

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ДВУМЕРНОМ ТЕЧЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Ф.В. Пелевин¹, В.В. Лозовецкий²

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ*

² *Российский государственный университет туризма и сервиса, Москва, РФ*

Одним из перспективных и эффективных способов интенсификации теплообмена является использование в теплообменных устройствах пористых металлов (ПМ) [1,2]. Хотя заполнение теплообменного тракта пористым высокотеплопроводным металлом с малым термическим сопротивлением между стенкой и пористым каркасом максимально интенсифицирует теплообмен, но при этом наблюдается резкое увеличение гидравлического сопротивления [3,4], что сдерживает широкое применение этого метода в системах тепловой защиты и рекуперативных теплообменниках. Обычно для уменьшения потерь давления приходится идти на уменьшение скорости движения теплоносителя в ПМ за счет увеличения проходного сечения тракта, что приводит к уменьшению интенсификации теплообмена и увеличению массы и габаритов тракта.

Уменьшить потери давления, не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта, можно, если перейти от общеизвестного одномерного продольно-канального к двумерному межканальному движению теплоносителя через ПМ [5-7], рассматриваемому в данной работе.

В работе выполнено теоретическое обоснование необходимости перехода от одномерного (продольно-канального) к двумерному (межканальному) движению теплоносителя через пористый металл в теплообменных аппаратах и системах тепловой защиты.

Анализ модифицированного уравнения Дарси:

$$-dP/dZ = \alpha \mu w_{\phi} + \beta \rho w_{\phi}^2,$$

показывает:

1. Чтобы уменьшить потери давления в пористом тракте, надо уменьшать путь движения теплоносителя через ПМ, а также вязкостной и инерционной коэффициенты сопротивления пористой среды α и β .

2. Для увеличения скорости движения через ПМ при заданных потерях давления надо также уменьшать путь движения и коэффициенты сопротивления ПМ.

Уменьшить путь движения теплоносителя через ПМ l , не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта L , можно, если перейти от общеизвестного продольно-канального к межканальному движению теплоносителя через ПМ.

В работе исследовано влияние числа каналов на потери давления в трактах. Изменяя число каналов N , можно добиться требуемых скоростей фильтрации теплоносителя через ПМ, не увеличивая толщину пористого металла δ .

Теплообменный тракт с межканальной транспирацией теплоносителя (МКТТ) особенно эффективен при большой протяженности тракта ($L \gg l$), т.е. в области, где кольцевой тракт с пористым наполнителем становится малоэффективным. Увеличение безразмерного коэффициента теплоотдачи при этом составит: $Nu_{МКТТ} / Nu_{П-К} = (L/l)^{0.4}$.

Важным преимуществом тракта с МКТТ является то, что площадь проходного сечения проходного тракта возрастает не за счет увеличения поперечных габаритов тракта, а за счет большого числа подводящих и отводящих каналов N . При этом для достижения максимальной скорости движения теплоносителя приходится уменьшать толщину

пористой вставки до предельного допустимого значения, определяемого типом и технологией изготовления ПМ.

Увеличить интенсификацию теплоотдачи в тракте с пористым наполнителем можно также за счет применения более теплопроводного пористого материала, не увеличивая при этом скорость фильтрации теплоносителя. Если из конструктивных или технологических соображений замена материала пористого наполнителя на более теплопроводный невозможна, то необходимо применять ПМ с другой структурой, таким образом, чтобы теплопроводность ПМ в направлении воздействия теплового потока увеличилась.

Часто важен частный случай, когда разница в температуре пористой матрицы и теплоносителя не меняется по толщине матрицы. Такое распределение температур, как показывают численные эксперименты, достаточно характерно для установившегося режима теплообмена. В таких условиях естественно ожидать некоторое снижение теплоотдачи по сравнению, например, с постоянной по сечению температурой теплоносителя на начальном участке.

Тогда, решая уравнение теплопроводности получим:

$$\alpha_{эф} = \frac{3\lambda_m h_v \delta}{3\lambda_m + h_v \delta^2},$$

а оптимальная толщина ПМ:

$$\delta_{эф \rightarrow \max} = (3\lambda_m / h_v)^{0,5}.$$

Наличие максимума в зависимости $\alpha_{эф}(\delta)$ подтверждается численными расчетами течения и теплообмена в пористой матрице.

