЖ, 1984, т. 47, № 1, с. 13—24.
51. Майоров В. А., Поляев В. М., Васильев Л. Л. Интенсификация конвективного теплообмена в каналах с пористым высокотеплопроводным наполнителем. II. Форсированный режим теплообмена.— ИФЖ, 1984, т. 47, № 2, с. 199—205.

52. Патент США № 3433299, 1967.
53. Патент США № 3323586, 1967.
54. А. с. № 486205 (СССР). Теплообменный элемент / К. П. Малюс-Малицкий, В. Н. Сальников, Э. П. Удрис.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 36.
55. Патент США № 2893703, 1959.
56. Патент США № 3262190, 1966.
57. Патент США № 3306353, 1967.
58. Патент США № 3331435, 1967.
59. Патент США № 3289756, 1966.
60. Патент США № 3415316, 1968.
61. Chisholm J. Heat transfer by porous metal transpiration panels.— Heating piping air conditioning, 1977, vol. 49, N 9, p. 85—87.
62. Майоров В. А. Структура и сопротивление двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 5, с. 126—133.
63. Майоров В. А. Интенсификация теплообмена при испарении потока в канале с пористым высокотеплопроводным наполнителем.— Промышленная теплотехника, 1981, т. 3, № 4, с. 22—28.
64. Майоров В. А. Конденсация потока пара в канале с пористым наполнителем.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1983, № 2, с. 105—109.
65. Патент Великобритании № 1526160, 1978.
66. А. с. № 494585 (СССР). Испарительный элемент / Л. Л. Васильев и др. Оpubл. в Б. И., 1975, № 45.
67. Патент США № 3394756, 1968.
68. А. с. № 504913 (СССР). Сублимационный конденсатор / В. Н. Балахонova и др.— Оpubл. в Б. И., 1976, № 8.
69. Патент США № 3168137, 1965.
70. Патент США № 3170512, 1965.
71. Патент США № 3196634, 1965.
72. А. с. № 547585 (СССР). Парогенератор / Л. Л. Васильев, О. Г. Расин.— Оpubл. в Б. И., 1977, № 7.
73. А. с. № 644997 (СССР). Парогенератор / В. И. Павленко и др.— Оpubл. в Б. И., 1979, № 4.
74. Патент США № 3359753, 1967.
75. Патент США № 3420069, 1969.
76. А. с. № 918760 (СССР). Конденсатор / В. А. Майоров.— Оpubл. в Б. И., 1982, № 13.
77. Богомолов А. И., Вигдорчик Д. Я., Маевский М. А. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение.— М.: Стройиздат, 1967.— 255 с.
78. Kihara D. H., Fox J. S., Kinoshita C. M. Temperature and velocity non-uniformity in edge cooled flat flame burners.— Combustion Science and Technology, 1975, vol. 11, N 5/6, p. 239—246.
79. Ferguson C. R., Keck J. C. Stand-off distance of a flat flame burner.— Combustion and flame, 1979, vol. 34, N 1, p. 85—98.
80. Rosner D. E. Transpiration cooling with chemical reactions.— Pyrodynamics, 1965, vol. 2, N 4, p. 221—247.
81. Gorton R. L. Analysis of the effects of using reactive coolant in porous-body cooling.— Paper ASME N 68-HT-31, 1968, p. 1—7.
82. Koh J. C. Y., del Casal E. P. Heat and mass transfer with chemical reactions for fluid flow through a porous matrix in re-entry thermal protection.— AIAA paper N 66-423, 1966, p. 1—31.
83. Сергеев Г. Т. Теплообмен проникаемых сред при пористом вдуве.— Минск: Наука и техника, 1981.— 126 с.
84. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей.— М.: Машиностроение, 1980.— 533 с.
85. А. с. № 912219 (СССР). Фильтр-теплообменник / В. А. Майоров.— Оpubл. в Б. И., 1982, № 10.
86. Беляков В. П., Куприянов В. И., Исаев А. В., Леонов В. В. Высокоэффективный криосорбционный насос новой конструкции.— В кн.: Вопросы современной криогеники. М., 1975, с. 341—359.
87. А. с. № 449172 (СССР). Криосорбционный насос / В. П. Беляков и др.— Оpubл. в Б. И., 1974, № 41.
88. Pye J. W. Component development for a 10 cm mercury ion thruster.— AIAA paper N 72-487, 1972, p. 1—10.
89. Masek T. D., Poeschel R. L., Collett C. R., Schnelker D. E. Evolution and status of the 30-cm engineering model ion thruster.— AIAA paper N 76-1006, 1976, p. 1—15.
90. Wayner P. C., Kesten A. S. Suction nucleate boiling of water.— AIChE Journal, 1965, vol. 11, N 5, p. 858—864.
91. Патент США № 2448315, 1948.
92. Крохин Ю. И., Куликов А. С. Исследование теплоотдачи при кипении криогенных жидкостей в капиллярно-пористых телах.— Труды МЭИ, 1976, вып. 310, с. 21—29.
93. А. с. № 492722 (СССР). Способ регулирования термического сопротивления герметичной системы, заполненной капиллярно-пористым материалом / Л. Л. Васи-

