

УДК 621.039

А.А. Добров¹, А.Е. Хробостов¹, Д.С. Тимаев²,
Г.Н. Качалин², А.В. Копалкин², Е.А. Кудряшов²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КАНАЛАХ С ВСТАВКАМИ ИЗ ОТКРЫТО-ПОРИСТОГО ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –
Российский федеральный ядерный центр²

Представлены две полуэмпирические расчетные методики определения потерь давления в пористых материалах, необходимые для оценки эффективности применения пористых интенсификаторов. Актуальность их разработки определяется задачей поиска оптимальных параметров конструкций теплообменных устройств. В первой методике используется набор параметров пористой структуры, который можно определить только при разрушении исследуемого образца, вторая позволяет определить потери давления, исходя из характеристик пористости среды и диаметра проволоки. Приведенные методики применены для определения потерь давления в четырех образцах, отличающихся формой канала, пористостью, толщинами и шероховатостью поверхности. Экспериментальные испытания проводились на исследовательском стенде ФТ-18 в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения характеристик теплоотвода в теплообменных устройствах за счет увеличения площади теплопередающей поверхности.

Ключевые слова: пористые материалы, гидродинамика, потери давления, коэффициент гидравлического сопротивления.

Введение

Установка интенсификаторов теплообмена из пористых металлических структур является эффективным способом улучшения характеристик теплоотвода в теплообменных устройствах за счет увеличения площади теплопередающей поверхности. Недостатком таких устройств является значительное повышение гидравлического сопротивления, зависящее как от характеристик течения и свойств рабочей среды, так и от толщины и структуры пористой вставки. Соответственно, огромное значение обретает разработка новых или адаптация существующих методик расчета потерь давления рабочей среды при ее течении в пористых элементах с конкретной структурой. Одним из материалов, пористость которого можно задавать и контролировать при изготовлении, является открыто-пористый проволочный материал, нашедший широкое применение в различных областях промышленности. Его основой является металлическая проволока, навитая в пересекающиеся спирали, спрессованная и уложенная в заданную форму. Пористость при этом можно определить (или контролировать при изготовлении) по массе проволоки, а размеры пор будут зависеть от диаметра проволоки, диаметра навивки и способа укладки спиралей. В НГТУ были проведены экспериментальные исследования зависимости потерь давления от расхода рабочей среды [1].

Целью настоящей работы являлось сравнение двух методик расчета величины потерь давления на единицу толщины пористой вставки, используя полученные экспериментальные результаты.

Описание экспериментальной части исследования

Экспериментальное изучение течения жидкости (вода) при протекании через пористые вставки проводилось на исследовательском стенде ФТ-18 НГТУ им. Р.Е. Алексеева. В состав стенда входили: электромагнитный расходомер (диапазон измерения 0÷125 л/мин,

погрешность измерения не более 1 % от измеряемой величины) и преобразователь дифференциального давления (диапазон измерения 0÷30 кПа, погрешность измерения ± 12 Па). Описание и схема стенда, а также конструкция рабочего участка приведены в работе [1].

Исследовались три образца пористых вставок, изготовленных из открыто-пористого проволочного материала (диаметр проволоки $d_{пр}=0,42$ мм). Все три образца изготавливались по одной технологии, но образец №1 перед исследованиями нигде не использовался, а образцы №2 и №3 использовались в слабощелочной среде, что могло привести к коррозии материала, и, собственно, к изменению шероховатости поверхности проволоки данных образцов. Величины пористости трех образцов по результатам измерений готовых изделий составляли соответственно $\Pi_1=0,75\pm 0,01$, $\Pi_2=0,74\pm 0,01$, $\Pi_3=0,74\pm 0,01$. Величины диаметров вставок составляли $D_1=40,4\pm 0,1$ мм, $D_2=38,5\pm 0,1$ мм и $D_3=38,5\pm 0,1$ мм, толщины вставок составляли $L_1=28,8\pm 0,2$ мм, $L_2=33,1\pm 0,2$ мм, $L_3=30,9\pm 0,2$ мм.

При проведении испытаний варьировался расход воды через экспериментальный участок. Фиксировались объемный расход жидкости Q и значения перепада статического давления $\Delta P_{ст}$ при протекании через образец. Также контролировалась температура рабочей среды T . На рис. 1 приведены графики суммарных потерь давления ΔP в зависимости от расхода рабочей среды Q для трех исследованных образцов.

