



ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Соловьев С.А. *, Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>, solovev.sa@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Провести обзор современных высокопористых ячеистых теплообменников. *МЕТОДЫ.* Проведен широкий обзор литературы, посвященной высокопористым ячеистым структурам, применяемым в качестве теплообменников. Исследовалась как отечественная, так и зарубежная литература. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведен анализ высокопористых теплообменников различной структуры: стохастической (пены с открытыми и закрытыми ячейками) и упорядоченной (соты и решетки). Исследованы методы производства пен с открытыми/закрытыми ячейками, аддитивные технологии для производства сотовых и решетчатых структур. Описаны основные свойства высокопористых структур. Проанализированы факторы, влияющие на теплообмен и гидродинамику в высокопористых ячеистых теплообменниках. Проведен обзор областей применения высокопористых металлических теплообменников. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Теплообмен и гидродинамика в высокопористых материалах зависит от структурных параметров, таких как: пористость, размер и геометрия ячейки, диаметр и геометрия стоек. Повышение пористости и размера ячейки ведет к уменьшению коэффициента теплопередачи и перепада давления. Изменение геометрии ячейки влияет на удельную площадь поверхности теплообменника и перепад давления. Ячейки со сложной геометрией, например, октет, имеют большую площадь поверхности и обеспечивают высокий коэффициент теплопередачи, но также и оказывают высокое сопротивление потоку теплоносителя. Ячейки с простой геометрией, например, куб, напротив обеспечивают низкое сопротивление потоку и низкий коэффициент теплопередачи. В целом любое изменение структурных параметров влияет как на теплообмен, так и на гидродинамику.

Ключевые слова: теплообмен; высокопористый ячеистый материал; теплообменник; гидродинамика; обзор.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

Для цитирования: Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.

OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS

Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP.

Kazan State Power Engineering University

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>, solovev.sa@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Review modern highly porous cellular heat exchangers. *METHODS.* We conducted a broad literature review on highly porous cellular structures used as heat exchangers. We studied both domestic and foreign literature. *RESULTS.* We analyzed highly porous heat exchangers of various structures: stochastic (foam with open and closed cells) and ordered (honeycombs and lattices). Methods for producing open/closed cell foams and additive technologies for producing honeycomb and lattice structures have been studied. The basic

properties of highly porous structures are described. The factors influencing heat transfer and hydrodynamics in highly porous cellular heat exchangers are analyzed. A review of the application areas of highly porous metal heat exchangers is carried out. **CONCLUSION.** Heat transfer and hydrodynamics in highly porous materials depend on structural parameters, such as porosity, cell size and geometry, diameter, and geometry of the strands. Increasing porosity and cell size leads to a decrease in heat transfer coefficient and pressure drop. Changing the cell geometry affects the specific surface area of the heat exchanger and the pressure drop. Cells with complex geometries, such as octet, have a large surface area and provide a high heat transfer coefficient but high resistance to coolant flow. Cells with simple geometries, such as a cube, on the other hand, provide low flow resistance and low heat transfer coefficient. In general, any structural parameter change affects heat transfer and hydrodynamics.

Keywords: heat transfer; highly porous cellular material; heat exchanger; hydrodynamics; review.

Acknowledgments: The research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 21-79-10406, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/>.

For citation: Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP. OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.

Введение (Introduction)

Высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) – класс материалов с пористой структурой, обладающих низкой плотностью в сочетании с высокой удельной площадью поверхности (до $10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$) и высокой прочностью на сжатие (до 120 МПа). Ячеистые материалы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве теплообменников [1], тепло- и звукоизоляции [2, 3], фильтров [4], катализаторов [5] и т.д. В настоящей статье приведен обзор научной литературы, посвященной анализу применения ВПЯМов в качестве теплообменников.

Теплообменники являются неотъемлемой частью многих отраслей промышленности, таких как энергетика, химическая промышленность, пищевая промышленность, металлургия, нефтепереработка и т.д. Снабжение жилых, общественных и административных зданий теплом и горячей водой также осуществляется при помощи теплообменных аппаратов. От эффективности работы теплообменников зависит количество и качество производимых сырья и товаров, количество производимой тепловой и электрической энергии, качество жизни человека в целом. Одной из причин, почему специалисты в области энергетики находятся в постоянном поиске и разработке методов повышения эффективности работы теплообменников, является высокий расход топливных ресурсов на производство тепловой и электрической энергии, при этом покупка топлива является основной статьей расходов на каждом энергетическом предприятии [6]. Высокое потребление топливных ресурсов влечет за собой также и большое количество выбросов вредных веществ в атмосферу, таких как оксиды углерода, азота и серы [7]. Повышение эффективности теплообменников способствует снижению потребления топливных ресурсов, уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Турбулизация потока и повышение площади поверхности теплообмена являются основными способами повышения эффективности теплообменника [8]. Традиционные пластинчатые и трубчатые теплообменники обладают относительно небольшой площадью поверхности, а для турбулизации потока в таких теплообменниках необходимо применять оребрение или завихрители [9-11]. В этом отношении ВПЯМы имеют явное преимущество: благодаря пористой структуре, ВПЯМы обладают высокой удельной площадью поверхности и обеспечивают интенсивную турбулизацию (перемешивание) потока. Путем контроля структурных параметров ВПЯМа можно значительно увеличить удельную площадь поверхности, сохранив при этом неизменными размеры теплообменника. Таким образом, высокопористые ячеистые материалы имеют большие перспективы для замены традиционных пластинчатых и трубчатых теплообменников.

Свойства ВПЯМов определяются природой материала и его структурой. По природе материала различают полимерные, керамические, металлические и т.д. ВПЯМы, при этом полимерные ВПЯМы применяют для тепло- и звукоизоляции, а керамические и

металлические ВПЯМы – в качестве теплообменников. Существуют четыре основных вида структур высокопористых ячеистых материалов (рис. 1). Стохастические структуры называются пенами и имеют ячейки открытого или закрытого типа. Открытоячеистые пены характеризуются тем, что поры являются сообщающимися. Пены с закрытыми ячейками имеют изолированные друг от друга поры и характеризуются более высокой прочностью на сжатие и плотностью, чем открытоячеистые пены. При этом необходимо подменить, что плотность высокопористого материала зависит от его пористости, и может изменяться в широком диапазоне. Периодические ячеистые структуры имеют вид двухмерных (соты) или трехмерных решеток. Соты имеют систему продольных параллельных каналов, каждый из которого изолирован от других. Решетки, подобно пенам с открытыми ячейками, имеют сообщающиеся поры. Для теплообмена применяют ВПЯМы в виде открытоячеистой пены, соты и решетки, в то время как ВПЯМы в виде закрытоячеистой пены применяют, в основном, для теплоизоляции.

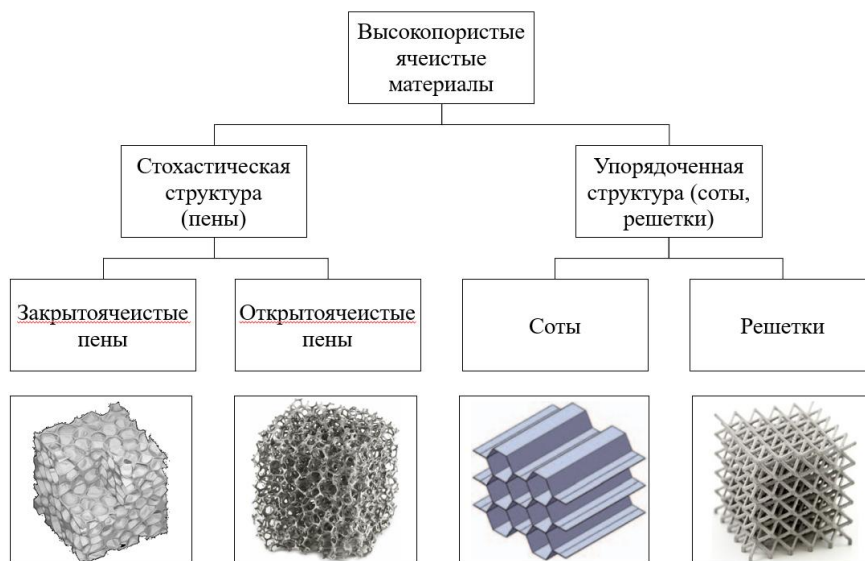


Рис. 1. Структуры высокопористых ячеистых материалов [12]

Fig. 1. Structures of highly porous cellular materials [12]

Итак, в данной статье представлен широкий обзор литературы, посвященной применению высокопористых ячеистых материалов в качестве теплообменников. Настоящая статья имеет следующую структуру:

- в первом разделе представлен обзор методов производства ВПЯМов, а именно: методы производства металлических пен с закрытыми или открытыми ячейками, аддитивные технологии для производства сотовых и решетчатых структур;
- во втором разделе представлен обзор литературы, посвященной непосредственно применению ВПЯМов как теплообменников для воздуха или воды; в данном разделе рассмотрены основные факторы, влияющие на теплообмен и гидродинамику в ВПЯМах;
- в третьем разделе представлен обзор основных направлений применения теплообменников из ВПЯМов.

Методы производства ВПЯМов (Methods for producing HPCM)

Несмотря на то, что металлические пены считаются довольно новым материалом, первое упоминание о них датируется 1925-м годом, когда французский изобретатель Де Меллер запатентовал способ получения металлической пены. Идея Де Меллера заключалась в инъекции инертного газа в расплавленный алюминий либо в добавлении вспенивающего агента, например, карбоната, к расплавленному металлу. Однако металлическая пена, получаемая вышеописанным методом, оставалась очень нестабильной. В дальнейшие годы не было зарегистрировано попыток Де Меллера развить свою идею. К задаче создания металлических пен вернулись лишь в начале 1950-х годов, но уже в США. Джон Эллиот усовершенствовал метод, описанный Де Меллером, предложив использовать в качестве пенообразователя гидриды титана или циркония. Начиная со второй половины XX века начинаются активные исследования по созданию металлических пен. Ученые из исследовательских лабораторий Бьоркстена запатентовали метод создания металлической пены, заключающийся в нагреве и непрерывном вспенивании гранулированного металла и вспенивающего агента. Карри Б. Берри из Ethyl

Corporation предложил сгущать металлический расплав перед вспениванием. Для этого через сплав пропускали кислород, воздух или двуокись углерода. Металлические пены, получаемые таким способом, отличались хорошей стабильностью [13]. В 1985-м году инженеры из компании Shinko Wire Co. Ltd. (Япония) запатентовали способ производства металлической пены путем добавления в расплавленный алюминий частиц металлического кальция. Далее расплав перемешивался и в него добавляли пенообразователь (TiH_2). Добавление частиц кальция позволило повысить вязкость расплава и стабилизировать пену, благодаря чему ученым удалось получить металлическую пену с равномерной структурой. Таким образом, первые зарегистрированные методы создания металлических пен позволяли получать структуры с закрытыми ячейками. Следует выделить пять основных методов получения металлических пен с закрытыми ячейками (рис. 2):

- вспенивание металлических расплавов при помощи пенообразователя;
- вспенивание расплавов путем инъекции газа;
- вспенивание металлических порошков;
- вспенивание армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах;
- эвтектическое затвердевание металл-газ.

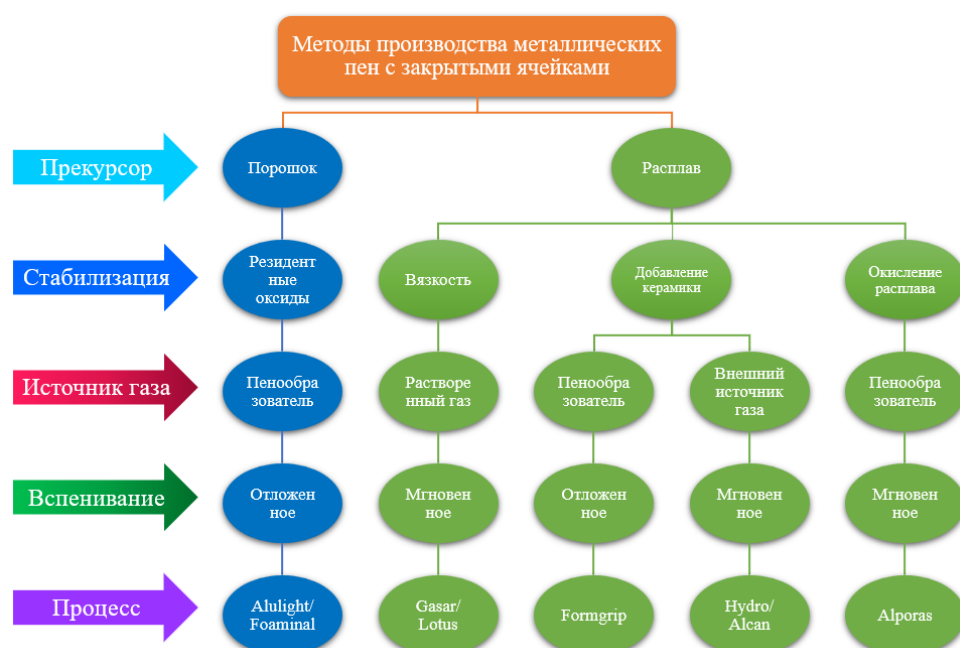


Рис. 2. Методы производства металлических пен с закрытой ячейкой [14]

Fig. 2. Methods for the production of metal foams with a closed-cell structure [14]

Идея вспенивания металлических расплавов при помощи пенообразователя принадлежит компании Shinko Wire, о которой упоминалось ранее. Процесс вспенивания проиллюстрирован на рисунке 3. На первом этапе в расплав алюминия при температуре 680 °C добавляют 1,5 мас.% металлического кальция и перемешивают в течение нескольких минут. Металлический кальций позволяет за короткое время увеличить вязкость расплава в несколько раз. Это необходимо для того, чтобы в процессе вспенивания пузырьки газа оставались стабильными, не схлопывались и не сливались друг с другом. По достижении требуемой вязкости, в расплав добавляют пенообразователь (гидрид титана) в количестве 1,6 мас.%. Под действием высокой температуры в 680 °C происходит разложение пенообразователя с выделением водорода. Расплав начинает расширяться и образуется жидкая металлическая пена. Далее сосуд с расплавом охлаждают до температуры ниже точки плавления сплава, жидкая пена затвердевает [15-17]. На рисунке 4 представлена фотография металлической пены (Alporas), полученной методом вспенивания расплава с добавлением пенообразователя.

