

УДК 621.039

Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.А. Легчанов, М.А. Субарев, А.Е. Хробостов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВСТАВОК ИЗ УПРУГО-ПОРИСТОГО ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА В КАНАЛЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Одним из вариантов пористых вставок, используемых в каналах в качестве интенсификаторов процессов теплообмена, является упруго-пористый проволочный материал. При этом возникает необходимость корректного определения гидравлических потерь давления на единицу длины пористого элемента, которые зависят от свойств перекачиваемой жидкости, от скорости ее течения и от характеристик пористой структуры.

В работе представлены гидравлические характеристики, полученные при исследовании перепада давления от расхода рабочей среды в трех пористых образцах на исследовательском стенде НГТУ ФТ-18. Данные приведены в безразмерной форме для удобства их использования согласно теории гидродинамического подобия. В качестве определяющего размера использовался средний диаметр пор с учетом поправки на вероятностное распределение пор по размерам, а в качестве характерной скорости выбиралась средняя скорость потока в порах. Получены значения границ диапазонов чисел Рейнольдса, характеризующие возможную смену режимов или характера течения среды.

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

Введение

Установка элементов из пористых материалов при течении различных сред в каналах является эффективным способом интенсификации теплообмена за счет увеличения площади теплоотводящей поверхности, контактирующей со средой в небольшом объеме. При определенной структуре такие вставки могут выполнять функцию струевыпрямителей и успокоителей потока жидкости для установок, где важно обеспечить равномерный по сечению профиль скорости среды, что обусловлено, например, особенностями технологического процесса в таких установках. При этом возникает необходимость корректного определения гидравлических потерь давления на единицу длины пористого элемента, которые будут зависеть не только от свойств перекачиваемой жидкости и от скорости ее течения, но также и от характеристик пористой структуры.

Одним из вариантов таких пористых вставок, пористость которых можно задавать и контролировать при изготовлении, является сам упруго-пористый проволочный материал, который нашел широкое применение в нефтегазовой и химической промышленности, авиа- и ракетостроении, судостроении, машиностроении [1-5].

Экспериментальный стенд и исследуемые образцы

Экспериментальное изучение гидравлики жидкости при протекании через пористые втулки проводилось на исследовательском стенде ФТ-18 НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Стенд представляет собой двухконтурную установку с принудительной циркуляцией рабочей среды по обоим контурам. Принципиальная гидравлическая схема стенда приведена на рис. 1. Основные характеристики стенда сведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики стенда ФТ-18

Наименование характеристики	Значение/диапазон значений
Рабочая среда	вода
Расход рабочей среды	0,5÷110 л/мин
Максимальная температура рабочей среды	60 °С
Максимальный перепад давления на рабочем участке	100 кПа

Для определения гидравлических потерь в состав стенда входят 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).

