

# ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТКРЫТО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУР В КАЧЕСТВЕ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА

*М. М. Мулин, М. А. Субарев*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»

Объектом исследования данной работы являются два образца, представляющие из себя втулки, с запрессованной в осевое отверстие круглой формы открыто-пористой вставкой. Открыто-пористые вставки для всех образцов изготовлены по единой технологии из упругопроволочного материала диаметром проволоки  $\delta_{\text{пр}} = 0,42$  мм. Величины пористости образцов по результатам измерений изделий, непосредственно после изготовления, весовым методом (по массе проволочного материала) составляли соответственно  $\Pi_1 = 0,75 \pm 0,015$ ,  $\Pi_2 = 0,74 \pm 0,015$ . Толщины втулок  $L_1 = 28,8 \pm 0,2$  мм,  $L_2 = 33 \pm 0,2$  мм. Диаметры отверстий втулок составляли:  $D_1 = 40,4 \pm 0,1$  мм,  $D_2 = 38,5 \pm 0,1$  мм.

Целью данной работы является исследование возможности использования вставок из открыто-пористых структур в качестве интенсификаторов теплообмена, для применения их в высокоэффективных системах теплоотвода. Определение удельного выигрыша с точки зрения теплообмена в зависимости от режимных параметров рабочих сред.

Установка конструктивных элементов из пористых материалов при течении различных сред в каналах является эффективным способом интенсификации теплообмена за счет многократного увеличения площади теплоотводящей поверхности, контактирующей со средой. Также при определенной структуре такие вставки могут выполнять функцию струевыпрямителей и успокоителей потока жидкости или газа в установках, где важно обеспечить равномерный по сечению профиль скорости среды. При этом возникает необходимость:

- корректного определения гидравлических потерь давления на единицу длины пористого элемента, которые будут зависеть не только от режимных параметров течения, но и от характеристик пористой структуры, в частности от характерного размера пор

- предварительной оценки удельной эффективности данных интенсификаторов, так как и гидравлические и теплообменные характеристики зависят не только от режимных параметров, выбираемых сред и материалов, но и от структуры использованного пористого тела. Как правило, для новых типов пористых материалов, предварительно теоретически определить, как гидравлические, так и теплообменные свойства не представляется возможным. Однако, возможно получение эмпирических зависимостей, на основании которых можно сделать вывод об эффективности работы пористой вставки на тех, или иных режимных параметрах.

Для количественного определения эффективности теплообмена и гидравлических характеристик теплообменников с использованием вставок из открыто пористого материала, была проведена серия экспериментов на созданном на базе НГТУ им. Р. Е. Алексеева экспериментальном стенде ФТ-18. Принципиальная схема используемой части стенда представлена на рис. 1, схема установки исследуемого образца представлена на рис. 2 (обозначение на принципиальной схеме ТО)

При проведении серий экспериментов по определению гидравлических характеристик, в частности, определение критериальной зависимости  $\xi = f(\text{Re})$ , электромагнитным расходомером  $Q_2$  фиксировался объемный расход жидкости  $Q$ , термпарой  $t_{21}$  – температура жидкости  $T$  и дифференциальным манометром  $dP$  – значения перепада статического давления  $\Delta P_{\text{ст}}$  при протекании рабочей среды через образец. Потери полного давления  $\Delta P$ , характеризующие гидравлическое сопротивление образца, определялись как разность статических давлений до и после образца. Исследования проводились на жидкостном стенде, но все полученные результаты применимы согласно теории подобия и для газовых сред.