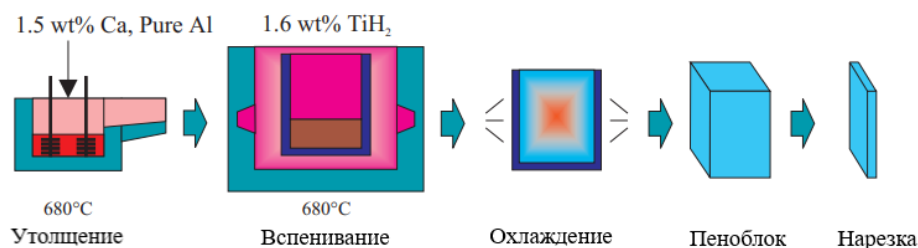


Рис. 3. Вспенивание металлического расплава при помощи пенообразователя [18]

Fig. 3. Foaming of a metal melt using a foaming agent [18]

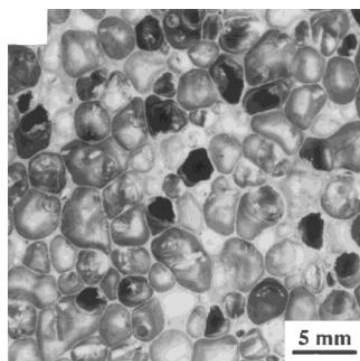


Рис. 4. Фотография металлической пены Alporas [18]

Fig. 4. Photo of Alporas metal foam [18]

Метод вспенивания расплавов путем инъекции газа был разработан инженерам компаний Sumat Corp. (Канада) и Norsk Hydro (Норвегия) примерно в одно время, независимо друг от друга. Схема реализации метода представлена на рисунке 5. Метод заключается в том, что в расплав алюминия добавляют частицы оксида магния, карбида кремния или оксида алюминия. Добавление одного из этих веществ приводит к формированию металломатричного композита. Далее в композитный расплав впрыскивается газ (воздух, азот или аргон), что приводит к образованию мелких пузырьков газа в расплаве. Смесь расплава и пузырьков газа всплывает на поверхность расплава, далее эту смесь снимают с помощью конвейера, она застывает, превращаясь в металлическую пену [19-21].

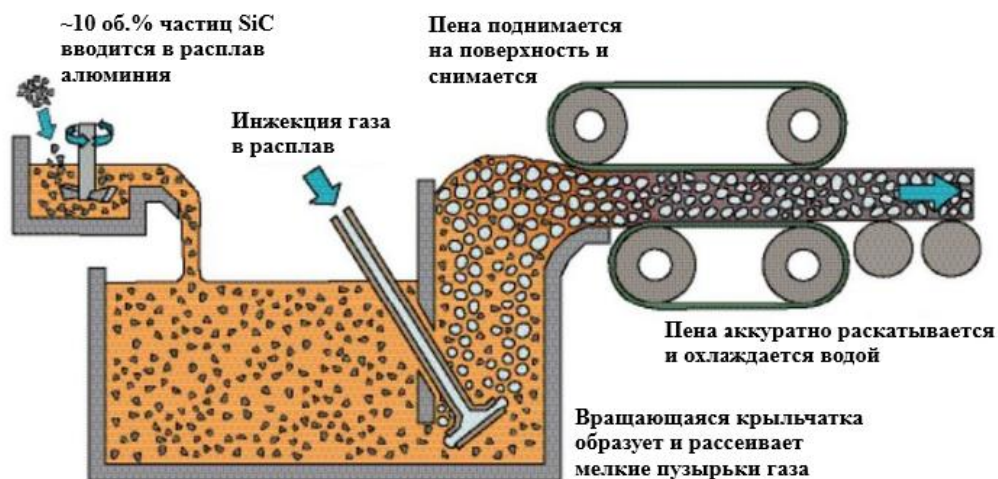


Рис. 5. Схема реализации метода вспенивания металлического расплава путем инъекции газа [22]

Fig. 5. Scheme of implementation of the method of foaming a metal melt by gas injection [22]

Третий метод производства металлической пены заключается в смешивании порошков металлов и металлических сплавов с небольшим количеством пенообразователя [23, 24]. Далее смесь уплотняют с помощью прессования или экструзии. После уплотнения смеси придают форму путем, например, прокатки или штамповки. Далее полученный полуфабрикат нагревают до температур, близких к температуре плавления металла. Пенообразователь начинает разлагаться, выделяя при этом газ. В результате смесь начинает расширяться и приобретать высокопористую структуру [25]. Схема получения металлической пены путем вспенивания металлического порошка представлена на рисунке 6. Описанный метод позволяет получать металлические

пены не только из алюминия, но также из цинка, олова, латуни и свинца.

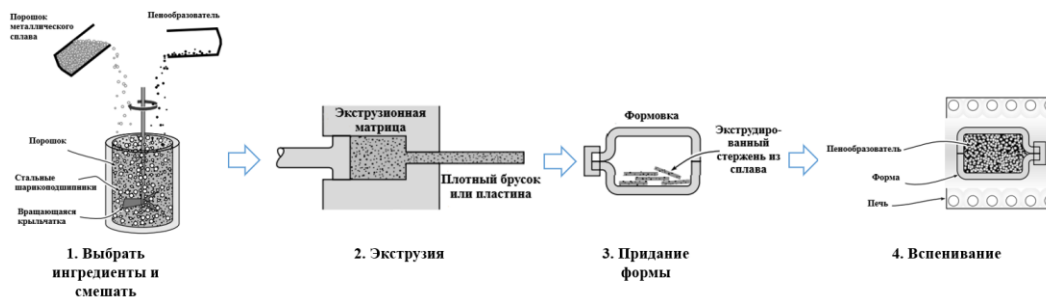


Рис. 6. Схема получения металлической пены путем вспенивания металлических порошков [26]

Метод вспенивания металлического порошка был модифицирован путем добавления частиц пенообразователя (TiH_2) в расплав алюминия с последующим отверждением расплава. Такой способ получил название «вспенивание армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах». На первом этапе порошок гидрида титана проходит обработку термическим окислением для создания оксидного барьерного слоя на поверхности частиц TiH_2 для замедления их разложения. Далее обработанный порошок гидрида титана диспергируют в постепенно охлаждаемый расплав алюминия с добавлением частиц кремния. Частицы кремния позволяют повысить стабильность пены. Далее металлический слиток, содержащий пенообразователь, нагревают до температуры плавления, при котором происходит разложение пенообразователя с выделением водорода, благодаря чему металл приобретает пористую структуру. Схема реализации процесса представлена на рисунке 7.

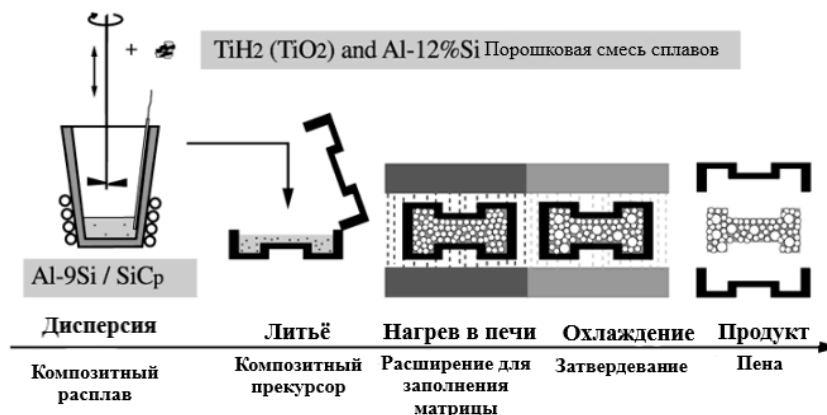


Рис. 7. Схема реализации метода вспенивания армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах [27]

Относительно новым методом производства металлических пен является эвтектическое затвердевание металл-газ. Метод основывается на том, что некоторые жидкие металлы, такие как алюминий, медь, железо, никель и т.д., образуют эвтектическую бинарную систему с газообразным водородом. В процессе эвтектического затвердевания расплав образует упорядоченную структуру с двумя фазами: металл и газ. Реализация этого метода требует использования специального оборудования (рис. 8). Аппарат представляет собой сосуд, находящийся под высоким давлением (до 50 атмосфер), который содержит тигель, нагревательный змеевик и цилиндр с водоохлаждаемой медной пластиной. В тигле происходит плавление металла с последующим затвердеванием при определенном давлении газа (1-50 атмосфер). Плавление происходит в атмосфере водорода, содержание которого контролируют путем изменения парциального давления. При последующем снижении температуры расплав претерпевает эвтектический переход в двухфазную высокопористую систему металл-газ. Отличительной особенностью этого метода является то, что поры имеют форму, удлиненную в направлении затвердевания (рис. 9).

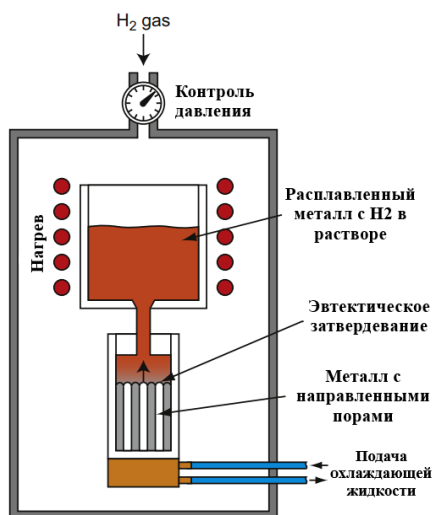


Рис. 8. Аппарат для создания металлической пены путем эвтектического затвердевания [28]

Fig. 8. An apparatus for creating metal foam by eutectic solidification [28]

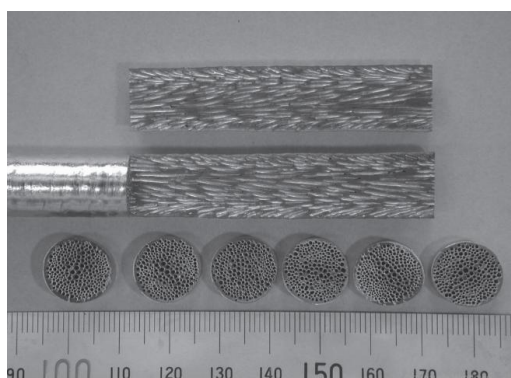


Рис. 9. Фотография металлической пены, полученной путем эвтектического затвердевания [29]

Fig. 9. Picture of metal foam obtained by eutectic solidification [29]

Пены с открытыми ячейками сочетают легкий вес, низкую плотность, высокую удельную площадь поверхности и прочность. Такие пены нашли применение во многих отраслях промышленности для интенсификации теплообмена, фильтрации газов, разделения эмульсий, звукопоглощения, поглощения энергии и т.д. Для производства металлических пен с открытыми ячейками применяют следующие методы:

- литье по выплавляемым моделям
- осаждение металла;
- инфильтрация металла;
- порошковая металлургия.

В методе литья по выплавляемой модели за основу берут полимерную губку с открытоячеистой структурой [30, 31]. Схема реализации метода представлена на рисунке 10. На первом этапе губку покрывают огнеупорным шламом, например, суспензией из гипса. После отверждения суспензии полимерную губку выжигают, получая заготовку для металлической пены. В эту заготовку вливают расплав металла, процесс происходит под давлением, чтобы расплав заполнил каждый канал в заготовке. Далее полученную форму охлаждают, после чего удаляют заготовку. В результате получается металлическая пена, имеющая практически ту же структуру, что и полимерная губка. Таким образом, структура металлической пены, изготовленной методом литья по выплавляемой модели, зависит от структуры полимерной губки. Контролируя структуру полимерной губки, можно изготавливать металлические пены с требуемыми морфологией и свойствами. Однако, у данного метода имеются ограничения: изготовить металлическую пену с мелкими порами будет очень затруднительно.

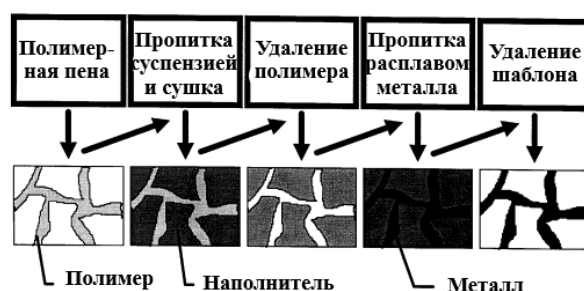


Рис. 10. Схема реализации метода литья на выплавляемой основе [32]

Fig. 10. Scheme of implementation of the lost wax casting method [32]

Метод осаждения металла также предполагает использование полимерной губки в качестве шаблона. Металл осаждается на полимерной губке гальваническим способом (электроосаждение) [33] или же путем химического осаждения [34]. При электроосаждении на полимерную губку наносится электропроводящий материал, например, графит или сажа. Металл наносится гальваническим способом. После нанесения слоя металла полимерная основа удаляется путем термообработки. В результате получается металлическая пена с открытыми порами и структурой, повторяющей структуру полимерной губки. Схема реализации способа электроосаждения приведена на рисунке 11.

При химическом осаждении получают пары металла, используя вакуумную камеру. Далее пары металла конденсируются на полимерной губке, толщина слоя металла зависит от плотности паров. После охлаждения полимерная основа также удаляется путем термической или химической обработки. Так же, как и электроосаждение, химическое осаждение позволяет производить металлические пены с полыми стержнями.