Также в [1] на стенде ФТ-18 исследовался не используемый ранее образец, установленный в канале квадратного сечения со стороной $a=40$ мм (далее «Образец №4»). Диаметр проволоки был аналогичным, как и у круглых образцов (диаметр проволоки $d_{пр}=0,42$ мм). Толщина образца №4 составляла $L_4=28,4\pm 0,2$ мм, пористость $\Pi_4=0,77\pm 0,01$.

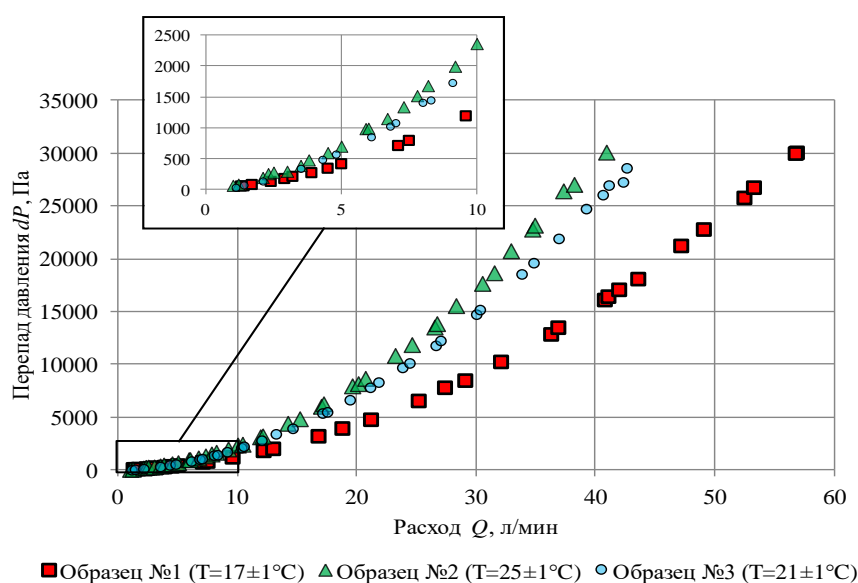


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований потерь давления в пористых образцах

Описание расчетных методик

В настоящей работе рассматривали две полуэмпирические методики [2-6], для определения гидравлических потерь в пористых элементах. Одна из методик требует набор параметров пористой структуры, который можно определить только при разрушении образца. Вторая же позволяет определить потери давления, исходя из пористости среды и диаметра проволоки.

Методика №1

Авторами работ [2-6] была предложена следующая расчетная зависимость для определения потерь давления пористого слоя (1):

$$\Delta P = \left(\frac{A\mu W_{\text{пор}}}{2\Pi d_{\text{cp}}^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2} + \frac{B\rho W_{\text{пор}}^2}{2\Pi^2 d_{\text{cp}} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \right) L, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления на слое L , Па; L – толщина пористого слоя, м; μ – динамическая вязкость рабочей среды, Па/с; $W_{\text{пор}}$ – средняя скорость среды в порах, м/с; Π – пористость; d_{cp} – средний размер пор, м; α – параметр, характеризующий дисперсию пор по размерам; ρ – плотность рабочей среды, кг/м³, A и B – эмпирические коэффициенты ($A = 220$, $B = 2$).

В качестве характерной скорости жидкости выбирается средняя скорость потока в порах. В эксперименте с помощью расходомера измерялось значение объемного расхода жидкости в канале круглого сечения до пористой вставки Q , через который определялась величина скорости фильтрации $W_{\text{ф}}$ (2):