льев.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 43.

94. А. с. № 520729 (СССР). Электродуговой нагреватель газа / Л. Л. Васильев и др.— Оpubл. в Б. И., 1976, № 25.

95. Патент США № 3407615, 1968.

96. Патент США № 3527873, 1970.

97. А. с. № 439874 (СССР). Сверхпроводящий кабель / Л. Л. Васильев и др.— Оpubл. в Б. И., 1974, № 30.

98. Васильев Л. Л., Боброва Г. И., Танаева С. А. Пористые материалы в криогенной технике.— Минск: Наука и техника, 1979.— 222 с.

99. Эфферсон. Токовводы, охлаждаемые парами гелия.— Приборы для научных исследований, 1967, № 12, с. 82—85.

100. Патент США № 3371145, 1968.

101. Патент США № 3610809, 1971.

102. Патент США № 3636620, 1972.

103. Патент США № 4038492, 1977.

104. А. с. № 760200 (СССР). Охлаждаемый токоввод для криогенных устройств / Л. Л. Васильев и др.— Оpubл. в Б. И., 1980, № 32.

105. Сенин В. В. Вопросы расчета и конструирования токовводов с пористыми материалами для криогенного электрооборудования.— ИФЖ, 1981, т. 40, № 6, с. 1035—1045.

106. Wheatley J. C., Vieches O. E., Abel W. R. Principles and methods of dilution refrigeration.— Physics, 1968, vol. 4, N 1, p. 1—64.

107. Патент США № 3794110, 1974.

108. Сигварт, Рейбо. Расчет теплообменников для рефрижераторов смешения.— Приборы для научных исследований, 1971, т. 42, № 8, с. 3—12.

109. Пундак, Виноград, Розенбаум. Экспериментальное исследование теплообменников из спеченного медного порошка.— Приборы для научных исследований, 1973, т. 44, № 9, с. 9—14.

110. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении.— М.: Машиностроение, 1981.— 248 с.

111. Васильев Л. Л., Майоров В. А. Особенности движения капельных жидкостей в пористых материалах.— ИФЖ, 1981, т. 40, № 6, с. 1111—1123.

112. Майоров В. А. Теплопроводность пористых металлов.— В кн.: Тепло- и массообмен в системах с пористыми элементами. Минск: ИТМО АН БССР, 1981, с. 121—130.

113. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Особенности испарения потока теплоносителя в пористых металлах.— В кн.: Тепломассообмен-VI. Минск: ИТМО АН БССР, 1980, т. 4, ч. 1, с. 10—15.

114. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Структура испаряющегося потока внутри нагреваемого пористого металла.— ИФЖ, 1981, т. 41, № 6, с. 965—969.

115. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Зарождение газовых и паровых пузырьков при движении жидкости в пористых металлах.— ИФЖ, 1982, т. 42, № 4, с. 533—539.