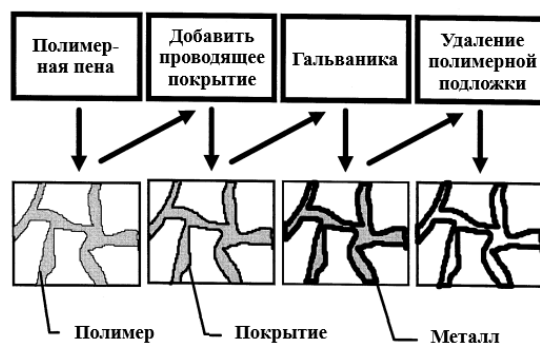


Рис. 11. Схема реализации метода электроосаждения металла на полимерной губке [32]

Fig. 11. Scheme of implementation of the method of electrodeposition of metal on a polymer sponge [32]

Метод инфильтрации металла является одним из первых методов производства открытоячеистых металлических пен. Метод инфильтрации основан на применении так называемых «держателей пространства», которые представляют собой гранулированный материал малой плотности. В качестве держателей пространства используют растворимые соли, например, NaCl [35], гранулы вермикулита [36], керамзита [37], песчаные гранулы [38] и т.д. Гранулы заливают расплавом металла под давлением для заполнения всех полостей между гранулами. После охлаждения гранулы удаляются выщелачиванием или термообработкой. Метод инфильтрации получил широкое распространение благодаря простоте и возможности создавать пены требуемой геометрии. Для этого заранее изготавливают пресс-форму из гранул [39]. На рисунке 12 представлена схема реализации метода инфильтрации металла.

Метод порошковой металлургии также подразумевает использование держателей пространства, которые смешивают с металлическим порошком, уплотняют и спекают. Металлический порошок спекают или плавят при температуре ниже температуры плавления держателей пространства. Далее держатели удаляются путем растворения или выщелачивания. В качестве держателей пространства часто применяют неорганические соли, например, NaCl или CaCl₂, которые удаляются путем растворения, такой процесс получил название спекания-растворения [40].

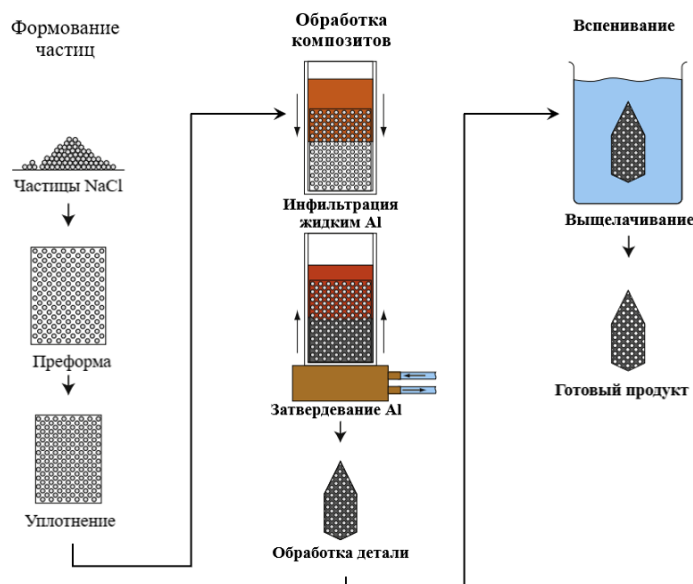


Рис. 12. Схема реализации метода инфильтрации металла [28]

Fig. 12. Scheme of implementation of the metal infiltration method [28]

Реже в качестве держателей пространства применяют сахарозу или легкоплавкую мочевины, однако в этом случае удаление держателя осуществляется путем выщелачивания перед процессом спекания [41]. Такой процесс получил название растворения-спекания. Металлическая пена, полученная методом порошковой металлургии, имеет открытую структуру, размер и форма ячеек при этом контролируется размером, формой и количеством держателя. На рисунке 13 (а) изображена схема метода спекания-растворения, на рисунке 13 (б) – схема метода растворения-спекания.

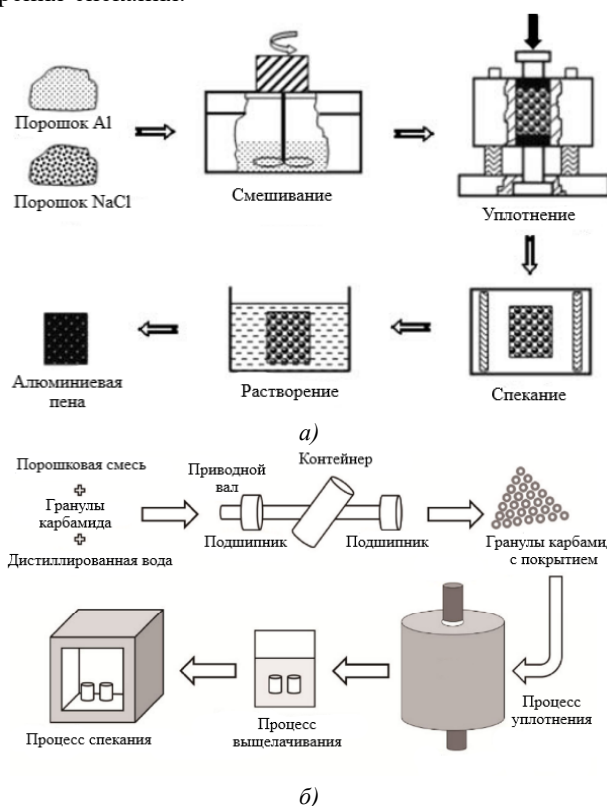


Рис. 13. Схемы реализации: (а) метода спекания-растворения [42]; (б) метода растворения-спекания [41].

Fig. 13. Implementation schemes: (a) sintering-dissolution method [42]; (b) the dissolution-sintering method [41]

Для производства пористых металлов сложной геометрии зачастую применяют аддитивные технологии, которые позволяют самостоятельно задавать форму ячеек, их

размер, толщину перегородок и т.д. Получаемые в результате структуры называют решетками или сотами. Аддитивные методы предполагают построение 3D-модели решетчатой структуры, используя современные САПР, затем структуры печатаются на 3D-принтере методами: селективного лазерного плавления [43, 44] и селективного лазерного спекания [45]. Аддитивные технологии подходят для производства решетчатых структур из титана, меди или нержавеющей стали. Алюминий обладает высокой отражательной способностью, поэтому его производство аддитивными методами нецелесообразно.

Применение 3D-печати, с одной стороны, позволяет получать металлические пористые конструкции требуемых геометрии и свойств. Однако, размер печатаемых структур ограничен размерами принтера, а сами структуры нуждаются в последующей обработке. Качество структур зависит от мощности лазера, скорости печати и параметров обработки. В связи с этим производство металлических решеток методами аддитивных технологий является дорогостоящим и не применяется в крупных масштабах.

Металлические ВПЯМы как теплообменники (*Metal HPCM as heat exchangers*)

Пористые металлы активно применяют для интенсификации теплообмена в тепловых приложениях. Металлические ВПЯМы изменяют поле течения теплоносителя и уменьшают толщину пограничного слоя. Благодаря пористой структуре теплоноситель интенсивно перемешивается, что улучшает теплообмен. При одинаковых габаритных размерах, металлические пористые теплообменники имеют в несколько раз большую площадь поверхности, чем пластинчатые теплообменники. Другим достоинством металлических ВПЯМов является низкая плотность и, следовательно, лёгкий вес, при этом сохраняются высокими прочностью и твердостью. ВПЯМы хорошо противостоят износу, влаге и термоциклированию, высокой температуре (в зависимости от материала до 500-100 °С) выдерживают тепловые удары. Все эти факторы делают металлические ВПЯМы крайне подходящими для применения в качестве теплообменников [46, 47].

Ряд исследований посвящен сравнению эффективности традиционных ребристых теплообменников с эффективностью пенометаллических теплообменников. Исследования, как правило, проводят на пучках труб, имеющих ребра или же обернутых слоем металлической пены [48-50]. Huisseune и др. [51] заявляют о повышении скорости теплоотдачи в шесть раз от труб, обернутых металлической пеной, в сравнении с трубами без металлической пены. T'Joep и др. [52] предложили новую конструкцию теплообменника, которая представляла собой ряд алюминиевых трубок 12 мм, обернутых тонким слоем металлической пены (4-8 мм). Авторы исследовали влияние толщины слоя пены и расстояния между трубками на теплогидравлические свойства теплообменника. В результате исследований авторы выяснили, что увеличение толщины слоя металлической пены способствует лишь небольшому повышению коэффициента теплоотдачи, при этом резко возрастают потери давления. В связи с этим наибольшую эффективность показали трубы, обернутые металлической пеной толщиной 4 мм. Уменьшение расстояния между трубами приводит к повышению эффективности теплообменника. Для сравнения, авторы провели аналогичные исследования на теплообменнике с трубами, имеющими спиральное оребрение. Сравнительный анализ показал, что теплообменник с пеноалюминием толщиной 4 мм показал наибольшие значения критерия оценки эффективности (РЕС). При низких скоростях потока воздуха теплообменник с металлической пеной толщиной 6-8 мм показал значения РЕС на уровне ребристого теплообменника, при высоких скоростях потока воздуха (2-7 м/с) теплообменник с металлической пеной работает намного эффективнее, чем ребристый. Увеличение толщины слоя пены приводит к росту перепада давления, в то время как скорость теплопередачи в теплообменнике с металлическим ВПЯМом преимущественно зависит от пористости, размеров ячейки и теплопроводности металла. Это означает, что существует оптимальное значение толщины слоя ВПЯМа, превышение которого сопровождается большим ростом перепада давления при незначительном увеличении скорости теплопередачи [53]. К подобному выводу пришли Odabaee и др. [54]. Авторы отметили, что при оптимальной толщине слоя металлической пены обеспечивается высокая теплопередача, а перепад давления остается на уровне ребристой трубы. Поскольку слой металлической пены увеличивает не только скорость теплопередачи, но и в значительной степени перепад давления, Alvandifar и др. [55] предложили покрывать трубы пеной не полностью, а частично. Согласно результатам исследований, частичное покрытие труб позволяет достичь примерно той же скорости теплопередачи, что и в случае полностью покрытых труб, но перепад давления при этом снижается на 60%, а количество используемой пены уменьшается на 50%, что особенно важно, учитывая высокую стоимость пенометалла. Например, стоимость медной пены

размерами 10х100х100 мм составляет от 4,5 до 5 тыс. рублей.

Среди основных характеристик пористых теплообменников выделяют пористость, проницаемость, извилистость, удельную площадь поверхности, эффективную теплопроводность и морфологические параметры.

Пористость ε – отношение объема пор к общему объему пористой среды. Высокопористые ячеистые материалы с открытыми ячейками, как правило, имеют пористость более 0.90 [56]. Другим близким по существу параметром является относительная плотность материала, которая определяется как $\rho^*=1-\varepsilon$. Способ определения относительной плотности и пористости ВПЯМа состоит в том, чтобы измерить фактический объем ВПЯМа и его массу и сравнить с массой, которую имел бы твердотельный материал ВПЯМа при данном объеме.

Проницаемость – площадь поверхности ВПЯМа, которая открыта для потока жидкости. Проницаемость зависит как от структурных параметров материала, так и от свойств жидкости [57].

Извилистость определяется как отношение фактической длины пути через пористый материал к линейной длине пути. Извилистость ВПЯМа сильно влияет на турбулентность потока и теплообмен [58].

Удельная площадь поверхности s – это площадь поверхности ВПЯМа в пределах заданного объема. Удельная площадь поверхности напрямую определяет скорость теплопередачи в ВПЯМе и является одной из ключевых характеристик пористого теплообменника [59].

Эффективная теплопроводность λ_{eff} пористого материала определяется как сумма теплопроводности твердотельной матрицы, теплопроводности газа или жидкости, занимающих пространство пор, передачи тепла конвекцией и излучением (1) [60, 61]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_c + \lambda_r, \quad (1)$$

где λ_{eff} – эффективная теплопроводность пористого материала, λ_g – теплопроводность газа или жидкости внутри пор, λ_s – теплопроводность твердотельной матрицы, λ_c характеризует перенос тепла путем конвекции внутри пор, λ_r определяет лучистый теплообмен.

Морфологические параметры, такие как размер и форма ячейки, размер и форма поры, диаметр и форма стоек, размер и форма узлов также оказывают влияние на свойства ВПЯМа. Для наглядности на рисунке 14 показаны ячейка (cell), пора (pore), стойки (strut) и узлы (node) металлической пены с открытыми ячейками. Каждая ячейка состоит из нескольких стоек, которые соединяются в узлах. Стойки и узлы составляют твердую матрицу металлической пены.

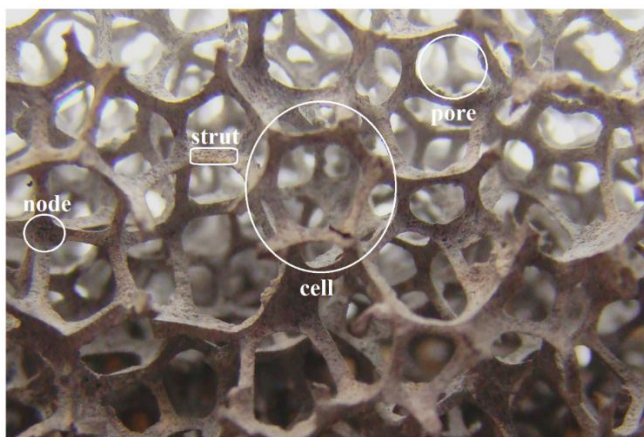


Рис. 14. Структурные параметры металлической пены [62] Fig. 14. Structural parameters of metal foam [62]

Металлические ВПЯМы активно применяют в качестве воздушных теплообменников в системах кондиционирования, для охлаждения микроэлектроники и в различных промышленных системах. Основными параметрами, по которым оценивают эффективность теплообменника, это скорость теплопередачи и перепад давления, которые зависят от природы материала, скорости воздушного потока и структурных параметров ВПЯМа (пористость, размер и форма ячеек, размер и форма стоек). Рассмотрим более подробно влияние этих характеристик на теплогидравлические

свойства теплообменника.