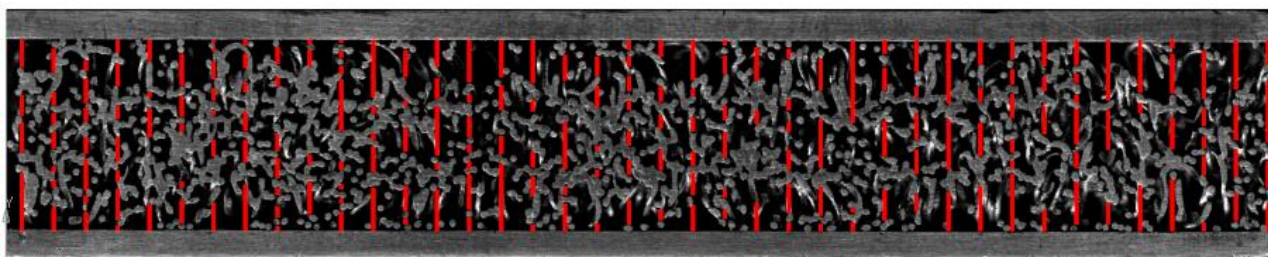
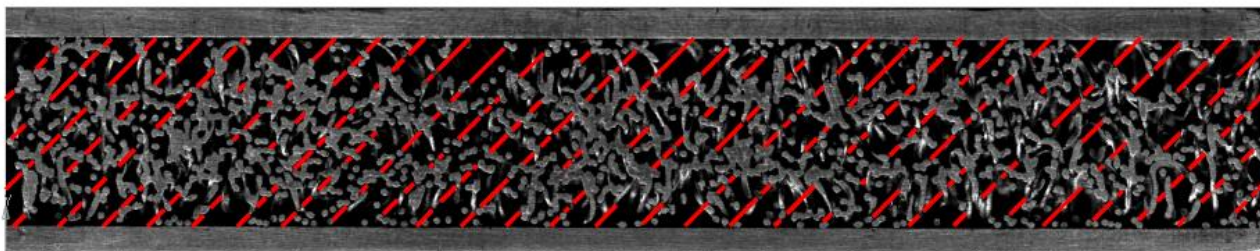
$$W_{\text{ф}} = \frac{Q}{F_{\text{кан}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{кан}}$ – площадь проходного сечения канала без пористой вставки, м².

Предположим, что исследованный пористый материал имеет структуру, близкую к изотропной. Отсюда следует, что отношение площади пор в любом сечении образца к общей площади сечения равно объемной пористости. Тогда средняя скорость потока в порах определится формулой (3):

$$W_{\text{пор}} = \frac{Q}{F_{\text{кан}}} \cdot \frac{1}{\Pi}. \quad (3)$$

Для определения среднего размера пор и параметра α , характеризующего дисперсию пор по размерам, был сделан продольный разрез тестового образца, изготовленного по той же технологии и из тех же материалов, что и исследуемый образец №1. Далее, с использованием сканера высокого разрешения было получено монохромное изображение сделанного разреза (рис. 2). При этом в плоскости сканирования светлым цветом отразилась металлическая структура, а темным – поровое пространство. Обработка среза осуществлялась методом измерения расстояний между контурами пористой структуры в плоском сечении, описанным в работе [7]. При этом было рассмотрено два случайных направления линий для измерения размеров пор.

а) по результатам обработки: $d_{cp}=1,29$ мм, $\alpha=2,22$ б) по результатам обработки: $d_{cp}=1,14$ мм, $\alpha=2,88$ **Рис. 2. Результаты графического определения размеров пор**

По результатам осреднения обработанных данных были получены следующие значения $d_{cp}=1,22$ мм, $\alpha=2,55$, которые использовались в дальнейшем расчете для всех трех образцов.

В качестве среднего размера пор в работах [2-6] предлагается использовать гидравлический диаметр, определяемый как (4):

$$d_{\Gamma} = \frac{4 \cdot F}{P}, \quad (4)$$

где F – площадь проходного сечения канала с пористой вставки, м²; P – смоченный периметр, м.

Площадь проходного сечения в пористой втулке можно определить, зная пористость образца (5):

$$F = F_{\text{кан}} \cdot \Pi. \quad (5)$$

Смоченный периметр P может быть определен как отношение омываемой потоком рабочей среды площади поверхности проволоки, из которой изготовлен пористый образец, и стенки канала к толщине пористого слоя. Для каналов круглого и квадратного сечения смоченный периметр определяется соответственно формулам (6) и (7).

$$P_{\text{кругл}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}} \cdot L_{\text{пр}} + \pi \cdot D \cdot L}{L}, \quad (6)$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, м; $L_{\text{пр}}$ – длина проволоки, м; D – диаметр круглого канала, м.

$$P_{\text{квадр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}} \cdot L_{\text{пр}} + 4 \cdot a \cdot L}{L}, \quad (7)$$

где a – размер стороны канала квадратного сечения, м.