Максимум теплоотдачи от теплоотдающей стенки в матрицу наблюдается при $\delta = (3\lambda_m/h_v)^{0,5}$ в области развитого течения и теплообмена, и толщина матрицы не должна превышать значения $\delta_{\max} = 2,65 (\lambda_m/h_v)^{0,5}$

Выполнены экспериментальные исследования теплоотдачи в трактах с межканальной транспирацией теплоносителя через пористый сетчатый материал (ПСМ), полученный диффузионной сваркой металлических сеток в вакууме.

Установлена зависимость объемной теплоотдачи Nu_v от скорости и теплофизических свойств теплоносителя:

$$Nu_v = 10^{-3} \cdot (14 \cdot Pr - 5.5) \cdot Re^{1,22}.$$

При обработке экспериментальных данных, с целью получения критериальных зависимостей поверхностной теплоотдачи, не использовались как аргументы параметры внутренней структуры пористого материала. За линейный размер принимался эквивалентный гидравлический диаметр канала, незаполненного ПМ: $d_{экр} = 2\delta$. Такой подход позволяет повысить точность экспериментальных зависимостей.

Отмечено уменьшение теплоотдачи по сравнению с одномерным течением теплоносителя через ПМ. Это объясняется неравномерностью расхода теплоносителя по высоте ПМ. Уменьшение скорости фильтрации теплоносителя в ПМ у теплоотдающей поверхности, наличие зон в ПМ с малыми скоростями фильтрации, расположенных напротив подводящих и отводящих каналов у теплоотдающей поверхности, уменьшают теплообмен в пористом тракте с МКТТ по сравнению с кольцевым трактом заполненным ПСМ.

В исследованном диапазоне чисел Re не обнаружено заметного влияния пористости, типа сетки на теплоотдачу в тракте с МКТТ. Наблюдается незначительное увеличение теплоотдачи с увеличением пористости ПСМ. Это можно объяснить тем, что с увеличением пористости ПСМ уменьшается гидродинамическая неравномерность течения теплоносителя по высоте пористого наполнителя и у горячей охлаждаемой поверхности реализуется больший расход теплоносителя, что увеличивает теплоотдачу в тракте с МКТТ. Кроме того, с увеличением пористости ПСМ увеличивается теплоотдающая поверхность ПСМ за счет уменьшения пятен контакта между соседними сетками и,

следовательно, растет внутрипоровая теплоотдача. Но с другой стороны, при увеличении пористости уменьшается теплопроводность ПСМ, что приводит к уменьшению теплоотдачи в тракте. В результате суперпозиции этих взаимнопротивоположных факторов теплоотдача с увеличением пористости не уменьшается как в традиционном кольцевом канале, заполненном ПСМ, что положительно влияет на эффективность теплообмена в тракте с МКТТ.

Установлено, что с уменьшением относительного пути движения теплоносителя через ПСМ теплоотдача увеличивается (рис.1). Уменьшение относительного пути движения l/δ с 11,3 до 2,8 увеличило теплоотдачу примерно в 2,4 раза при прочих равных условиях.