Одним из основных параметров, влияющих на тепловые и гидравлические свойства теплообменников, является пористость ВПЯМа [63-65]. При заданном размере ячейки увеличение пористости сопровождается уменьшением диаметра стоек, т.е., объемная доля матрицы пены снижается. Это приводит к уменьшению эффективной теплопроводности металлической пены, соответственно теплообмен между пеной и теплоносителем ухудшается. Это подтверждается результатами исследований, полученными Lu и др. [66] и представленными на рисунке 15. Yun и др. [67] экспериментально исследовали теплопередачу в решетчатых структурах с ячейками гранецентрированный куб с вертикальными стойками (FCCZ). Путем изменения толщины стоек авторы меняли пористость решетки от 0.5 до 0.9. Согласно результатам исследований, увеличение пористости ведет к снижению как коэффициента теплопередачи, так и перепада давления. Стоит отметить, что пористость в большей степени влияет на перепад давления, чем на теплопередачу: увеличение пористости с 0.5 до 0.9 способствовало снижению перепада давления более чем на 90%, коэффициент теплопередачи при этом уменьшился на 70%. Son и др. [68] провели исследования влияния пористости на эффективность теплообмена в решетчатых структурах. Согласно результатам исследований, повышение пористости с 0.75 до 0.98 способствует снижению коэффициента трения с 2.2 до 0.6, число Нуссельта при этом также снижается: с 80 до 50. Таким образом, пористость оказывает большее влияние на гидравлические характеристики решетчатой структуры, чем на тепловые.

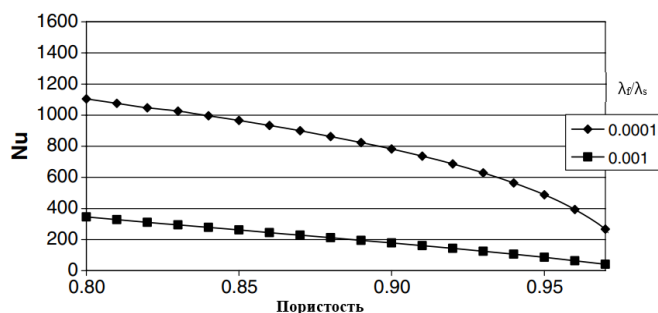


Рис. 15. Влияние пористости металлической пены на число Нуссельта, λ_f/λ_s – отношение коэффициентов теплопроводности твердого тела и жидкости [66]

Fig.15. Influence of metal foam porosity on the Nusselt number, λ_f/λ_s – fluid-solid thermal conductivity ratio [66]

Nu и др. [69] провели численные исследования зависимости коэффициента теплопередачи и значения перепада давления от пористости пенометаллического теплообменника. Исследования проводились для высоких скоростей потока газа: от 4 до 90 м/с. Пористость образцов пены составляла 0,9 и 0,95. Теплообменник с более высокой пористостью (0,95) показал более низкие значения перепада давления и коэффициента теплопередачи (рис. 16). На рисунке 15: S – sample, 10-32 – количество пор в 1 дюйме, 90-95 – пористость в процентах.

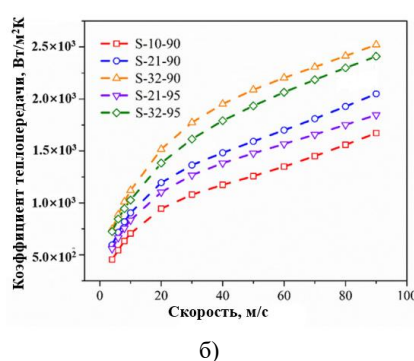
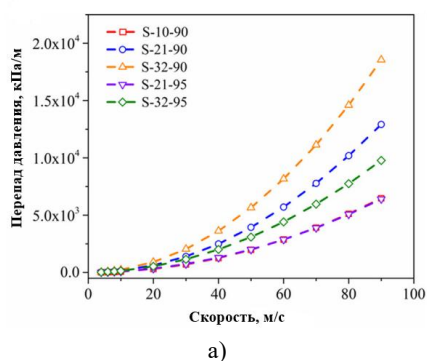


Рис. 16. Зависимость перепада давления (а) и коэффициента теплопередачи (б) от пористости образца и размера ячеек [69]

Fig. 16. Dependence of pressure drop (a) and heat transfer coefficient (b) on sample porosity and cell size [69]

Размер ячеек также является одним из ключевых параметров, влияющих на теплообмен и на гидравлику в ВПЯМах [70-73]. При фиксированной пористости

изменение размера ячейки ведет к изменению удельной площади поверхности. Например, удельная площадь поверхности никелевой пены с плотностью пор 10 PPI (pores per inch – количество пор на дюйм) и пористостью 0.9 составляет 925 м^{-1} ; удельная площадь поверхности той же пены с плотностью пор 40 PPI составляет уже 1680 м^{-1} [74]. Как известно, увеличение удельной площади поверхности способствует значительному улучшению теплообмена. Таким образом, изменение размера ячейки металлического ВПЯМа оказывает значительное влияние на его тепловые характеристики, что подтверждено многими научными исследованиями. Dixit и др. [75] экспериментально исследовали влияние размера ячейки на удельный перепад давления в медных пенах с плотностью пор 10, 20, и 30 PPI. Результаты исследований показали, что пена с 10 PPI обеспечила удельный перепад давления в 1-5 Па/м, в то время как пена с 30 PPI обеспечила удельный перепад давления 3-11 Па/м в диапазоне скоростей потока воздуха от 2,25 до 5,5 м/с. Таким образом, пены с маленькими ячейками обеспечивают больший перепад давления, соответственно требуют применения воздуходувок более высокой мощности. Nawaz и др. [76] провели экспериментальные исследования по определению тепловых и гидравлических характеристик алюминиевых пен. Образцы пен имели пористость от 0,96 до 0,99, размер ячеек составлял от 1,8 мм (40 PPI) до 4 мм (5 PPI). Результаты исследований показали, что при уменьшении размера ячеек удельный перепад давления увеличивается (рисунок 17 а). Например, при скорости воздушного потока 4 м/с, пена с ячейками 5 PPI создает удельный перепад давления, равный 3000 Па/м, пена с ячейками 40 PPI обеспечивает перепад давления уже в 15 000 Па/м. Согласно рисунку 17 (б), уменьшение размера ячейки также способствует и повышению коэффициента теплопередачи. При скорости потока воздуха 3 м/с пена с ячейками 5 PPI обеспечивает значение коэффициента теплопередачи $200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, пена с ячейками 40 PPI – $350 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, то есть в 1,75 раз выше. Таким образом, уменьшение размера ячейки с 40 до 5 PPI приводит к повышению удельного перепада давления в 5 раз, а коэффициент теплопередачи увеличивается лишь в 1,75 раз. Carpenter и др. [77] провели исследования теплообмена и гидродинамики в металлических пенах с градиентом размера ячеек. Авторы выяснили, что градиентные металлические пены, размер ячеек которых изменяется с 40 до 10 PPI в направлении потока имеют лучшие теплогидравлические характеристики, чем пены с однородной структурой и ячейками 40 PPI, но уступают пенам с ячейками 10 PPI. Авторы также пришли к выводу, что целесообразнее применять пены, размер ячеек которых увеличивается в направлении потока, так как в этом случае достигается высокий коэффициент теплопередачи (до $300 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$) при сохранении небольшой мощности прокачки.

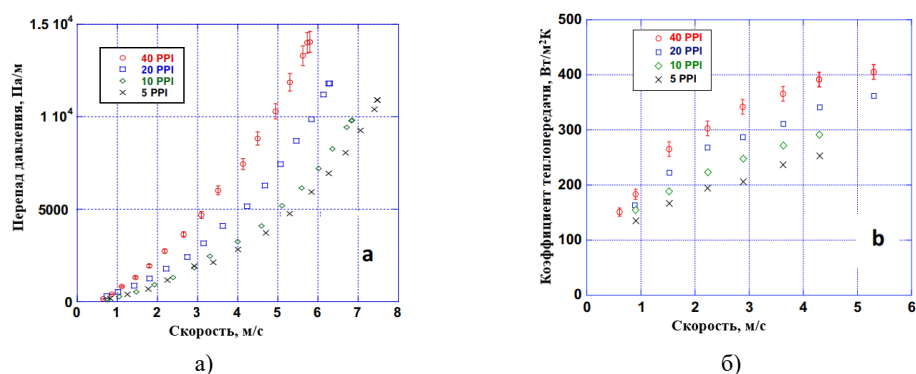


Рис. 17. Влияние размера ячейки алюминиевой пены на: а) удельный перепад давления; б) коэффициент теплопередачи [76]

Fig. 17. The influence of the cell size of aluminum foam on: a) specific pressure drop; b) heat transfer coefficient [76]

Увеличения площади поверхности теплообменника можно добиться и путем изменения формы элементарной ячейки. Контроль формы ячеек возможен для ВПЯМов с периодической структурой (решетки и соты), в то время как производить пены с заданной формой ячеек довольно проблематично. Ячейки простой формы, например, кубической, обеспечивают меньшую эффективность теплопередачи и меньший перепад давления. Ячейки более сложной формы, например, октета, имеют большую площадь поверхности и вместе с тем обеспечивают более интенсивный теплообмен и больший перепад давления. Исследованию влияния геометрии ячеек на теплообмен и гидродинамику в пористых теплообменниках посвящены работы многих ученых. Tian и др. [78] исследовали

структуры с ячейками, имеющими в поперечном сечении форму квадрата или ромба. Результаты исследований показали, что при идентичных значениях пористости, толщины стоек и размера ячейки, решетки с ячейками в форме ромба имеют на 40% большую удельную площадь поверхности, чем решетки с квадратными ячейками. Большая площадь поверхности объясняет и более высокие значения числа Нуссельта для решетки с ромбовидными ячейками. Li и др. [79] сравнили коэффициенты теплопередачи и трения в пустых металлических каналах и частично (50-75%) заполненных металлической пеной. Авторы исследовали влияние доли заполнения и размера ячеек пены на теплообмен и гидродинамику. Результаты исследований показали, что заполнение канала металлической пеной позволяет значительно повысить коэффициент теплопередачи со 100 до 250 Вт/м²К для случая 50%-го заполнения канала пеной с 40 PPI. Уменьшение размера ячеек способствует повышению как коэффициента теплопередачи, так и коэффициента трения. Интересно отметить, что увеличение доли заполнения канала металлической пеной с 50 до 75% приводит к повышению коэффициентов теплопередачи и трения примерно в 2 раза. Это объясняет тот факт, что канал с 75% наполнением металлической пены показал более высокую эффективность (значение PEC составило более 2,5). Liang и др. [80] экспериментально исследовали характеристики теплопередачи в решетчатых структурах различной геометрии: решетка Кагомэ, объемноцентрированная кубическая решетка, гранецентрированная кубическая решетка, решетка X-типа и структура со штифтовыми ребрами. Решетчатые структуры авторы создавали методом селективного лазерного плавления. Согласно результатам исследований, лучшие показатели по теплопередаче имеет решетка X-типа, а структура со штифтовыми ребрами имеет преимущества с точки зрения перепада давления. Kang и др. [81] провели исследования теплообмена в решетчатых структурах различных геометрий: октет, v-октет и октаэдр. Размеры ячеек и значение пористости задавались одинаковыми для всех исследованных структур. Авторы выяснили, что по сравнению с гладким каналом, структуры октет, v-октет и октаэдр обеспечивают в 2,96, 3,05 и 2,78 раз более высокую теплоотдачу. Yan и др. [82] исследовали влияние формы и ориентации ячеек решетчатых структур на теплообмен и перепад давления. Авторы исследовали такие структуры, как металлические пены с открытыми ячейками, металлические соты с открытыми ячейками, решетка Кагомэ, пирамидальная решетка, решетка X-типа (рис. 18) и т.д. В последнем случае авторы меняли также ориентацию решетки в пространстве (на рисунке 18: OA и OB). Результаты исследований показали, что решетка X-типа с ориентацией OB (рис. 18) имеет высокую площадь поверхности, благодаря чему обеспечивает лучшую теплопередачу, чем прочие структуры. Более того, решетка X-типа с ориентацией OB показала и самый низкий перепад давления, что делает этот тип структуры наиболее эффективным среди исследованных геометрий решеток.

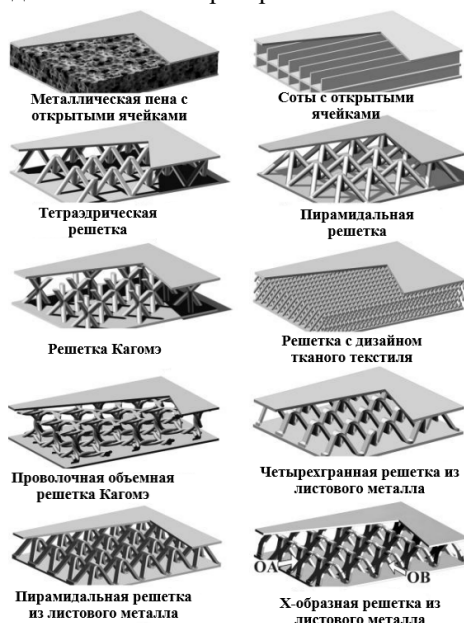


Рис. 18. Модели пористых структур, исследованных в работе [81]

Fig.18. Models of porous structures studied in [81]

Похожее исследование провели Bai и др. [83], в котором численно изучили

теплообмен в решетчатых структурах различной геометрии (Кагомэ, вертикальные штифтовые ребра, пирамидальные решетки, четырехгранные решетки, решетка с наклонными штифтами) и в металлической пене. Результаты расчетов авторы сравнили с результатами для пустого воздушного канала, без интенсификатора (рис. 19, а). Согласно проведенным расчетам, наибольший коэффициент теплопередачи соответствует структуре с четырехгранными решетками и составил $\sim 630 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, в то время как коэффициент теплопередачи пустого канала составил $\sim 90 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при скорости течения газа 11 м/с. Самые высокие показатели перепада давления (до 2300 Па) соответствуют металлической пене (рисунок 19, б). Оценка эффективности теплопередачи при равной мощности накачки показала, что наибольшую эффективность обеспечивает структура с четырехгранными решетками.