Длину проволоки, из которой изготавливались образцы, можно рассчитать, зная ее диаметр и пористость образца. После всех математических преобразований гидравлический диаметр может быть определен по формуле (8):

$$d_{\Gamma} = \frac{D \cdot \Pi}{\frac{D}{d_{\text{пр}}} \cdot (1 - \Pi) + 1}. \quad (8)$$

Для квадратного канала формула будет аналогична, только вместо диаметра D необходимо использовать размер стороны квадратного сечения a .

Расчетные значения гидравлического диаметра для четырех исследуемых образцов составили: $d_{\Gamma 1}=1,21$ мм, $d_{\Gamma 2}=1,15$ мм, $d_{\Gamma 3}=1,15$ мм, $d_{\Gamma 4}=1,34$ мм. Можно видеть, что для об-

разца №1 расчетное значение совпадает с результатами измерений среднего размера пор, выполненных на продольном срезе. Поэтому в дальнейших расчетах в качестве среднего размера пор для всех образцов использовались их гидравлические диаметры. Также предполагалось, что параметр α обусловлен технологическим процессом изготовления рассмотренных образцов, и для всех них будет являться одинаковым.

Методика №2

Недостатком описанной выше методики является необходимость знать характеризующие исследуемый открыто-пористый проволочный материал параметры, которые невозможно контролировать в процессе изготовления (средний диаметр пор и дисперсия размеров пор), а, следовательно, знать их заранее. Необходимо иметь зависимость, определяющую потери давления через известные параметры: пористость Π и диаметр проволоки $d_{\text{пр}}$.

В общем случае гидродинамика потока в пористых материалах описывается модифицированным уравнением Дарси (уравнение Дюпуи – Рейнольдса – Форшхеймера [8-10]) (9):

$$\Delta P = (A \cdot \mu \cdot W_{\phi} + B \cdot \rho \cdot W_{\phi}^2) L, \quad (9)$$

где A и B – вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления соответственно.

Величины размерных коэффициентов A (м^{-2}) и B (м^{-1}) не зависят от свойств рабочей среды. Отношение B/A имеет размерность длины и может быть использовано в качестве характерного размера пористой структуры. Вязкостный коэффициент сопротивления есть обратная величина проницаемости: $A = 1/K$. Инерционный коэффициент сопротивления по данным [11] связан с проницаемостью приближенным выражением $B = C/\sqrt{K}$, где безразмерный коэффициент $C \approx 0,7$ в случае гладкости поверхности пористой структуры.

Тогда для перепада давления справедлива следующая формула (10):

$$\Delta P = \left(\frac{1}{K} \cdot \mu \cdot W_{\phi} + \frac{C}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot W_{\phi}^2 \right) L. \quad (10)$$

Характерный размер пор $d_{\text{пор}}$ рассчитывается в зависимости от диаметра проволоки $d_{\text{пр}}$ структуры [12] (11):

$$d_{\text{пор}} = d_{\text{пр}} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{(1-\Pi)}{0,04}}}{1,18} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \pi}{1-\Pi}} \quad (11)$$

Для проницаемости среды K справедливо выражение [13] (12):

$$K = \frac{d_{\text{пор}}^2 \cdot \Pi^4}{180 \cdot (1-\Pi)^2}. \quad (12)$$

Результаты расчетных исследований

На рис. 3-6 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по потерям давления в пористых образцах. Каждая точка графика соответствует одному из экспериментальных режимов, характеризующихся скоростью и температурой рабочей среды. Жирная линия на графиках, проведенная под углом 45° характеризует полное совпадение расчетных и экспериментальных значений потерь давления. Попадание точки выше этой линии говорит о том, что расчетные значения оказались меньше экспериментальных значений, и наоборот – попадание точки ниже этой прямой говорит о том, что расчетные значения получились больше экспериментальных.