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

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

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

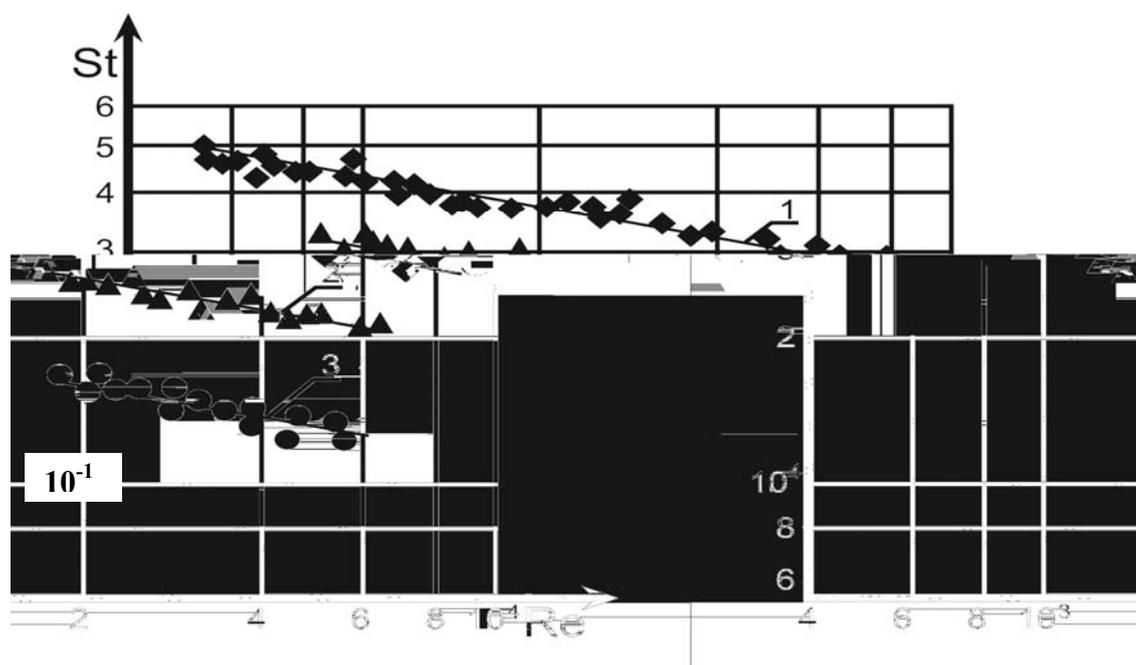


Рис.1. Зависимость теплоотдачи от относительного пути движения теплоносителя сквозь ПСМ: 1– $l/\delta=2.8$; 2– $l/\delta=4.3$; 3– $l/\delta=11.3$.

Исследовано влияние коэффициентов теплопроводности ПСМ и теплоносителя на теплоотдачу в тракте, заполненном пористым металлом. С увеличением коэффициента теплопроводности материала проволоки сетки ПСМ теплоотдача повышается. Так в результате замены нержавеющей сетки П60 на никелевую С600/2200 теплоотдача в тракте с МКТТ увеличилась на 20%. Использование медной сетки с квадратной ячейкой 0.7 еще больше повышает теплоотдачу (рис.2). Увеличение теплоотдачи будет более интенсивным, если замена материала не сопровождается изменением структуры ПСМ, так как в результате увеличения гидравлического сопротивления происходит увеличение неравномерности расхода теплоносителя по толщине ПСМ, что уменьшает теплоотдачу в тракте с МКТТ.

Использование медного ВПЯМ в трактах с МКТТ не дало ожидаемого высокого результата. Теплоотдача оказалась невысокой (рис.2). Это связано с низким коэффициентом теплопроводности ВПЯМ. Подтвердилось влияние l/δ на теплоотдачу в трактах с МКТТ, заполненных ВПЯМ.