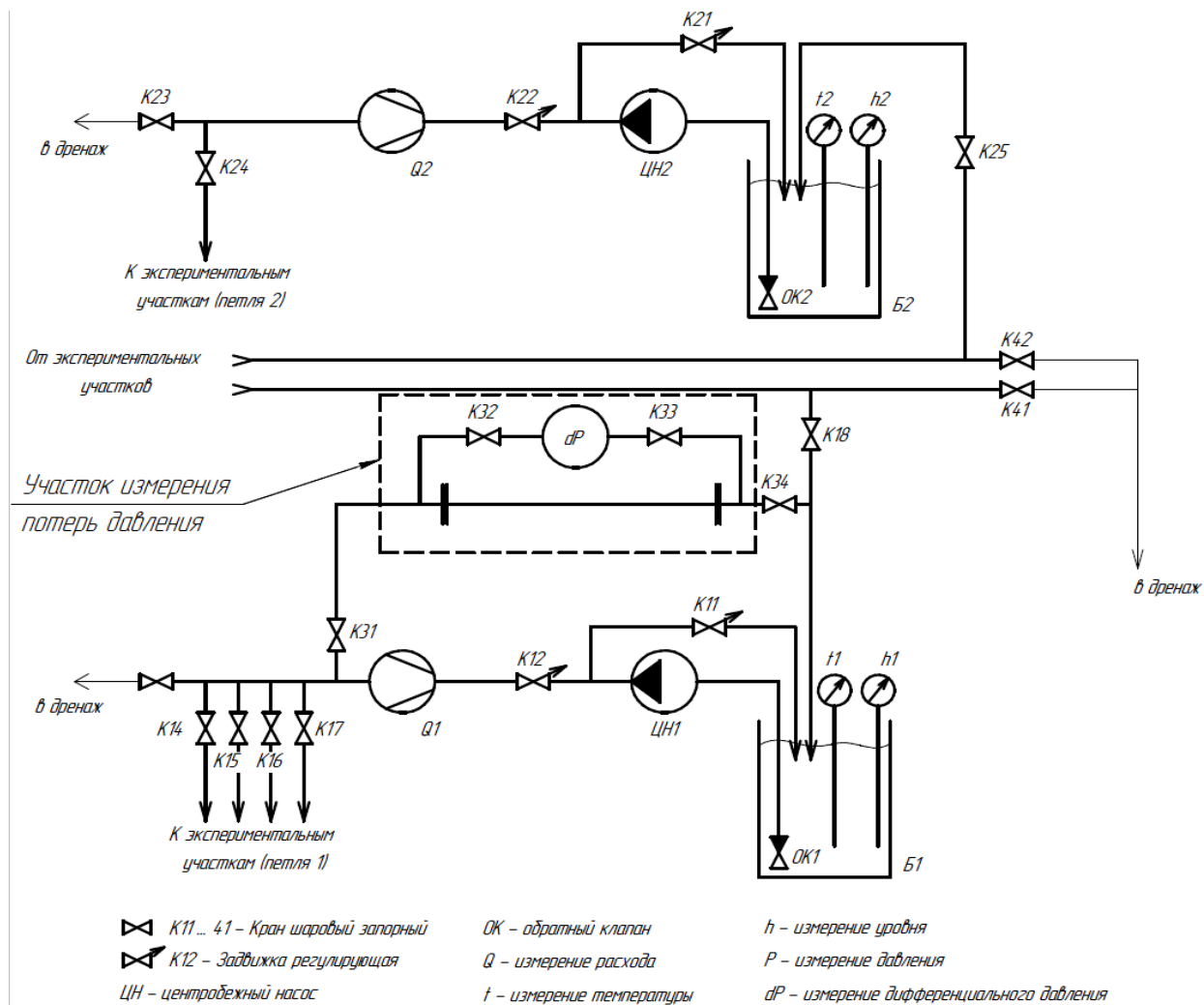


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема стенда ФТ-18

Исследовались три образца пористых втулок, изготовленных из упруго-пористого проволочного материала (в основе проволока, навитая в спирали и спрессованная в цилиндрическую форму). Величины пористости трех образцов по результатам измерений готовых изделий составляли соответственно $\Pi_1=0,75\pm 0,015$, $\Pi_2=0,74\pm 0,015$, $\Pi_3=0,74\pm 0,015$, толщины втулок $L_1=28,8\pm 0,2$ мм, $L_2=33,1\pm 0,2$ мм, $L_3=30,9\pm 0,2$ мм. Значение пористости получалось экспериментально-расчетным способом, при этом предполагалось, что исследуемый матери-

ал имеет только открытые поры, а его пористость равна объемному водопоглощению. Величины диаметров втулок 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.

Образцы устанавливались в канал круглого сечения и жестко фиксировались. Схема установки втулок в составе экспериментального участка представлена на рис. 2.