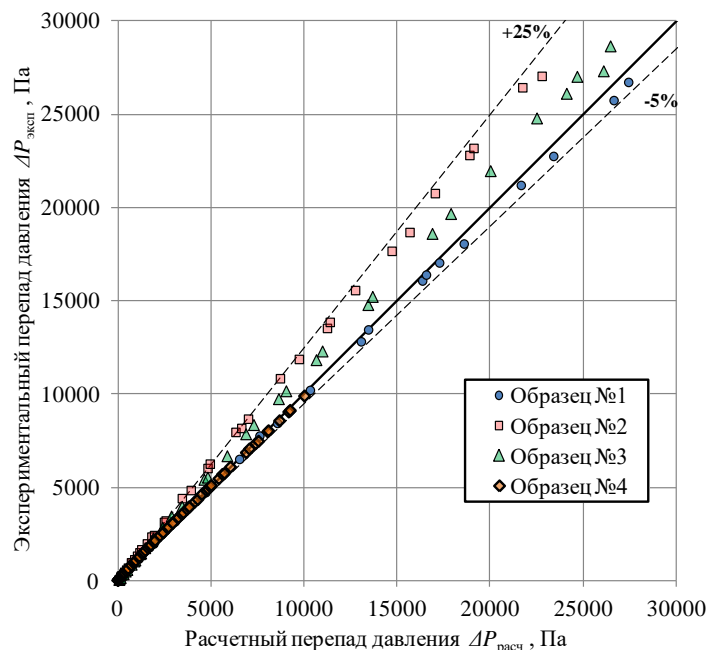


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных по потерям давления в пористых образцах с рассчитанными по методике №1 значениями (диапазон 0-30000 Па)

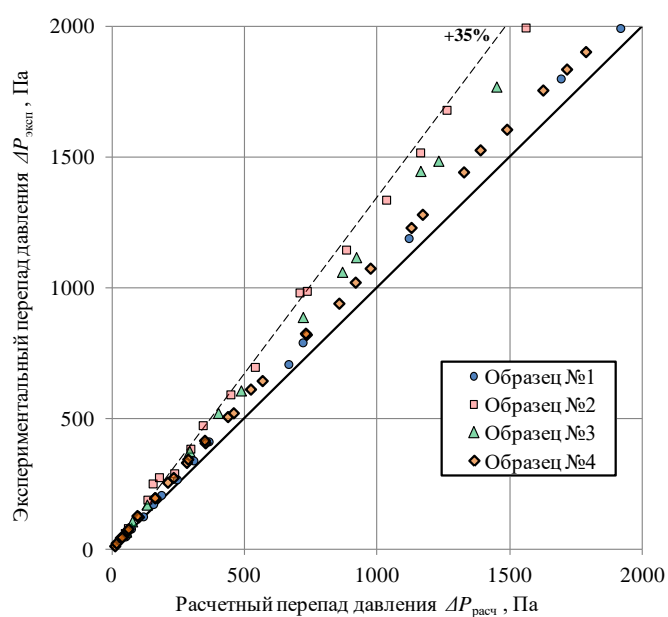


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных по потерям давления в пористых образцах с рассчитанными по методике №1 значениями (диапазон 0-2000 Па)

Анализ расчетных потерь давления, полученных по методике №1, позволил сделать следующие выводы:

- максимальные отклонения расчетных данных для всех четырех образцов и для всех рассмотренных режимов составили 35 % в меньшую от расчетных значений сторону и 5 % в большую;
- наиболее точно по методике №1 можно рассчитать потери давления для образца №1 и образца №4 (чистые образцы); при этом отклонения не превысят ± 15 %

от экспериментальных данных, причем как в переходном, так и в турбулентном режимах течения;

- расчетные значения потерь давления для образцов №2 и №3 (материал образцов взаимодействовал со слабощелочной средой) оказались меньше экспериментальных во всех рассмотренных режимах.