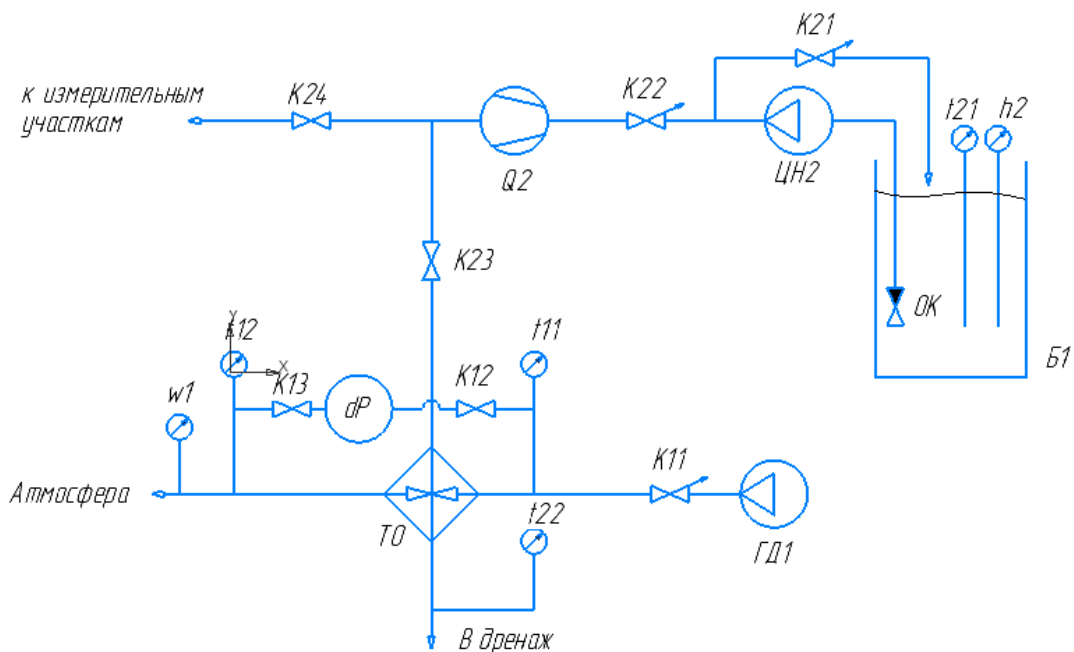


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:  $Q2$  – расходомер; ЦН2 – циркуляционный насос; ГД1 – газодувка;  $t11, t12, t21, t22$  – термомпары;  $w1$  – анемометр; ОК – обратный клапан; Б1 – бак резервуар с теплоносителем 2 контура;  $dP$  – преобразователь дифференциального давления; ТО – теплообменник с установленным исследуемым образцом;  $K11, K21, K22$  – регулирующая арматура;  $K13, K12, K23, K24$  – запорная арматура

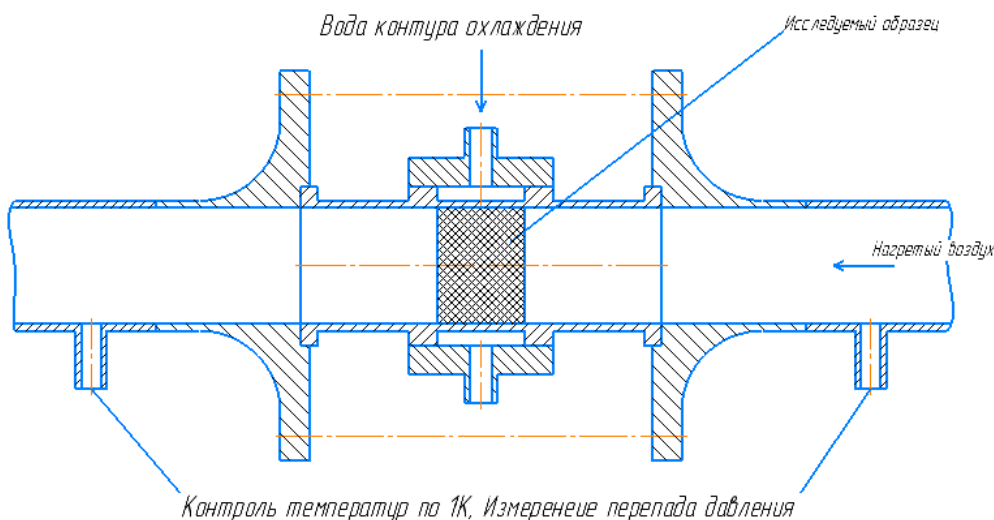


Рис. 2. Схема установки исследуемого образца

В пористых образцах движущиеся жидкости характеризуются значительными скоростями фильтрации  $V_{\phi}$ , при которых появляются инерционные эффекты сопротивления:

$$V_{\phi} = \frac{Q}{F_{\text{втулки}}} \quad (1)$$

где:  $Q$  – объёмный расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $F_{\text{втулки}}$  – площадь проходного сечения втулки,  $\text{м}^2$ .

На таких режимах, сопротивления пористых вставок представляется в виде суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих – модифицированное уравнение Дарси (уравнение Рейнольдса – Форшхеймера) [1]

$$-\frac{dP}{dZ} = \alpha \cdot \mu \cdot V_{\phi} + \beta \cdot \rho \cdot V_{\phi}^2 \quad (2)$$

где:  $P$  – давление, Па;  $Z$  – координата;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – вязкостный коэффициент сопротивления пористого материала, м<sup>-2</sup>;  $\beta$  – инерционный коэффициент сопротивления пористого материала, м<sup>-1</sup>.

Для определения критериальной зависимости  $\xi = f(\text{Re})$  используют безразмерные комплексы, полученные на основе теории подобия и размерностей по аналогии с трубной гидравликой [2]

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot V_{\text{хар}}^2} \cdot \frac{d_{\text{хар}}}{L} \quad (3)$$

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{хар}} \cdot d_{\text{хар}}}{\nu} \quad (4)$$

где:  $V_{\text{хар}}$  – характерная линейная скорость потока в порах, м/с;  $d_{\text{хар}}$  – эффективный гидравлический диаметр пористой структуры (характерный размер пор), м.

За характерную линейную скорость  $V_{\text{хар}}$  принимают среднюю скорость потока в порах, которая выражается через среднюю скорость фильтрации  $V_{\phi}$  и объемную пористость  $\Pi$ :

$$V_{\text{хар}} = \frac{Q}{F_{\text{штулки}}} \cdot \frac{1}{\Pi} \quad (5)$$

В качестве характерного размера пор используют средний размер пор с поправкой на вероятностное распределение пор по размерам:

$$d_{\text{хар}} = d_{\text{ср}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (6)$$

где  $d_{\text{ср}}$  – средний размер пор, м;  $\alpha$  – параметр функции распределения.

$$\alpha = \frac{d_{\text{ср}}^2}{\sigma^2} \quad (7)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия размеров пор.

Средний размер пор определялся по монохромному изображению продольного разреза тестового образца размером 15×80 мм, представленного на рис. 3, в соответствии с методикой [3]. Структура пористого пространства анализировалась с помощью методов математической статистики. В качестве характеристики структуры выступала функция плотности распределения размера пор  $F(l)$ . В первом приближении делалось предположение, что структура пористого тела изотропна, т. е. все сечения равнозначны и строение пор в любом сечении статистически одинаково. Измерение размера пор  $l$  проводилось вдоль параллельных прямых между любой случайной парой точек на стенках твердой структуры, ограничивающей пору.