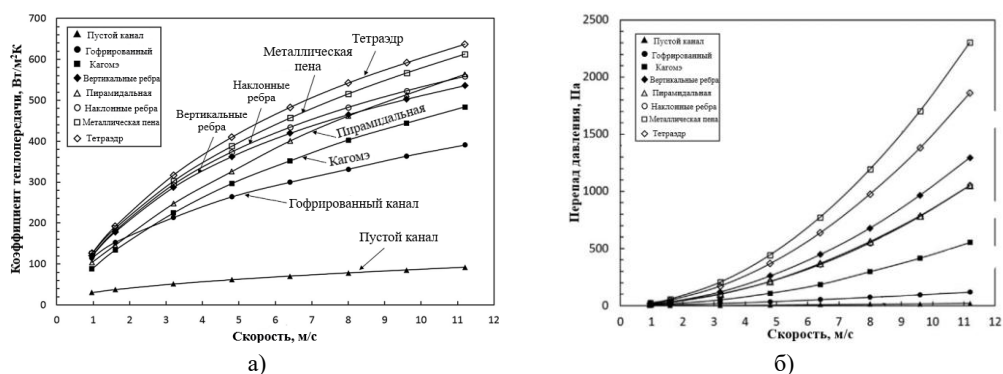


Рис. 19. Коэффициент теплопередачи (а) и падение давления (б) в пористых структурах различной геометрий в зависимости от скорости потока воздуха [83].

pressure drop (b) in porous structures of various geometries depending on the air flow rate [83].

Fig. 19. Heat transfer coefficient (a) and

Almutairi и др. [84] численно и экспериментально исследовали влияние длины ребра сотового теплообменника на характеристики теплопередачи и выяснили, что увеличение длины ребра способствует значительному улучшению теплопередачи. Wang и др. [85] провели численные исследования влияния формы ячеек металлических сотовых структур и пористости на значение эффективной теплопроводности. Согласно результатам исследований, увеличение пористости способствует снижению эффективной теплопроводности ВПЯМа. Среди исследованных форм ячеек (квадратные, ромбовидные, треугольные, Кагомэ и гофрированные) наибольшее значение теплопроводности показала структура с ромбовидными ячейками, наименьшие значения – гофрированная структура.

Другими известными на сегодняшний день параметрами, влияющими на свойства высокопористых ячеистых теплообменников, являются размер и форма стоек. Как отмечалось ранее, путем изменения размеров стоек можно контролировать пористость ВПЯМа и размер ячейки. Однако изменение формы стойки в поперечном сечении также оказывает влияние на теплогидравлические характеристики, что подтверждается исследованиями ряда авторов [86]. Liang и др. [87] провели численные и экспериментальные исследования теплообмена в решетчатых структурах, имеющих форму гранецентрированной кубической решетки. Стойки решетки имели различные геометрии: круг, эллипс и прямоугольник, а сами структуры имели равные значения пористости и площади поверхности. Авторы пришли к выводу о том, что структуры со стойками в форме эллипса обеспечивают наибольшее значение числа Нуссельта, однако этой же структуре соответствует самый высокий коэффициент трения (от 0,25 до 0,45). Решетки с круглыми стойками, наоборот, показали наименьшие значения числа Нуссельта и коэффициента трения. Несмотря на это, именно решетка с круглыми стойками продемонстрировала самую высокую общую эффективность теплопередачи благодаря наименьшему перепаду давления. Bianchi и др. [88] исследовали теплообмен в открытой ячеистой структуре с различными диаметрами и геометриями стоек (круг/треугольник). Согласно результатам параметрических расчетов, увеличение диаметра стоек в целом приводит к повышению эффективной теплопроводности ВПЯМа. При этом в случае кубической ячейки наибольшее значение теплопроводности достигается для стоек круглого сечения, в случае же ячейки Кельвина высокие значения

теплопроводности обеспечивают стойки квадратного сечения. Sarabhai и др. [89] провели исследования влияния геометрии ячейки и толщины стойки на коэффициент теплопередачи решетчатой структуры. Результаты представлены на рисунке 20 для трех различных режимов течения. Согласно представленным результатам, при ламинарном течении ($Re=1800$, рисунок 20 а) увеличение толщины стоек с 1 до 2 мм способствует снижению коэффициента теплопередачи в большинстве исследованных геометрий. В случае турбулентного режима ($Re=30000$, рисунок 20 б) изменение толщины стоек не оказывает значительного влияния на коэффициент теплопередачи. В режиме сильной турбулентности ($Re=292000$, рисунок 20 в) увеличение толщины стоек приводит к повышению коэффициента теплопередачи во всех случаях, кроме геометрии примитив.

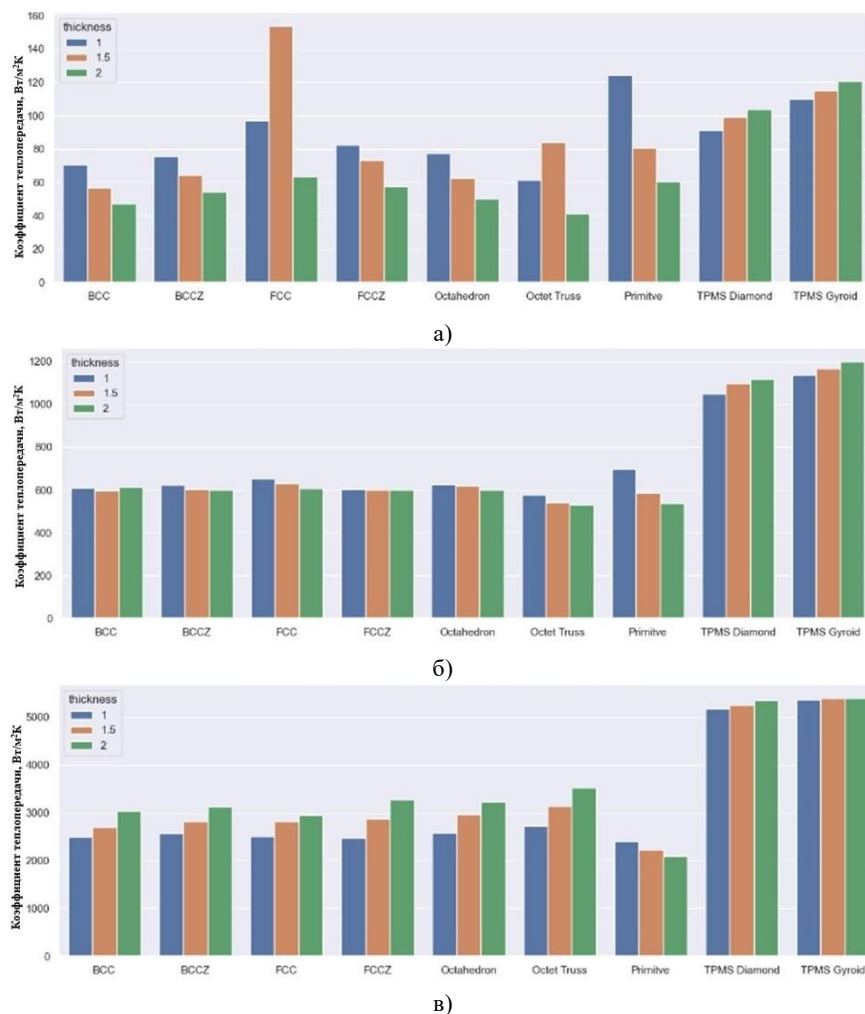


Рис. 20. Коэффициент теплопередачи для различных геометрий решетчатых структур, толщин стоек и чисел Рейнольдса: а) ламинарное течение; б) турбулентное течение; в) режим высокой турбулентности [89].

Fig. 20. Heat transfer coefficient for various geometries of lattice structures, strand thicknesses and Reynolds numbers: a) laminar flow; b) turbulent flow; c) high turbulence regime [89].

Так как методы производства металлических пен подразумевают получение пен с полыми стойками, Моон и др. [90] исследовали изменение характеристик теплопередачи в случае полых стоек в сравнении со сплошными стойками. Авторы выяснили, что при прочих фиксированных характеристиках металлические пены с полыми стойками обеспечивают на 40% меньшее число Нуссельта, чем пены со сплошными стойками.

В зависимости от природы материала ВПЯМы нашли различные применения в теплообменниках. Металлические ВПЯМы обладают эффективной высокой теплопроводностью и нашли применение в системах охлаждения в микроэлектронике, в качестве интенсификаторов теплообмена в кожухотрубных теплообменниках и т.д. Керамические ВПЯМы способны выдерживать высокие температуры до несколько сотен градусов Цельсия, и нашли применение в качестве регенеративных теплообменников в

высокотемпературных приложениях, например, при регенерации тепла отходящих газов.

Одним из основных критериев выбора материала ВПЯМа является теплопроводность. Очевидно, что ВПЯМ должен обладать высокой теплопроводностью. Второй критерий – стоимость материала. Производство ВПЯМа подразумевает высокие затраты, соответственно использование недорогого материала наиболее целесообразно. Помимо вышеперечисленных критериев, важными также являются такие параметры, как плотность материала, прочность на сжатие, прочность на изгиб. В таблице 1 представлены характеристики основных материалов, из которых изготавливаются ВПЯМы для теплотехнических приложений.

Таблица 1.

Основные характеристики пористых теплообменников						
Структура ВПЯМ	Материал	Плотность, кг/м ³	PPI / размер поры, мм	Пористость, %	Эффективная теплопроводность, Вт/мК	Ссылка
Пена	Алюминий	250	0,75-2,5 мм	–	–	[91]
Пена	Алюминий	156-227	10-30 PPI	91,6-94,2	1,34-1,54	[92]
Пена	Медь	272-992	5-25 PPI	88,9-96,9		[93]
	Никель	180-835	5-25 PPI	90,6-98,0		
Пена	FeCrAl	–	0,3-2,4 мм	85-90	0,32-0,41	[94]
Пена	Нерж. сталь	1099	20-40 PPI	86	–	[95]
Решетка	Нерж. сталь	–	0,05-0,123 мм	53,5-85,7	0,148-0,376	[96]
	Оксид алюминия	–	10-45 PPI	75-85	2,7-3,37	
Пена	Муллит	–	10-45 PPI	75-85	0,358-0,660	[97]
	OBSiC	–	10-45 PPI	75-85	1,086-2,113	

Zhao и др. [98] экспериментально исследовали свойства пен из FeCrAlY и меди. Авторы обратили внимание на то, что теплопередача в медных пенах более чувствительна к размеру ячеек, чем к плотности, а для пен FeCrAlY наблюдалась обратная картина. Обе пены показали более интенсивную теплопередачу в случае высокой плотности и малого размера ячеек пены.

Wen и др. [99] исследовали влияние материала сотового теплообменника и формы ячеек на скорость теплопередачи и перепад давления. Авторы исследовали металлические сотовые конструкции из нержавеющей стали и меди со следующими формами ячеек: квадрат, ромб, трапеция и шестиугольник. Результаты исследований показали, что перепад давления зависит в большей степени от формы ячеек и удельной площади поверхности, в то время как скорость теплопередачи коррелирует не только с морфологическими свойствами, но также с теплопроводностью материала. Сотовые ВПЯМы из меди показали в целом более высокую скорость теплопередачи, чем ВПЯМы из нержавеющей стали. Структуры с ромбовидными ячейками показали высокие значения перепада давления и скорости теплопередачи.

Сферы применения (Applications)

Металлическая пена с открытыми ячейками является хорошим интенсификатором теплообмена, потому что применяется в одно- и двухтрубных теплообменниках. Существуют разные конфигурации трубных теплообменников с металлической пеной: заполнение металлической пеной межтрубного пространства; заполнение металлической пеной внутритрубного пространства; обмотка трубы слоем металлической пены (рис. 21) [100].

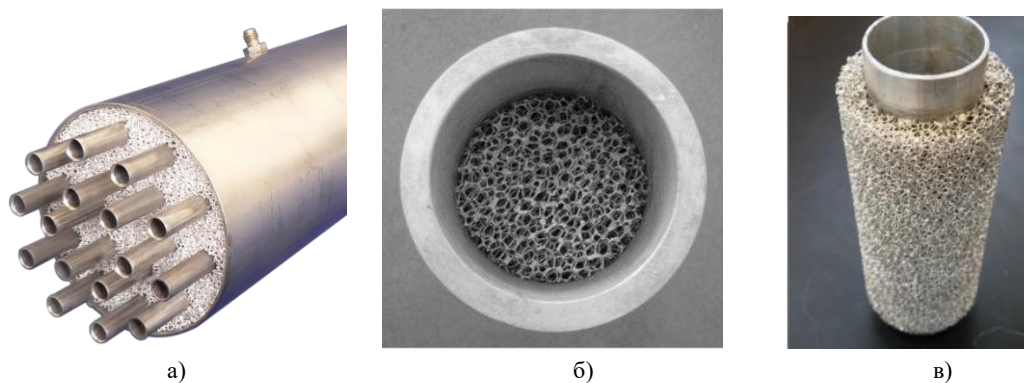


Рис. 21. Конфигурации трубных теплообменников с металлической пеной: (а) заполнение металлической пеной межтрубного пространства; (б) заполнение металлической пеной внутритрубного пространства [101]; (в) обмотка трубы слоем металлической пены [102].

Fig. 21. Configurations of tube heat exchangers with metal foam: (a) filling the inter-tube space with metal foam; (b) filling the intra-pipe space with metal foam [101]; (c) wrapping the pipe with a layer of metal foam [102].

В научных публикациях, посвященных трубным теплообменникам с металлической пеной, исследуется влияние морфологических параметров пены, высоты слоя пены, её расположение и компоновка на теплогидравлические свойства трубных теплообменников.

Zhao и др. [103] исследовали теплопередачу в теплообменнике типа «труба в трубе» и выяснили, что для повышения скорости теплопередачи следует применять пену, имеющую высокую плотность пор и небольшую пористость. Однако такая конфигурация приведет к значительному увеличению перепада давления.