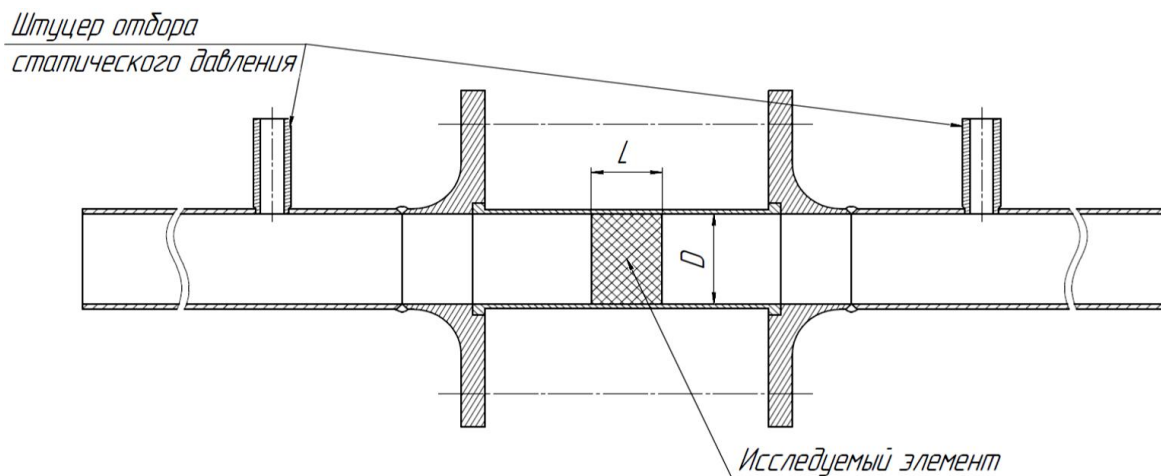


Рис. 2. Схема установки исследуемого образца в составе экспериментального участка

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 . Учитывая, что геометрические характеристики сечений канала до и после исследуемого образца одинаковы, то потери полного давления, характеризующие гидравлическое сопротивление образца, будут равны разнице статического давления между двумя сечениями, показанными на рис. 2. Данные потери обусловлены трением рабочей среды о стенки круглого канала и местным сопротивлением исследуемого образца. В дальнейшем при обработке результатов величиной потерь давления за счет трения в круглом канале пренебрегалось, ввиду ее малого значения по сравнению с потерями, вызванными пористым образцом.

Методика обработки экспериментальных данных

В общем случае потери давления, отнесенные к единице длины (толщины) пористого образца, могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta P/L = f(V_{хар}, d_{хар}, \nu) \quad (1)$$

где: $\Delta P/L$ - потери давления, отнесенные к единице длины пористого образца, Па;

$V_{хар}$ - характерная скорость течения среды, м/с;

$d_{хар}$ - характерный размер пористого элемента, м;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

По аналогии с течением жидкости в трубах и каналах с помощью методов теории подобия можно получить два безразмерных комплекса, которые характеризуют гидродинамику жидкости в пористой среде [1]:

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

$$Re = \frac{V_{хар} \cdot d_{хар}}{\nu} \quad (3)$$

ξ - коэффициент гидравлического трения на единицу толщины пористого слоя;

Re - число Рейнольдса.

В качестве характерной скорости жидкости для пористых материалов 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 можно определить величину скорости фильтрации V_{ϕ} :

$$V_{\phi} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (4)$$

Предполагая, что рассматриваемые изделия имеют структуру близкую к изотропной, можно принять допущение о равенстве просветности и объемной пористости. Тогда средняя скорость потока в порах определится формулой:

$$V_{\text{хар}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \cdot \frac{1}{\Pi} \quad (5)$$

В работе [2] авторами предложено рассматривать в качестве характерного размера 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;

α – параметр функции распределения.

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

где σ^2 - дисперсия размеров пор.

Подробно физический смысл параметра функции распределения α для материала МР описан в [3].

По данным структурных исследований [2-3] было получено выражение для определения среднего размера пор в изделиях из материала МР:

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

Для определения среднего размера пор 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. 3). При этом в плоскости сканирования светлым цветом отразилась металлическая структура, а темным – поровое пространство.

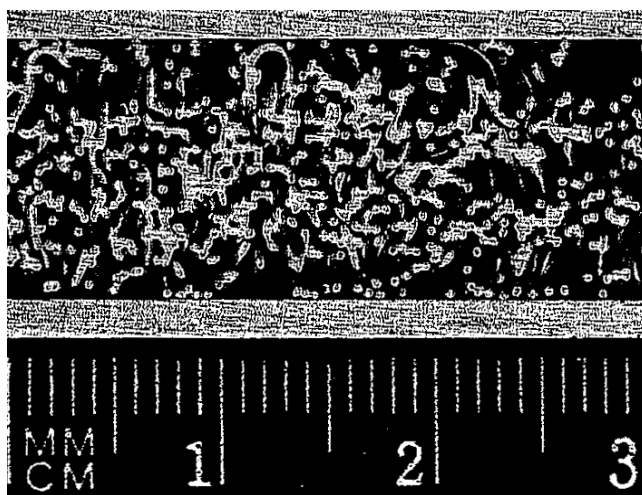


Рис. 3. Цифровой скан продольного разреза исследуемого материала МР

Это изображение анализировалось с использованием САД программы, где в местах пустот строились окружности, касательные к контурам металла (рис. 4).