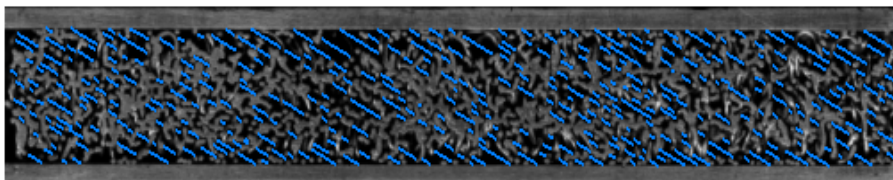


Рис. 3. Изображение продольного разреза тестового образца

Таким образом, был получен массив данных, состоящий из  $N$  измеренных величин, для длин отрезков, характеризующих размер пор. Весь диапазон полученных данных делился на  $k$  интервалов одинаковой величины  $\Delta l = l_1 - l_0 = l_2 - l_1 = \dots = l_i - l_{i-1} = \dots = l_k - l_{k-1}$  и фиксировалось попадание длины  $l$ , измеренного отрезка, в интервал  $l_i - l_{i-1}$ . Правый конец интервала относился к данному интервалу, а левый – к предыдущему, причем левый конец первого интервала исключался из рассмотрения. В итоге, в  $i$ -й интервал попадали все значения  $l$  удовлетворяющие условию:

$$l_{i-1} < l \leq l_i \quad (8)$$

Подсчитывалось количество  $n$  размеров отрезков  $l$ , попадающих в рассматриваемый интервал. В итоге была получена гистограмма относительной частоты попадания длин отрезков в соответствующий интервал, представленная на рис. 4.

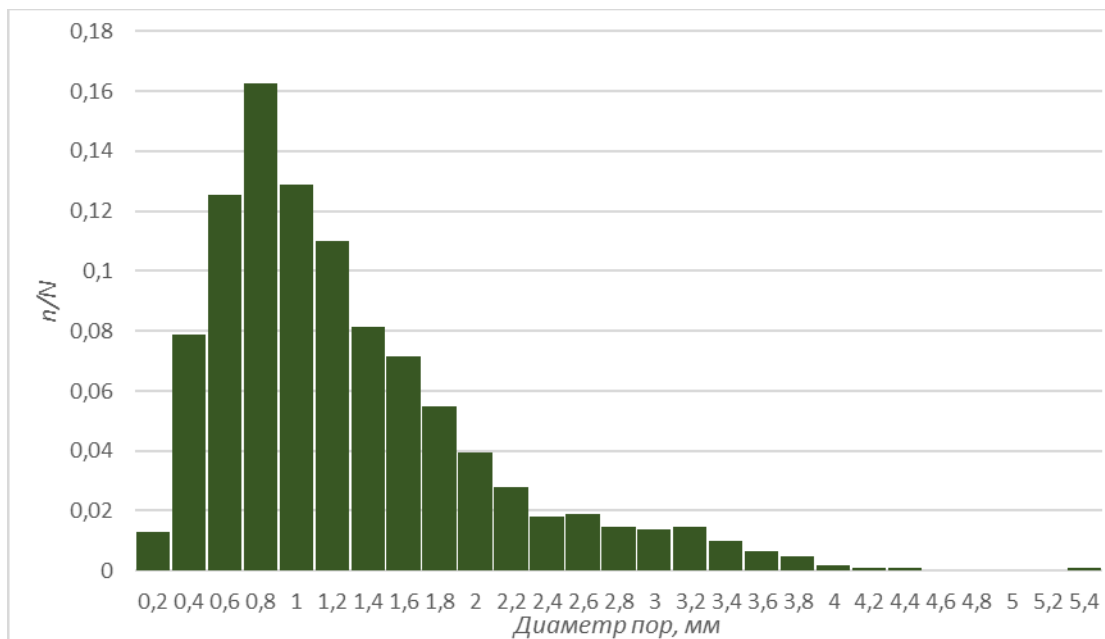


Рис. 4. Гистограмма распределения размеров пор

Если через середины вершин прямоугольников гистограммы провести кривую, то получим кривую плотности распределения размера пор  $F(l)$ . По полученным данным, были рассчитаны: средний размер поры, как среднеарифметическое  $d_{cp1} = 1,188$  мм, и дисперсия  $D = \sigma^2 = 0,583$ . Далее, по формулам (7) и (6) были определены: параметр функции распределения пор  $\alpha = 2,419$  и характерный размер пор  $d_{хар1} = 1,679$  соответственно.