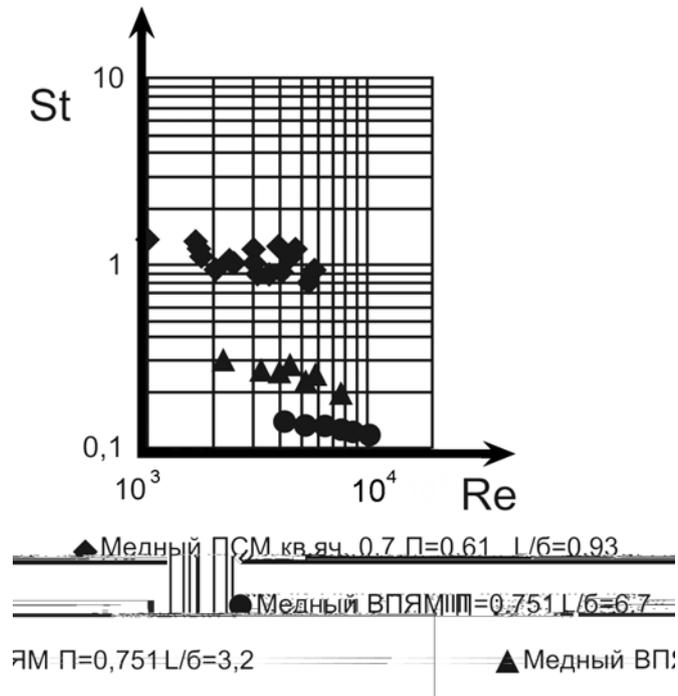


Рис.2. Теплоотдача в медном ПСМ и в ВПЯМ

Влияние коэффициента теплопроводности теплоносителя на теплоотдачу учитывается с помощью числа Pr , а влияние коэффициента теплопроводности материала сетки λ на

теплоотдачу с помощью коэффициента $\varepsilon_\lambda = \left(\frac{\lambda}{\lambda_{12X18H10T}}\right)^{0,4}$, где $\lambda_{12X18H10T}$ – коэффициент теплопроводности нержавеющей стали 12X18H10T.

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

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

и представлено на рис.3. По сравнению с каналом без пористого наполнителя увеличение теплообмена в трактах с межканальной транспирацией теплоносителя достигает шестидесяти раз для пористого сетчатого материала из нержавеющей стальных сеток и еще выше для медного пористого сетчатого материала (теплоноситель-воздух).

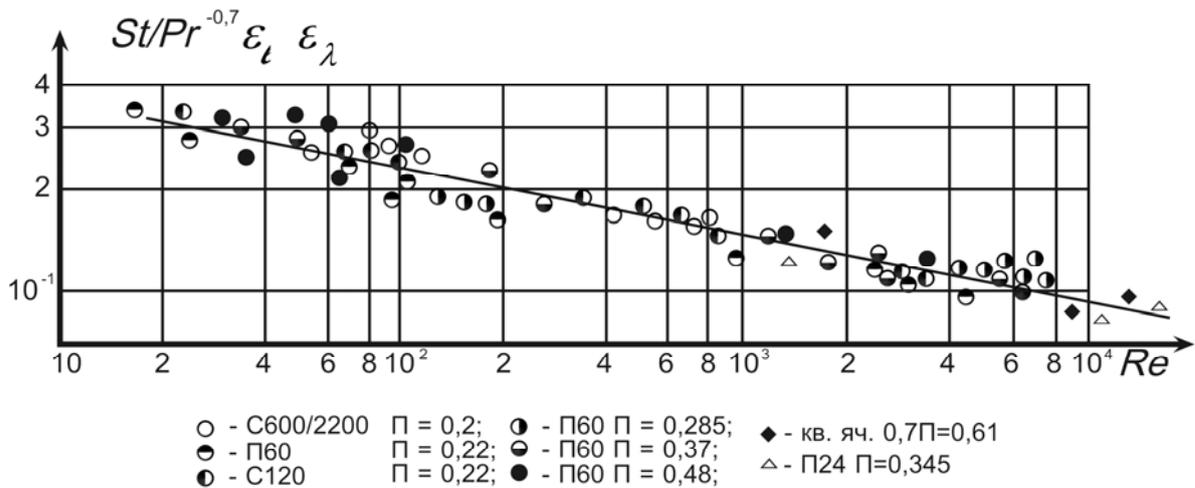


Рис.3. Теплоотдача в пористом тракте с МКТТ

Литература

- [1] Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.
- [2] Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. М.: Изд. МИФИ, 1993.- 152 с.
- [3] Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.
- [4] Пористые проницаемые материалы. Справочник. / С.В. Белов, П.А. Витязь, В.К. Шелиг и др.- М.: Металлургия, 1987.– 335с.
- [5] Пелевин Ф.В. Повышение эффективности теплообмена в пористых теплообменных трактах // Труды 1-й Российской национальной конференции по теплообмену.– М., 1994.– Т.8–С. 168–171.
- [6] Пелевин Ф.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в пористых сетчатых материалах // Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену.– М., 1998.–Т.5.–С. 254–257.
- [7]. Научные основы технологий 21 века // Леонтьев А.И, Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М., Пелевин Ф.В. и др./ М.: УНПЦ ”ЭНЕРГОМАШ” МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.