Arasteh и др. [104] исследовали теплообмен в двухтрубном теплообменнике типа труба в трубе, заполненном вставками из металлической пены. Авторы использовали различные схемы распределения фиксированного объема металлической пены и исследовали теплоотдачу и перепад давления. В результате авторы выяснили, что разделение металлической пены на небольшие вставки не оказывает значительного влияния на перепад давления, так как объем пены остается фиксированным. В случае, когда пенометаллические вставки обеих труб расположены в одной вертикальной плоскости, достигаются более высокие значения теплоотдачи. Также авторы выяснили, что пены с меньшей проницаемостью показали более высокие значения показателя эффективности.

На теплообмен в трубном теплообменнике с металлической пеной внутри во многом влияют морфологические параметры пены. Пены с ячейками меньшего размера обеспечивают более высокий коэффициент теплоотдачи за счет большой площади поверхности [105]. Однако пенометаллы с маленькими ячейками создают большое сопротивление потоку, из-за чего появляется необходимость в увеличении мощности нагнетателя для прокачки теплоносителя [106-115].

Alhusseny и др. [116] предложили конструкцию двухтрубного теплообменника типа «труба в трубе», в котором для интенсификации теплообмена как во внутренней, так и во внешней трубе добавили направляющие вращающиеся лопатки из пенометалла. Авторы оценили влияние конфигурации лопаток и геометрических характеристик пены на теплообмен и гидравлику. Результаты исследований показали, что увеличение пористости пены и частоты вращения лопастей способствует повышению энергетической эффективности теплообменника.

Namzah и др. [117] провели экспериментальные исследования теплообмена в двухтрубном водо-воздушном теплообменнике типа «труба в трубе». Для интенсификации теплообмена авторы добавили в конструкцию ребра из металлической пены 40 PPI, установленные под углом 30°. Авторы сравнили характеристики теплообмена между двумя случаями с ребрами из металлической пены и без них, а также между режимами параллельного потока и противотока. Согласно результатам исследований, наибольшие значения числа Нуссельта и среднего коэффициента теплоотдачи достигаются в конструкции с ребрами из пенометалла в режиме противотока. Авторы работы [118] заявляют о повышении эффективности двухтрубного теплообменника на 37% в случае противотока в сравнении с режимом параллельного

потока. Также авторы исследовали различные конфигурации теплообменника с градиентной металлической пеной и выяснили, что максимальные значения эффективности и производительности достигаются в случае, когда размер ячеек металлической пены, расположенной во внутренней трубе, уменьшается по радиусу от центра к краю, в то время как размер ячеек металлической пены, расположенной во внешней трубе, увеличивается от центра к краю.

Chen и др. [119] путем численного моделирования сравнили теплогидравлические характеристики кожухотрубных теплообменников с цельными металлическими перегородками и с перегородками из металлической пены. Авторы выяснили, что теплообменник с перегородками из металлической пены обеспечивает характеристики теплопередачи близкие к теплообменнику с цельными перегородками. Однако пористая структура пенометалла обеспечивает более низкие значения перепада давления и эффективно уменьшает застойные зоны. Толщина перегородок также влияет на теплогидравлические свойства, в основном, за счет увеличения полезной площади поверхности перегородок. Металлические перегородки из металлической пены обеспечивают на 230–425% больший коэффициент полезности площади в сравнении с цельными металлическими перегородками.

В микроэлектронике и компьютерной технике активно применяются системы воздушного и водяного охлаждения, главными элементами которых являются радиаторы – пластинчатые теплообменники. Рост мощностей устройств микроэлектроники и микросхем требует повышения эффективности отвода тепла для обеспечения их безопасной, быстрой и надежной работы. Повышение эффективности отвода тепла осуществляется, в основном, путем увеличения площади поверхности теплообменника. В случае с пластинчатыми теплообменниками, увеличение площади поверхности сопровождается увеличением размеров и веса теплообменника, т.е. повышением его металлоемкости и стоимости. В последнее время внимание исследователей все больше обращено к высокопористым ячеистым металлам для использования в качестве теплообменников в системах охлаждения электронных устройств [120, 121]. Для увеличения площади поверхности металлической пены необходимо либо снизить ее пористость, либо увеличить плотность пор, при этом габаритные размеры и вес теплообменника изменятся незначительно. Согласно работе [122], увеличение плотности пор алюминиевой пены с 10 до 40 PPI способствовало увеличению отношения площади поверхности к объему с 790 до 2740 м⁻¹, то есть более чем в 3 раза, габаритные размеры и пористость при этом остались неизменными.

Dai и др. [123] оценили массы и объемы теплообменников различной конструкции, обеспечивающих аналогичные теплогидравлические характеристики. Авторы исследовали пластинчатый теплообменник и теплообменник с металлической пеной. Результаты исследований показали, что для обеспечения заданной скорости теплопередачи при заданной мощности вентилятора теплообменник с металлической пеной может быть значительно меньше по размерам и массе, при этом сохраняется возможность изменять площадь поверхности теплообменника в широком диапазоне.

Samudre и др. [124] провели исследования по улучшению тепловых характеристик радиаторов из металлической пены. Авторы заявляют о нецелесообразности крепления металлической пены к подложке с помощью эпоксидных клеев ввиду межфазного контактного теплового сопротивления. Для снижения контактного сопротивления авторы предложили соединять металлическую подложку и пенометалл путем термического сплавления. Результаты исследований показали, что метод соединения плавлением позволяет снизить тепловое сопротивление в 19 раз по сравнению с методом соединения с помощью эпоксидного клея. Число Нуссельта при этом возрастает на 30%, а скорость теплопередачи увеличивается в 2 раза.

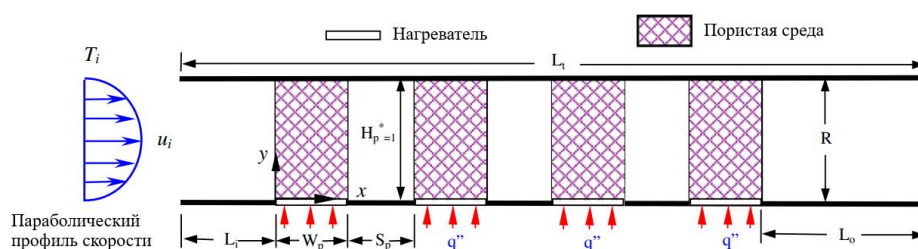
Rasam и др. [125] провели численное исследование теплообмена и гидродинамики в пенометаллическом теплообменнике системы водяного охлаждения. Авторы выяснили, что структурные параметры пены влияют как на температурный профиль, так и на градиент скорости: увеличение плотности пор при одновременном уменьшении пористости приводит к повышению градиента скорости у стенок и снижению скорости в центральной части. Снижение пористости приводит к снижению термического сопротивления, а температурный профиль становится ближе к температуре горячей стенки. Системы водяного охлаждения в целом обеспечивают более эффективное охлаждение, чем воздушные системы, однако требуют более высокой мощности на прокачку [126]. Более того, система воздушного охлаждения должна быть абсолютно герметичной, в ином случае попадание жидкости в электронное устройство может

привести к его сбою или выходу из строя.

Конфигурация теплообменника и расположение пористой среды оказывает влияние на эффективность охлаждения. В работе [127] авторы смоделировали микроканальный теплообменник для отвода тепла от центрального процессора. Теплообменник имел три различные конфигурации: пустотелый радиатор, радиатор с расположенными у внутренних стенок слоями металлической пены и радиатор со вставкой из металлической пены, занимающей всё внутреннее пространство каналов. Согласно результатам параметрических расчетов, модель радиатора с пористой вставкой обеспечивает наилучшее охлаждение: температура в корпусе радиатора с пористой вставкой на 8-9 °С ниже, чем в пустотелом радиаторе без пористой среды.

В микроканальных теплообменниках для интенсификации теплообмена применяют вставки из металлической пены. Металлическая пена создает большое сопротивление потоку, то есть перепад давления, что приводит к повышению мощности, требуемой для прокачки теплоносителя. Путем частичного заполнения каналов металлической пеной можно значительно снизить перепад давления, сохраняя высокую скорость теплопередачи.

Другим решением в снижении перепада давления является блочное расположение вставок из металлической пены (рис. 22). Chen и др. [128] разместили в канале четыре блока из металлической пены, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. В такой конфигурации основными параметрами, помимо морфологии пены, являются высота блоков и их проницаемость. В канале с большой высотой блоков металлической пены и высокой проницаемостью теплообмен будет происходить более интенсивно, но и перепад давления также будет высоким.



4. Liu J. et al. Highly porous SiC cellular ceramics for efficient high-temperature PM removal //Ceramics International. 2020. T. 46. №. 10. C. 15249-15254.
5. Liu J. et al. Fabrication of porous metal by selective laser melting as catalyst support for hydrogen production microreactor //International Journal of Hydrogen Energy. 2020. T. 45. №. 1. C. 10-22.
6. Sayah S., Hamouda A. Efficient method for estimation of smooth and nonsmooth fuel cost curves for thermal power plants //International Transactions on Electrical Energy Systems. 2018. T. 28. №. 3. C. e2498.
7. Singh G. K. et al. Atmospheric emissions from thermal (coal-fired) power plants and associated environmental impacts //Pollutants from Energy Sources: Characterization and Control. 2019. C. 53-72.
8. Babu R. et al. A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat exchanger //Materials Today: Proceedings. 2022. T. 54. C. 428-436.
9. Sharma V. R., N M., MS M. Enhanced thermal performance of tubular heat exchanger using triangular wing vortex generator //Cogent Engineering. 2022. T. 9. №. 1. C. 2050021.
10. Promvong P. et al. Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators //Energy Conversion and Management. 2010. T. 51. №. 6. C. 1242-1249.
11. Tang L. H. et al. A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel //Applied Thermal Engineering. 2016. T. 104. C. 74-84.
12. Park K. M., Min K. S., Roh Y. S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements //Materials. 2021. T. 15. №. 1. C. 97.
13. Banhart J. Light-metal foams—history of innovation and technological challenges //Advanced Engineering Materials. 2013. T. 15. №. 3. C. 82-111.
14. Rajak D. K. et al. Manufacturing methods of metal foams //An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications. 2020. C. 39-52.
15. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams //Jom. 2000. T. 52. C. 22-27.
16. Praveen Kumar T. N., Venkateswaran S., Seetharamu S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al–Si Alloy Closed Cell Foam //Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015. T. 68. C. 109-112.
17. Byakova A. et al. Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability //Procedia Materials Science. 2014. T. 4. C. 9-14.
18. Miyoshi T. et al. ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications //Advanced engineering materials. 2000. T. 2. №. 4. C. 179-183.
19. Noack M. A. et al. Aluminium foam with sub-mm sized cells produced using a rotating gas injector //Materials Science and Engineering: B. 2021. T. 273. C. 115427.
20. Wang N. e al. Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams //Materials Characterization. 2019. T. 147. C. 11-20.
21. Heim K., García-Moreno F., Banhart J. Particle size and fraction required to stabilise aluminium alloy foams created by gas injection //Scripta Materialia. 2018. T. 153. C. 54-58.
22. Banhart J. Metallic foams: challenges and opportunities //Eurofoam. 2000. T. 2000. C. 13-20.
23. Yu C. J. et al. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications //Materials Research Innovations. 1998. T. 2. №. 3. C. 181-188.
24. Yang D. et al. Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties //Journal of Manufacturing Processes. 2016. T. 22. C. 290-296.
25. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams //MRS Online Proceedings Library (OPL). 1998. T. 521. C. 121.
26. Ashby M. F. et al. Metal foams: a design guide. Elsevier, 2000.
27. Gergely V., Clyne B. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors //Advanced Engineering Materials. 2000. T. 2. №. 4. C. 175-178.
28. Goodall R., Mortensen A. Porous metals //Physical metallurgy. Elsevier, 2014. C. 2399-2595.
29. Nakajima H. Fabrication, mechanical and physical properties, and its application of lotus-type porous metals //Materials Transactions. 2019. T. 60. №. 12. C. 2481-2489.
30. Wang X. F. et al. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method //Materials Science and Technology. 2011. T. 27. №. 4. C. 800-804.
31. Kapłon H. et al. Development of open-porosity magnesium foam produced by investment casting //Journal of Magnesium and Alloys. 2022. T. 10. №. 7. C. 1941-1956.
32. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams //Progress in materials science. 2001. T. 46. №. 6. C. 559-632.
33. Zahoor A., Mourad A. H. I., Khan S. H. Production of open cell Nickel-based metal foam from polyurethane template //2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE, 2022. C. 1-6.
34. Paserin V. et al. CVD technique for Inco nickel foam production //Advanced engineering materials. 2004. T. 6. №. 6. C. 454-459.