В работах [2, 3], посвященных исследованию структур пористых материалов, на основе данных структурных исследований открыто-пористых вставок, предлагается определять средний размер пор при относительной величине  $L/\delta > 1$  ( $L$  – толщина пористой вставки), по формуле:

$$d_{cp} = \frac{\delta_{пр} \cdot \Pi}{(1 - \Pi)} \quad (8)$$

Значение среднего диаметра пор, полученного на основе статистического метода, отличается от значения среднего диаметра пор, определенного по формуле (8) на 5,5 %. В связи с этим, было принято решение определить средний диаметр поры для второго образца по формуле (8), оно составило  $d_{cp2} = 1,195$  мм. Далее, основываясь на том, что исследуемые пористые вставки изготавли-

вались по единой технологии, приняли одинаковым для всех исследуемых образцов параметр функции распределения пор  $\alpha = 2,419$ . По формуле (6) для второго образца получили следующий характерный размер поры:  $d_{\text{хар}2} = 1,689$ .

На основе полученных характерных размеров пор, для каждого из исследуемых образцов, по формулам (3) и (4) были получены зависимости коэффициентов гидравлического трения на единицу толщины пористых вставок в образцах от чисел Рейнольдса. Данные зависимости в логарифмической шкале представлены на рис. 5.

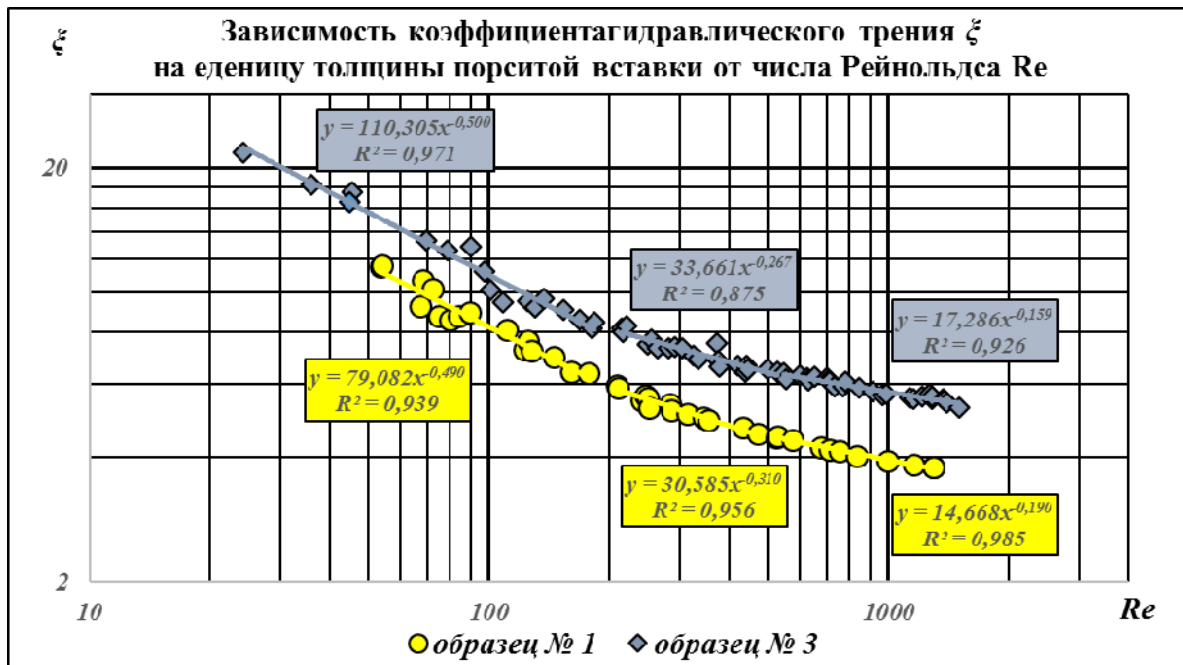


Рис. 5. Зависимости коэффициентов гидравлического трения от числа Рейнольдса для исследуемых образцов