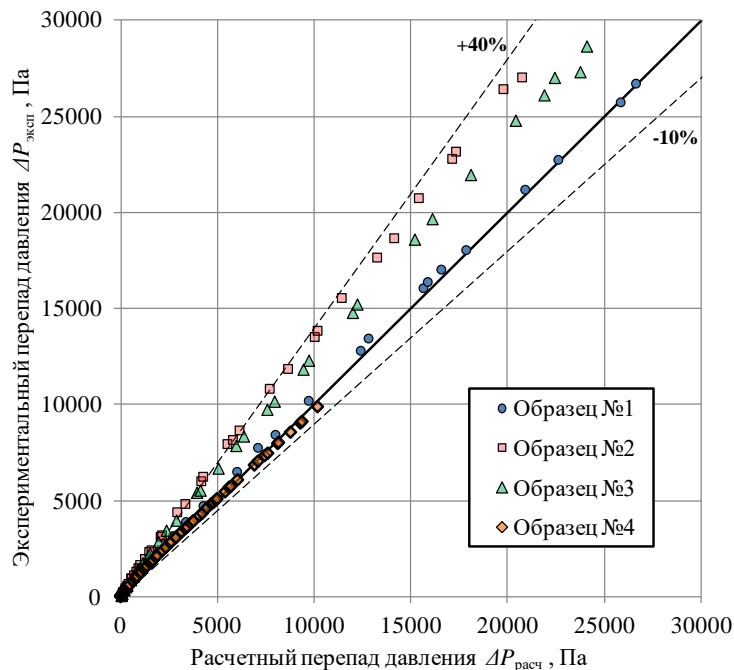


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных по потерям давления в пористых образцах с рассчитанными по методике № 2 значениями (диапазон 0-30000 Па)

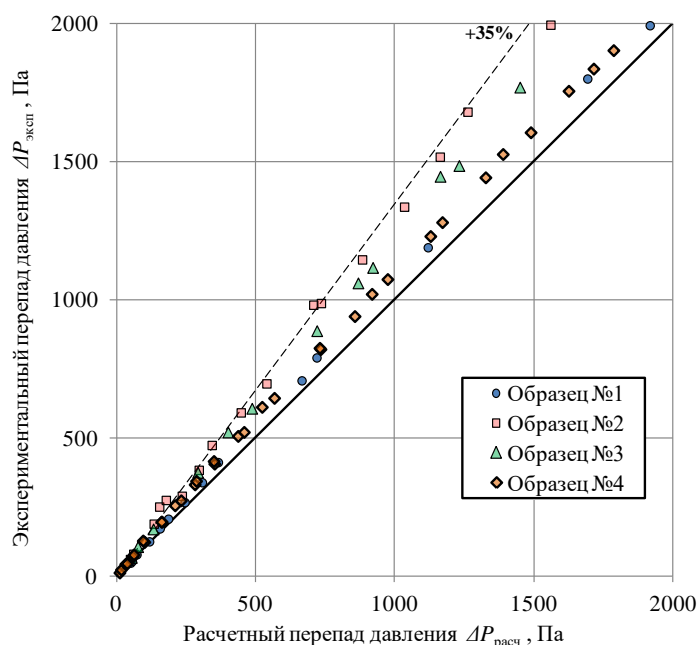


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных по потерям давления в пористых образцах с рассчитанными по методике №2 значениями (диапазон 0-2000 Па)

Анализ расчетных потерь давления, полученных по методике №2, показал следующее.

- Из рассмотренных пористых образцов наиболее точно по методике №2 можно рассчитать потери давления для образца №1 и образца №4 (чистые образцы). При этом отклонения не превысят $\pm 12\%$ от экспериментальных данных. С увеличением скорости (числа Рейнольдса) это отклонение уменьшается. Наибольшая ошибка приходится на режимы с низкими числами Рейнольдса.
- Расчетные значения потерь давления для образцов №2 и №3 оказались меньше экспериментальных во всех рассмотренных режимах, причем максимальное отклонение достигало 40 %.

Заключение

В работе рассмотрены две полуэмпирические методики расчета потерь давления в пористых материалах. Данные методики были применены для расчета потерь давления в четырех пористых образцах, отличающихся формой канала, пористостью, толщинами и шероховатостью поверхности. Обе они позволили достаточно точно рассчитать потери давления для образцов №1 и №4, имеющих гладкую поверхность проволочного скелета и отличающихся формами каналов, в которые они устанавливались. Однако при расчетах потерь давления в образцах №2 и №3 обе методики привели к существенно заниженным расчетным значениям по сравнению с экспериментом. Это можно объяснить тем, что в обеих методиках не учитывается шероховатость поверхности проволоки. Методика №2 может быть использована для инженерных расчетов при разработке гидравлических систем со вставками из пористого материала, т.к. требует знания только пористости и диаметра проволоки.