35. Báez-Pimiento S., Hernández-Rojas M. E., Palomar-Pardavé M. E. Processing and characterization of open-cell aluminum foams obtained through infiltration processes //Procedia Materials Science. 2015. T. 9. C. 54-61.
36. Kreigh J. R., Keith G. J. Metal-aggregate product : пат. 3055763 США. 1962.
37. Puga H. et al. Influence of particle diameter in mechanical performance of Al expanded clay syntactic foams //Composite Structures. 2018. T. 184. C. 698-703.
38. Zwissler M. Verfahren zur Herstellung metallischer Schwämme //German Patent, DE. T. 197. №. 25. C. 210.
39. Wan T. et al. Fabrication of high-porosity open-cell aluminum foam via high-temperature deformation of CaCl₂ space-holders //Materials Letters. 2021. T. 284. C. 129018.
40. Jha N. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route //Materials & Design. 2013. T. 47. C. 810-819.
41. Sazegaran H., Hojati M. Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams //International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2019. T. 26. №. 5. C. 588-596.
42. Ozan S., Bilhan S. Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminum metal foam, manufactured by powder metallurgy process //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. T. 39. C. 257-260.
43. Yan C. et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting //International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. T. 62. C. 32-38.
44. Alsalla H., Hao L., Smith C. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique //Materials Science and Engineering: A. 2016. T. 669. C. 1-6.
45. Al-Ketan O. et al. On mechanical properties of cellular steel solids with shell-like periodic architectures fabricated by selective laser sintering //Journal of Engineering Materials and Technology. 2019. T. 141. №. 2. C. 021009.
46. Mahjoob S., Vafai K. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. T. 51. №. 15-16. C. 3701-3711.
47. Chumpia A., Hooman K. Performance evaluation of single tubular aluminium foam heat exchangers //Applied Thermal Engineering. 2014. T. 66. №. 1-2. C. 266-273.
48. Chen K. et al. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam //Energy Reports. 2022. T. 8. C. 103-110.
49. De Schampheleire S. et al. Thermal hydraulic performance of 10 PPI aluminium foam as alternative for louvered fins in an HVAC heat exchanger //Applied Thermal Engineering. 2013. T. 51. №. 1-2. C. 371-382.
50. Seyf H. R., Layeghi M. Numerical analysis of convective heat transfer from an elliptic pin fin heat sink with and without metal foam insert. 2010.
51. Huisseune H. et al. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. T. 89. C. 1-9.
52. T'Joan C. et al. Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. T. 53. №. 15-16. C. 3262-3274.
53. Odabae M., Hooman K., Gurgenci H. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a cylinder in cross-flow //Transport in Porous Media. 2011. T. 86. C. 911-923.
54. Odabae M., Hooman K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank //Applied Thermal Engineering. 2012. T. 36. C. 456-463.
55. Alvandifar N., Saffar-Avval M., Amani E. Partially metal foam wrapped tube bundle as a novel generation of air cooled heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. T. 118. C. 171-181.
56. Paek J. W. et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials //International Journal of Thermophysics. 2000. T. 21. C. 453-464.
57. Xiao T. et al. An analytical fractal model for permeability in isotropic open-cell metal foam with surface roughness //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 126. C. 105473.
58. Diao K., Zhang L., Zhao Y. Measurement of tortuosity of porous Cu using a diffusion diaphragm cell //Measurement. 2017. T. 110. C. 335-338.
59. Liu P. S. A new method for calculating the specific surface area of porous metal foams //Philosophical magazine letters. 2010. T. 90. №. 6. C. 447-453.
60. Soloveva O. V. et al. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies //Processes. 2022. T. 10. №. 11. C. 2257.
61. Notario B. et al. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams //Polymer. 2015. T. 56. C. 57-67.

62. De Schampheleire S. et al. How to study thermal applications of open-cell metal foam: Experiments and computational fluid dynamics //Materials. 2016. T. 9. №. 2. C. 94.
63. Lai Z., Hu H., Ding G. Effect of porosity on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in hydrophobic metal foam under dehumidifying conditions //Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. T. 96. C. 90-100.
64. Soloveva O. et al. Mathematical modelling of heat transfer in open cell foam of different porosities //Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Cham : Springer International Publishing, 2019. C. 371-382.
65. Soloveva O. et al. Estimation of energy efficiency factor for models of porous automotive heat exchangers //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1081-1088.
66. Lu W., Zhao C. Y., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes //International journal of heat and mass transfer. 2006. T. 49. №. 15-16. C. 2751-2761.
67. Yun S. et al. Heat transfer and stress characteristics of additive manufactured FCCZ lattice channel using thermal fluid-structure interaction model //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 149. C. 119187.
68. Son K. N. et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 115. C. 619-629.
69. Hu C. et al. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications //Applied Thermal Engineering. 2020. T. 180. C. 115845.
70. Kaur I., Mahajan R. L., Singh P. Generalized correlation for effective thermal conductivity of high porosity architected materials and metal foams //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. T. 200. C. 123512.
71. Tian J. et al. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels //International journal of heat and mass transfer. 2007. T. 50. №. 13-14. C. 2521-2536.
72. Lai X. et al. Analysis of heat transfer characteristics of a heat exchanger based on a lattice filling //Coatings. 2021. T. 11. №. 9. C. 1089.
73. Dixit T., Nithiarasu P., Kumar S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications //International Journal of Thermal Sciences. 2021. T. 159. C. 106607.
74. Li Y. et al. Pore-level determination of spectral reflection behaviors of high-porosity metal foam sheets //Infrared Physics & Technology. 2018. T. 89. C. 77-87.
75. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface //Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. T. 77. C. 28-37.
76. Nawaz K., Bock J., Jacobi A. M. Thermal-hydraulic performance of metal foam heat exchangers under dry operating conditions //Applied Thermal Engineering. 2017. T. 119. C. 222-232.
77. Carpenter K. P., da Silva A. K. A combined hydro-thermal characterization of high-porosity metal foam test sections with discrete pore-size gradients //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. T. 77. C. 770-776.
78. Tian J. et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. T. 47. №. 14-16. C. 3171-3186.
79. Li Y., Wang S., Zhao Y. Experimental study on heat transfer enhancement of gas tube partially filled with metal foam //Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. T. 97. C. 408-416.
80. Liang D. et al. Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by Selective Laser Melting //International Journal of Thermal Sciences. 2022. T. 172. C. 107312.
81. Kaur I., Singh P. Endwall heat transfer characteristics of octahedron family lattice-frame materials //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 127. C. 105522.
82. Yan H. et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core //Applied Thermal Engineering. 2017. T. 127. C. 1293-1304.
83. Bai X., Zheng Z., Nakayama A. Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures //International journal of heat and mass transfer. 2019. T. 143. C. 118525.
84. Almutairi M. M., Osman M., Tlili I. Thermal behavior of auxetic honeycomb structure: an experimental and modeling investigation //Journal of Energy Resources Technology. 2018. T. 140. №. 12. C. 122904.
85. Wang W. et al. Analytical design of effective thermal conductivity for fluid-saturated prismatic cellular metal honeycombs //Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2016. T. 6. №. 2. C. 69-75.
86. Kumar P., Topin F., Vicente J. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams //International Journal of Thermal Sciences. 2014. T. 81. C. 13-28.
87. Liang D. et al. Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 153. C. 119579.

88. Bianchi E., Schwieger W., Freund H. Assessment of Periodic Open Cellular Structures for Enhanced Heat Conduction in Catalytic Fixed-Bed Reactors //Advanced Engineering Materials. 2016. T. 18. №. 4. C. 608-614.
89. Sarabhai S. et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures //Materials & Design. 2023. T. 227. C. 111787.
90. Moon C. et al. Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. T. 102. C. 911-918.
91. Jing L. et al. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores //Composites Part B: Engineering. 2011. T. 42. №. 1. C. 1-10.
92. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-cell aluminium foams //Materials & Design. 2017. T. 131. C. 252-264.
93. Xiao X., Zhang P., Li M. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage //International Journal of Thermal Sciences. 2014. T. 81. C. 94-105.
94. Wulf R. et al. Experimental and numerical determination of effective thermal conductivity of open cell FeCrAl-alloy metal foams //International journal of thermal sciences. 2014. T. 86. C. 95-103.
95. Poureslami P. et al. Pore-scale convection-conduction heat transfer and fluid flow in open-cell metal foams: A three-dimensional multiple-relaxation time lattice Boltzmann (MRT-LBM) solution //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 126. C. 105465.
96. Qu Z. G. et al. A theoretical octet-truss lattice unit cell model for effective thermal conductivity of consolidated porous materials saturated with fluid //Heat and Mass Transfer. 2012. T. 48. №. 8. C. 1385-1395.
97. Randrianalisoa J. et al. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Laguerre-Voronoi tessellation method //International Journal of Thermal Sciences. 2015. T. 98. C. 277-286.
98. Zhao C. Y. et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2004. T. 18. №. 3. C. 309-317.
99. Wen T. et al. Forced convection in metallic honeycomb structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. T. 49. №. 19-20. C. 3313-3324.
100. Yang X. et al. Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube //Applied Energy. 2019. T. 239. C. 142-156.
101. Bağcı Ö. et al. Investigation of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch //Heat and Mass Transfer. 2018. T. 54. C. 2343-2349.
102. Boules D., Sharqawy M. H., Ahmed W. H. Enhancement of heat transfer from a horizontal cylinder wrapped with whole and segmented layers of metal foam //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. T. 165. C. 120675.
103. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers //International journal of heat and mass transfer. 2006. T. 49. №. 15-16. C. 2762-2770.
104. Arasteh H., Salimpour M. R., Tavakoli M. R. Optimal distribution of metal foam inserts in a double-pipe heat exchanger //International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2019. T. 29. №. 4. C. 1322-1342.
105. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes. 2009.
106. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Шакурова Р. З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. №. 1. С. 82-103.
107. Соловьев С. А., Соловьева О. В., Ахметова И. Г., Ваньков Ю. В., Шакурова Р. З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 1. С. 86-98.
108. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Талипова А. Р., Шакурова Р. З., Гилязов А. И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №. 1 (53). С. 56-64.
109. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Ваньков Ю. В., Ахметова И. Г., Шакурова Р. З., Талипова А. Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 3. С. 55-69.
110. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction //ChemEngineering. 2022. T. 6. №. 1. C. 11.

111. Soloveva O. V. et al. Study of heat transfer in models of FCC, BCC, SC and DEM porous structures with different porosities //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. T. 2373. №. 2. C. 022040.
112. Solovev S. A., Soloveva O. V., Gilmurahmanov B. Sh., Lamberov A. A. Numerical investigation of the ethylbenzene dehydrogenation reaction in a fixed bed reactor with catalyst granules of various sizes //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. T. 1399. №. 5. C. 055022.
113. Solovev S., Soloveva O. Numerical Simulation of the Operation of a Chemical Reactor with an Open Cell Foam Catalyst //XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2. Springer International Publishing, 2022. C. 23-32.
114. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1205-1210.
115. Solovev S., Soloveva O., Talipova A., Belousova, L., Sabirova, J. Study of the influence of the porosity of the fibrous material used in transport on the value of energy efficiency //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1252-1258.
116. Alhusseny A., Turan A., Nasser A. Rotating metal foam structures for performance enhancement of double-pipe heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 105. C. 124-139.
117. Hamzah J. A., Nima M. A. Experimental study of heat transfer enhancement in double-pipe heat exchanger integrated with metal foam fins //Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. T. 45. №. 7. C. 5153-5167.
118. Chen X. et al. Performance evaluation of a double-pipe heat exchanger with uniform and graded metal foams //Heat and Mass Transfer. 2020. T. 56. C. 291-302.
119. Chen T. et al. Performance evaluation of metal-foam baffle exhaust heat exchanger for waste heat recovery //Applied energy. 2020. T. 266. C. 114875.
120. Izadi A. et al. MHD enhanced nanofluid mediated heat transfer in porous metal for CPU cooling //Applied Thermal Engineering. 2020. T. 168. C. 114843.
121. Muduli S., Panigrahi U. Numerical simulation of thermal performance of porous metal heat sink for cooling the CPU //2022 International Electronics Symposium (IES). IEEE, 2022. C. 150-155.
122. Kim S. Y., Paek J. W., Kang B. H. Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air cooling //IEEE Transactions on components and packaging technologies. 2003. T. 26. №. 1. C. 262-267.
123. Dai Z. et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications //Heat Transfer Engineering. 2012. T. 33. №. 1. C. 21-30.
124. Samudre P., Kailas S. V. Thermal performance enhancement in open-pore metal foam and foam-fin heat sinks for electronics cooling //Applied Thermal Engineering. 2022. T. 205. C. 117885.
125. Rasam H. et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications //Energies. 2020. T. 13. №. 15. C. 3851.
126. Bayomy A. M., Saghir M. Z., Yousefi T. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: Experimental and numerical approach //International Journal of Thermal Sciences. 2016. T. 109. C. 182-200.
127. Wang J. et al. Simulation of hybrid nanofluid flow within a microchannel heat sink considering porous media analyzing CPU stability //Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. T. 208. C. 109734.
128. Chen C. C., Huang P. C., Hwang H. Y. Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. T. 58. №. 1-2. C. 356-373.

Авторы публикации

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, зав. каф. кафедрой «Информационные технологии и интеллектуальные системы» (ИТИС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Голубев Ярослав Павлович – инженер НИЛ «Разработка энергоэффективных

теплообменников» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Osman S. et al. The influence of high-porosity nickel foam on the transition flow regime for heat transfer and pressure drop characteristics in a rectangular channel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022; 1-10.
2. Dubil K., Wolf H., Wetzel T., Dietrich B. Development of a generalized thermal resistance model for the calculation of effective thermal conductivities in periodic open cellular structures (POCS). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 183: 122083.
3. Liu P. S., Qing H. B., Hou H. L. Primary investigation on sound absorption performance of highly porous titanium foams. *Materials & Design*. 2015; 85: 275-281.
4. Liu J. et al. Highly porous SiC cellular ceramics for efficient high-temperature PM removal. *Ceramics International*. 2020; 46 (10): 15249-15254.
5. Liu J. et al. Fabrication of porous metal by selective laser melting as catalyst support for hydrogen production microreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45 (1): 10-22.
6. Sayah S., Hamouda A. Efficient method for estimation of smooth and nonsmooth fuel cost curves for thermal power plants. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2018; 28 (3): e2498.
7. Singh G. K. et al. Atmospheric emissions from thermal (coal-fired) power plants and associated environmental impacts. *Pollutants from Energy Sources: Characterization and Control*. 2019: 53-72.
8. Babu R. et al. A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat exchanger. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 54: 428-436.
9. Sharma V. R., N M., MS M. Enhanced thermal performance of tubular heat exchanger using triangular wing vortex generator. *Cogent Engineering*. 2022; 9 (1): 2050021.
10. Promvong P. et al. Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators. *Energy Conversion and Management*. 2010; 51(6): 1242-1249.
11. Tang L. H. et al. A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 104: 74-84.
12. Park K. M., Min K. S., Roh Y. S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*. 2021; 15 (1): 97.
13. Banhart J. Light-metal foams-history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*. 2013; 15 (3): 82-111.
14. Rajak D. K. et al. Manufacturing methods of metal foams. *An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications*. 2020: 39-52.
15. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams. *Jom*. 2000; 52: 22-27.
16. Praveen Kumar T. N., Venkateswaran S., Seetharamu S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al-Si Alloy Closed Cell Foam. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015; 68: 109-112.
17. Byakova A. et al. Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability. *Procedia Materials Science*. 2014; 4: 9-14.
18. Miyoshi T. et al. ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications. *Advanced engineering materials*. 2000; 2 (4): 179-183.
19. Noack M. A. et al. Aluminium foam with sub-mm sized cells produced using a rotating gas injector. *Materials Science and Engineering: B*. 2021; 273: 115427.
20. Wang N. et al. Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams. *Materials Characterization*. 2019; 147: 11-20.
21. Heim K., García-Moreno F., Banhart J. Particle size and fraction required to stabilise aluminium alloy foams created by gas injection. *Scripta Materialia*. 2018; 153: 54-58.
22. Banhart J. Metallic foams: challenges and opportunities. *Eurofoam*. 2000: 13-20.
23. Yu C. J. et al. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications. *Materials Research Innovations*. 1998; 2 (3): 181-188.
24. Yang D. et al. Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016; 22: 290-296.
25. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 1998; 521: 121.
26. Ashby M. F. et al. Metal foams: a design guide. *Elsevier*, 2000.
27. Gergely V., Clyne B. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors. *Advanced Engineering Materials*. 2000; 2 (4): 175-178.
28. Goodall R., Mortensen A. Porous metals. Physical metallurgy. *Elsevier*. 2014: 2399-2595.
29. Nakajima H. Fabrication, mechanical and physical properties, and its application of lotus-type porous metals. *Materials Transactions*. 2019; 60 (12): 2481-2489.