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что гидравлические характеристики образцов с достаточно хорошей степенью точности описываются степенными функциями. Весь диапазон чисел Рейнольдса разбивался на интервалы, в рамках которых аппроксимирующая функция имела наименьшую степень отклонения от экспериментальных данных. В качестве критериев верности определения данных диапазонов выступали: величина достоверности аппроксимации  $R^2$  и изменение угла наклона аппроксимирующей кривой в логарифмическом масштабе. Таким образом, были получены следующие диапазоны чисел Рейнольдса:  $30 < Re \leq 200$ ,  $200 < Re \leq 500$ ,  $Re > 500$ , которые могут характеризовать возможную смену режимов или характера течения рабочих сред.

В диапазоне  $30 < Re \leq 200$  зависимость  $\xi(Re)$  для:

– первого образца описывается функцией вида:

$$\xi = 79,082 Re^{-0,49} \quad (9)$$

– второго образца описывается функцией вида:

$$\xi = 110,305 Re^{-0,5} \quad (10)$$

В диапазоне  $200 < Re \leq 500$  зависимость  $\xi(Re)$  для:

– первого образца описывается функцией вида:

$$\xi = 30,585 \text{Re}^{-0,31} \quad (11)$$

– второго образца описывается функцией вида:

$$\xi = 33,661 \text{Re}^{-0,267} \quad (12)$$

В диапазоне  $\text{Re} > 500$  зависимость  $\xi(\text{Re})$  для:

– первого образца описывается функцией вида:

$$\xi = 14,668 \text{Re}^{-0,19} \quad (13)$$

– второго образца описывается функцией вида:

$$\xi = 17,286 \text{Re}^{-0,159} \quad (14)$$

При проведении испытаний по исследованию теплообмена изменялся как расход воды по охлаждающему контуру, так и расход подогреваемого воздуха по контуру, содержащему пористую вставку. Фиксировались объёмный расход жидкости по контуру охлаждения  $Q$ , скорость воздуха на выходе из исследуемого участка  $w$ , значение статического перепада давления через образец  $\Delta P_{\text{ст}}$  и температуры до и после теплообменника по обоим контурам соответственно:  $t_w^{\text{in}}$ ,  $t_w^{\text{out}}$ ,  $t_a^{\text{in}}$ ,  $t_a^{\text{in}}$ . Все полученные значения являются среднерасходными.

Всего было проведено 8 серий экспериментов с различными расходами по 2 контуру. На основании полученных данных, был выполнен расчет эквивалентной площади трубы, того же сечения, необходимый, для достижения, полученного экспериментальным путем, перепада температур, при прочих равных условиях. Учитывая, что для каждого исследуемого образца длина пористой вставки известна, можно сказать, что отношение эквивалентной длины трубопровода, необходимого для достижения необходимой эквивалентной площади и длины пористой вставки есть выигрыш с точки зрения теплообмена  $a = \frac{L_{\text{ЭКВ}}}{L}$ . Данное отношение представлено на рис. 6. Также, необходимо учесть, и проигрыш с точки зрения гидравлических потерь. Зная эквивалентную длину, и режим течения, можно вычислить теоретические потери на трении в данном трубопроводе. Отношение потерь на местное сопротивление в виде пористой вставки и потерь на трение в эквивалентном трубопроводе  $b = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{ЭКВ}}}$  есть проигрыш с точки зрения гидравлики. Данное отношение представлено на рис. 7.