В случае применения подобного открыто-пористого проволочного материала в технических установках, в которых возможно их взаимодействие со средой, необходима доработка рассмотренных расчетных методик определения потерь давления, например, введение дополнительной поправки, или учет зависимости коэффициентов A и B (для методики №1) и C (для методики №2) от шероховатости поверхности проволоки.

Библиографический список

1. Аношкин, Ю.И. Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления вставок из упруго-пористого проволочного материала в канале круглого сечения / Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.А. Легчанов, М.А. Субарев, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №1 (124). – С. 92-99.
2. Жижкин, А.М. Гидравлические потери в элементах из материала МР / А.М. Жижкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. – 2006. – № 2-2 (10). – С. 173-176.
3. Жижкин, А.М. Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР / А.М. Жижкин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды международной научно-технической конференции. – Самара, 2003. – С. 185-190.
4. Жижкин, А.М. Влияние структуры пористого материала МР на его расходные характеристики / А.М. Жижкин, Г.В. Лазуткин, М.А. Брылева, Г.В. Изранова, С.В. Путилин // Вестник СамГУПС. – 2017. – № 4 (38). – С. 16-24.
5. Жижкин, А.М. Особенности гидродинамики тонкостенных пористых изделий из материала МР / А.М. Жижкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. – 2011. – № 3-3 (27). – С. 145-149.
6. Жижкин, А.М. Проектный расчет фильтрующих элементов из материала МР / А.М. Жижкин, Г.В. Лазуткин // Вестник СамГУПС. – 2015. – № 1 (27). – С. 145-152.
7. Богомолова, А.Ф. Количественная характеристика структуры порового пространства / А.Ф. Богомолова, Н.А. Орлова // Прикладная механика и техническая физика. – 1961. - №4. – С.77-81.
8. Dupuit, J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux / J. Dupuit. – Paris, 1863.

9. **Reynolds, O.** Papers on Mechanical and Physical Subjects / O. Reynolds // Cambridge University Press, 1900.
10. **Forscheimer, P.** Wasserbewegung durch Boden / P. Forscheimer // Z. Vereines deutscher Ingenieure, 45, (1901).
11. **Харитонов, В.В.** Теплофизика лазерных зеркал: учебное пособие / В.В. Харитонов. – М.: МИФИ, 1993. – 152 с.
12. **Calmidi, V.V.** Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams / V.V. Calmidi // Ph.D. Thesis, University of Colorado, 1998.
13. **Zhao, C.Y.** Thermal transport phenomena in porous metal foams and sintered beds / C.Y. Zhao, T. Kim, T.J. Lu, H.P. Hodson // Technical report, University of Cambridge, 2001.

*Дата поступления
в редакцию: 28.10.2019*

**A.A. Dobrov¹, A.E. Khrobostov¹, D.S. Timaev², G.N. Kachalin²,
A.V. Kopalkin², E.A. Kudryashov²**

EXPERIMENTAL STUDIES AND COMPUTATIONAL MODELING OF HYDRAULIC LOSSES IN CHANNELS WITH INSERTS OF OPEN-POROUS WIRE MATERIAL

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics²

Purpose: conducting of experimental studies and computational modeling of local hydraulic resistance in channels with inserts of open-porous wire material.

Methodology: in this article, two semi-empirical methods for determining pressure loss in porous materials are considered. The first method uses a set of parameters of the porous structure, which can determine the value of hydroresistance only by destroying the test sample. The second method allows to determine the pressure loss based on the characteristics of the porosity of the medium and the diameter of the wire.

Results: a comprehensive calculation and experimental study of the hydrodynamic characteristics of the flow in channels with inserts of open-porous wire material was carried out. The values of the coefficient of local hydraulic resistance for four types of porous inserts are determined.

Conclusions: in order to assess the hydraulic losses of open-porous wire material in technical installations where its interaction with the medium is possible, it is necessary to take into account the surface roughness of the wire in the calculation methods by applying additional empirical corrections.

Originality / value: the article presents an algorithm for assessing the hydraulic losses of open-porous wire structures during computational modeling, based on taking into account the structural technical features obtained in the experimental installations.

Key words: porous materials, hydrodynamics, pressure losses, coefficient of hydraulic resistance.