30. Wang X. F. et al. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method. *Materials Science and Technology*. 2011; 27 (4): 800-804.
31. Kaplon H. et al. Development of open-porosity magnesium foam produced by investment casting. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022; 10 (7): 1941-1956.
32. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*. 2001; 46 (6): 559-632.
33. Zahoor A., Mourad A. H. I., Khan S. H. Production of open cell Nickel-based metal foam from polyurethane template. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE*. 2022; 1-6.
34. Paserin V. et al. CVD technique for Inco nickel foam production. *Advanced engineering materials*. 2004; 6 (6): 454-459.
35. Báez S., Hernández M. E., Palomar M. E. Processing and Characterization of Open-Cell Aluminum Foams Obtained through Infiltration Processes. *Procedia Mater. Sci*. 2015; 9: 54-61.
36. Kreigh J. R., Keith G. J. Metal-aggregate product: пат. 3055763 ЧИИА. 1962.
37. Puga H. et al. Influence of particle diameter in mechanical performance of Al expanded clay syntactic foams. *Composite Structures*. 2018; 184: 698-703.
38. Zwissler M. Verfahren zur Herstellung metallischer Schwämme. German Patent, DE. T. 197. №. 25. C. 210.
39. Wan T. et al. Fabrication of high-porosity open-cell aluminum foam via high-temperature deformation of CaCl₂ space-holders. *Materials Letters*. 2021; 284: 129018.
40. Jha N. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. *Materials & Design*. 2013; 47: 810-819.
41. Sazegaran H., Hojati M. Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2019; 26 (5): 588-596.
42. Ozan S., Bilhan S. Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminum metal foam, manufactured by powder metallurgy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008; 39: 257-260.
43. Yan C. et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012; 62: 32-38.
44. Alsalla H., Hao L., Smith C. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 669: 1-6.
45. Al-Ketan O. et al. On mechanical properties of cellular steel solids with shell-like periodic architectures fabricated by selective laser sintering. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2019; 141 (2): 021009.
46. Mahjoob S., Vafai K. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51 (15-16): 3701-3711.
47. Chumpia A., Hooman K. Performance evaluation of single tubular aluminium foam heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 66 (1-2): 266-273.
48. Chen K., Wang X., Chen P., Wen L. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam. *Energy Reports*. 2022; 8: 103-110.
49. De Schamphelre S. et al. Thermal hydraulic performance of 10 PPI aluminium foam as alternative for louvered fins in an HVAC heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2013; 51 (1-2): 371-382.
50. Seyf H. R., Layeghi M. Numerical analysis of convective heat transfer from an elliptic pin fin heat sink with and without metal foam insert. 2010.
51. Huisseune H. et al. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 89:1-9.
52. T'Joel C. et al. Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53 (15-16): 3262-3274.
53. Odabae M., Hooman K., Gurgenci H. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a cylinder in cross-flow. *Transport in Porous Media*. 2011; 86: 911-923.
54. Odabae M., Hooman K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 36: 456-463.
55. Alvandifar N., Saffar-Avval M., Amani E. Partially metal foam wrapped tube bundle as a novel generation of air cooled heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 118: 171-181.
56. Paek J. W. et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. *International Journal of Thermophysics*. 2000; 21: 453-464.
57. Xiao T. et al. An analytical fractal model for permeability in isotropic open-cell metal foam with surface roughness. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 126: 105473.

58. Diao K., Zhang L., Zhao Y. Measurement of tortuosity of porous Cu using a diffusion diaphragm cell. *Measurement*. 2017; 110: 335-338.
59. Liu P. S. A new method for calculating the specific surface area of porous metal foams. *Philosophical magazine letters*. 2010; 90 (6): 447-453.
60. Soloveva O. V. et al. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies. *Processes*. 2022; 10 (11): 2257.
61. Notario B. et al. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015; 56: 57-67.
62. De Schampheleire S. et al. How to study thermal applications of open-cell metal foam: Experiments and computational fluid dynamics. *Materials*. 2016; 9 (2): 94.
63. Lai Z., Hu H., Ding G. Effect of porosity on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in hydrophobic metal foam under dehumidifying conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 96: 90-100.
64. Soloveva O. et al. Mathematical modelling of heat transfer in open cell foam of different porosities. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Cham: Springer International Publishing. 2019: 371-382.
65. Soloveva O. et al. Estimation of energy efficiency factor for models of porous automotive heat exchangers. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63:1081-1088.
66. Lu W., Zhao C. Y., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes. *International journal of heat and mass transfer*. 2006; 49 (15-16): 2751-2761.
67. Yun S. et al. Heat transfer and stress characteristics of additive manufactured FCCZ lattice channel using thermal fluid-structure interaction model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 149: 119187.
68. Son K. N. et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 115: 619-629.
69. Hu C. et al. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 180: 115845.
70. Kaur I., Mahajan R. L., Singh P. Generalized correlation for effective thermal conductivity of high porosity architected materials and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023; 200: 123512.
71. Tian J. et al. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels. *International journal of heat and mass transfer*. 2007; 50 (13-14): 2521-2536.
72. Lai X. et al. Analysis of heat transfer characteristics of a heat exchanger based on a lattice filling. *Coatings*. 2021; 11 (9): 1089.
73. Dixit T., Nithiarasu P., Kumar S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021; 159: 106607.
74. Li Y. et al. Pore-level determination of spectral reflection behaviors of high-porosity metal foam sheets. *Infrared Physics & Technology*. 2018; 89: 77-87.
75. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 77: 28-37.
76. Nawaz K., Bock J., Jacobi A. M. Thermal-hydraulic performance of metal foam heat exchangers under dry operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 119: 222-232.
77. Carpenter K. P., da Silva A. K. A combined hydro-thermal characterization of high-porosity metal foam test sections with discrete pore-size gradients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 77: 770-776.
78. Tian J. et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004; T. 47. №. 14-16. C. 3171-3186.
79. Li Y., Wang S., Zhao Y. Experimental study on heat transfer enhancement of gas tube partially filled with metal foam. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 97: 408-416.
80. Liang D. et al. Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by Selective Laser Melting. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022; 172: 107312.
81. Kaur I., Singh P. Endwall heat transfer characteristics of octahedron family lattice-frame materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 127: 105522.
82. Yan H. et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 127: 1293-1304.
83. Bai X., Zheng Z., Nakayama A. Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures. *International journal of heat and mass transfer*. 2019; 143: 118525.
84. Almutairi M. M., Osman M., Tlili I. Thermal behavior of auxetic honeycomb structure: an experimental and modeling investigation. *Journal of Energy Resources Technology*. 2018; 140: 122904.

85. Wang W., Yang X., Han B., Zhang Q., Wang X., Lu T. Analytical design of effective thermal conductivity for fluid-saturated prismatic cellular metal honeycombs. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2016; 6: 69-75.
86. Kumar P., Topin F., Vicente J. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014; 81: 13-28.
87. Liang D. et al. Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;153: 119579.
88. Bianchi E., Schwieger W., Freund H. Assessment of Periodic Open Cellular Structures for Enhanced Heat Conduction in Catalytic Fixed-Bed Reactors. *Advanced Engineering Materials*. 2016; 18: 608-614.
89. Sarabhai S. et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures. *Materials & Design*. 2023; 227: 111787.
90. Moon C. et al. Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 102: 911-918.
91. Jing L. et al. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores. *Composites Part B: Engineering*. 2011; 42: 1-10.
92. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-cell aluminium foams. *Materials & Design*. 2017; 131: 252-264.
93. Xiao X., Zhang P., Li M. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014; 81: 94-105.
94. Wulf R. et al. Experimental and numerical determination of effective thermal conductivity of open cell FeCrAl-alloy metal foams. *International journal of thermal sciences*. 2014; 86: 95-103.
95. Poureslami P. et al. Pore-scale convection-conduction heat transfer and fluid flow in open-cell metal foams: A three-dimensional multiple-relaxation time lattice Boltzmann (MRT-LBM) solution. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 126: 105465.
96. Qu Z. G. et al. A theoretical octet-truss lattice unit cell model for effective thermal conductivity of consolidated porous materials saturated with fluid. *Heat and Mass Transfer*. 2012; 48: 1385-1395.
97. Randrianalisoa J. et al. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Laguerre-Voronoi tessellation method. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 98: 277-286.
98. Zhao C. Y. et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2004; 18: 309-317.
99. Wen T. et al. Forced convection in metallic honeycomb structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006; 49: 3313-3324.
100. Yang X. et al. Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube. *Applied Energy*. 2019; 239: 142-156.
101. Bağcı Ö. et al. Investigation of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch. *Heat and Mass Transfer*. 2018; 54:2343-2349.
102. Boules D., Sharqawy M. H., Ahmed W. H. Enhancement of heat transfer from a horizontal cylinder wrapped with whole and segmented layers of metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 165: 120675.
103. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers. *International journal of heat and mass transfer*. 2006; 49: 2762-2770.
104. Arasteh H., Salimpour M. R., Tavakoli M. R. Optimal distribution of metal foam inserts in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019; 29: 1322-3142.
105. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes. 2009.
106. Soloveva O. V., Solovev S. A., Shakurova R. Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(1): 82-104.
107. Solovev S.A., Soloveva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):86-98. (In Russ.)
108. Soloveva O. V., Solovev S. A., Talipova A. R., Shakurova R. Z., Gilyazov A. I. Study of the influence of the porosity of a fibrous material on the energy efficiency value. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2022;14;1 (53): 56-64.
109. Soloveva O. V., Solovev S. A., Vankov Yu. V., Akhmetova I. G., Shakurova R. Z., Talipova A. R. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):55-69. (In Russ.)

110. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction. *ChemEngineering*. 2022; 6(1): 11.
111. Soloveva O. V. et al. Study of heat transfer in models of FCC, BCC, SC and DEM porous structures with different porosities. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2022; 2373(2): 022040.
112. Solovev S. A., Soloveva O. V., Gilmurahmanov B. Sh., Lamberov A. A. Numerical investigation of the ethylbenzene dehydrogenation reaction in a fixed bed reactor with catalyst granules of various sizes. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019; 1399(5): 055022.
113. Solovev S., Soloveva O. Numerical Simulation of the Operation of a Chemical Reactor with an Open Cell Foam Catalyst. *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021" Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*, Springer International Publishing. 2022; 2: 23-32.
114. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63: 1205-1210.
115. Solovev S., Soloveva O., Talipova A., Belousova, L., Sabirova, J. Study of the influence of the porosity of the fibrous material used in transport on the value of energy efficiency. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63: 1252-1258.
116. Alhusseney A., Turan A., Nasser A. Rotating metal foam structures for performance enhancement of double-pipe heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 105: 124-139.
117. Hamzah J. A., Nima M. A. Experimental study of heat transfer enhancement in double-pipe heat exchanger integrated with metal foam fins. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020; 45(7): 5153-5167.
118. Chen X. et al. Performance evaluation of a double-pipe heat exchanger with uniform and graded metal foams. *Heat and Mass Transfer*. 2020; 56: 291-302.
119. Chen T. et al. Performance evaluation of metal-foam baffle exhaust heat exchanger for waste heat recovery. *Applied energy*. 2020; 266: 114875.
120. Izadi A. et al. MHD enhanced nanofluid mediated heat transfer in porous metal for CPU cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 168: 114843.
121. Muduli S., Panigrahi U. Numerical simulation of thermal performance of porous metal heat sink for cooling the CPU. *2022 International Electronics Symposium (IES)*. IEEE. 2022. 150-155.
122. Kim S. Y., Paek J. W., Kang B. H. Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air cooling. *IEEE Transactions on components and packaging technologies*. 2003. 26(1): 262-267.
123. Dai Z. et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications. *Heat Transfer Engineering*. 2012; 33(1): 21-30.
124. Samudre P., Kailas S. V. Thermal performance enhancement in open-pore metal foam and foam-fin heat sinks for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 205: 117885.
125. Rasam H. et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications. *Energies*. 2020; 13(15): 3851.
126. Bayomy A. M., Saghir M. Z., Yousefi T. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: Experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016; 109: 182-200.
127. Wang J. et al. Simulation of hybrid nanofluid flow within a microchannel heat sink considering porous media analyzing CPU stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022; 208: 109734.
128. Chen C. C., Huang P. C., Hwang H. Y. Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013; 58(1-2): 356-373.

Authors of the publication

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yaroslav P. Golubev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 25.09.2023 г.

Отредактировано 24.01.2024 г.

Принято 01.02.2024 г.