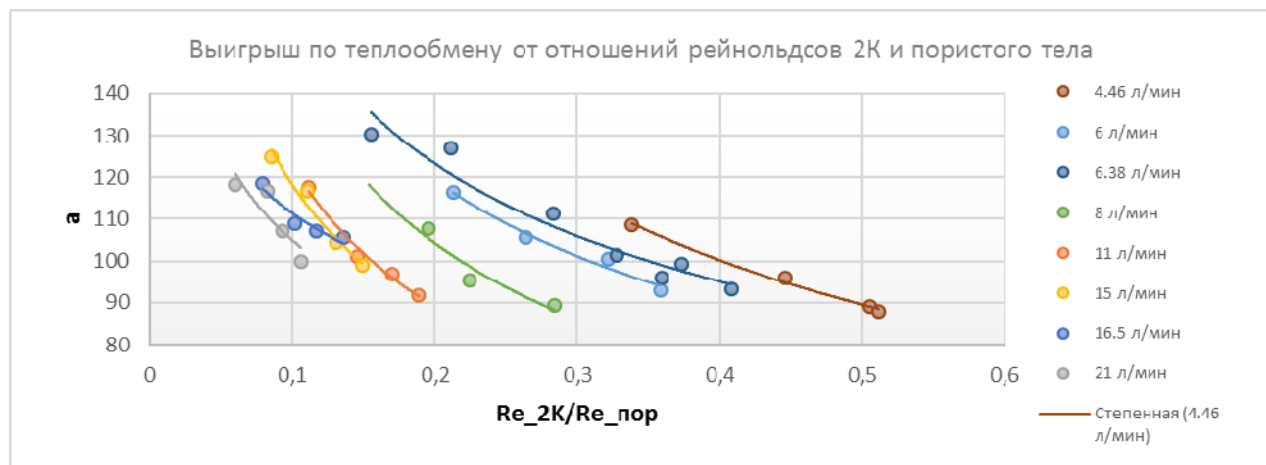


Рис. 6. Зависимость параметра «а» от отношения чисел Рейнольдса второго контура и пористого тела

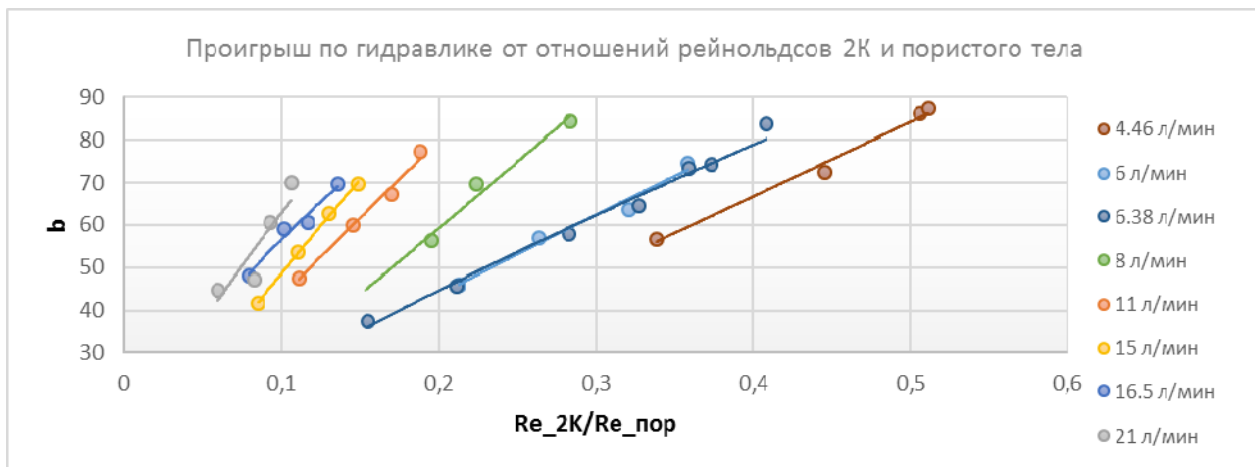


Рис. 7. Зависимость параметра «b» от отношения чисел Рейнольдса второго контура и пористого тела

Полученные результаты отношения  $a/b$  представлены на рис. 8 в виде зависимости от числа Рейнольдса в пористой структуре и числа Рейнольдса в контуре охлаждения.

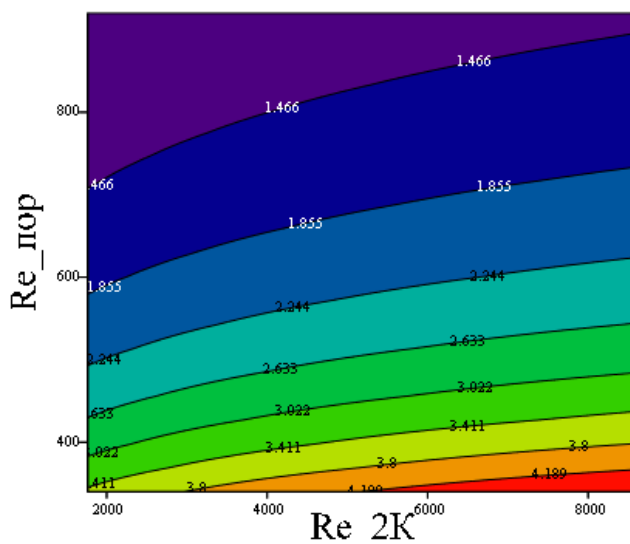


Рис. 8. Зависимость отношения параметров  $a$  к  $b$  в зависимости от чисел Рейнольдса второго контура и пористого тела

Как видно из рис. 8 параметры контура охлаждения слабее влияет на относительный выигрыш, наибольший выигрыш наблюдается при низких значениях числа Рейнольдса по основному контуру.

Так же была проведена серия экспериментов для пористой вставки, обладающей, изначально, такими же характерными размерами, но бывшей в эксплуатации в газовом тракте (образец № 2), что привело к ее поверхностному «загрязнению». При схожих режимных параметрах проигрыш по гидравлике оказался приблизительно в 2 раза больше, в то время выигрыш по теплообмену оказался больше, относительно чистого, приблизительно на 27 %.

### Заключение

Представлены результаты экспериментального определения значений коэффициента гидравлического трения на единицу толщины открыто-пористых вставок, изготовленных из проволочного

материала, от чисел Рейнольдса. В качестве характерного размера использовался средний размер пор с учетом поправки на вероятностное распределение пор по размерам, определенный по монохромному изображению продольного разреза тестового образца.

Полученные результаты являются важными, с точки зрения выбора режимных параметров течения рабочей среды, при проведении гидравлического расчета контуров, в которых предполагается использование подобных пористых структур, а также при подборе нагнетателей, обеспечивающих движение рабочей среды.

В результате исследований были получены граничные значения чисел Рейнольдса, характеризующие возможную смену режимов или характера течения среды

Получена зависимость отношения эквивалентной и реальной площади теплообмена ( $a$ ) и отношение эквивалентных и реальных потерь давления ( $b$ ) в зависимости от режимных параметров. Получена зависимость рис. 8, позволяющая определить оптимальные режимные параметры рабочих тел обоих контуров для вставки из пористого материала. Данные результаты могут быть использованы, при разработке новой перспективной высокоэффективной системы отвода тепла из газового тракта.

### Список литературы

1. Поляев В. М. и др. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В. М. Поляев, В. А. Майоров, Л. Л. Васильев. М.: Машиностроение, 1988. С. 168.

2. Жижкин А. М. Гидравлические потери в элементах из материала МР / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. 2006. № 2–2 (10). С. 173–176.

3. Богомолова А. Ф., Орлова Н. А. Количественная характеристика структуры порового пространства // ПМТФ, 1961. № 4. С. 77–81.

4. Жижкин А. М. Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР / В сборнике: Проблемы и перспективы развития двигателестроения Труды международной научно-технической конференции. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева. 2003. С. 185–190.

5. Жижкин А. М., Лазуткин Г. В., Брылева М. А., Изранова Г. В., Путилин С. В. Влияние структуры пористого материала МР на его расходные характеристики / Вестник СамГУПС. 2017. № 4 (38). С. 16–24.