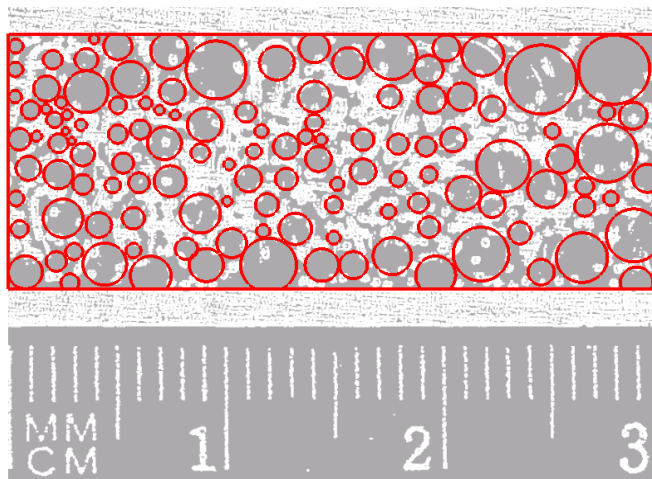


Рис. 4. Описание пустот в сечении с помощью окружностей в CAD программе

Затем файл в открытом текстовом формате IGES, содержащий информацию о диаметрах построенных окружностей, анализировался в математическом пакете. Это позволило значительно ускорить процесс обработки данных. В результате было получено среднее значение диаметров построенных окружностей $d_{cp1}=1,23$ мм, дисперсия $\sigma^2=0,37$ и гистограмма распределения размеров пор (рис. 5).

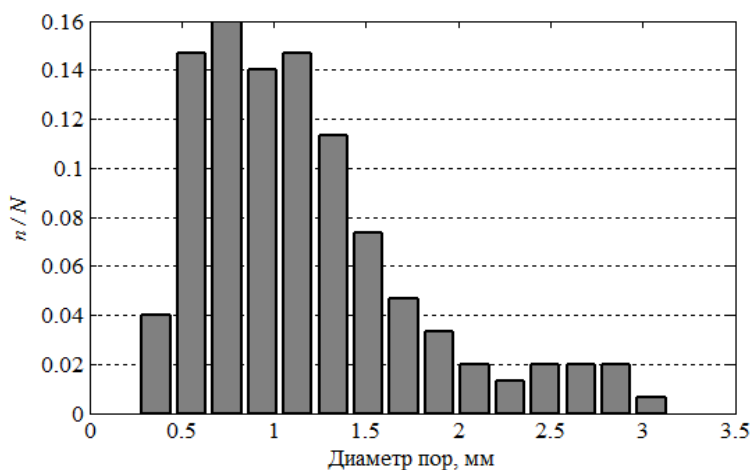


Рис. 5. Гистограмма распределения размеров пор

(n – количество окружностей с диаметром из рассматриваемого диапазона,
 N – общее количество построенных окружностей, $N=150$)

Расчетное значение среднего размера пор, определенное по формуле (8) для образца №1 составило 1,26 мм. Можно отметить хорошее совпадение результата цифровой обработки сечения с расчетной формулой (8), поэтому средние размеры пор образцов №2 и №3 были рассчитаны по ней. Их значения составили соответственно $d_{cp2}=1,2$ мм и $d_{cp3}=1,2$ мм.

Величина параметра функции распределения для образца №1 составила $\alpha_1=4$. Учитывая одинаковый диаметр проволоки и технологию изготовления других образцов, для образцов №2 и №3 значения параметров функции распределения приняты также $\alpha_2=4$ и $\alpha_3=4$. Полученные величины, характеризующие геометрические особенности исследуемых пористых втулок, использовались при обработке экспериментальных данных по исследованию перепада давления для составления уравнения подобия вида $\xi = f(Re)$.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 6 приведены графики перепада статического давления dP в зависимости от расхода рабочей среды Q для трех исследованных образцов. Очевидно их существенное различие, обусловленное разной температурой при проведении испытаний, а также диаметром и толщиной пористых втулок. Далее была проведена попытка обобщить полученные экспериментальные данные, согласно представленной ранее методике. На рис. 7 представлены зависимости коэффициентов гидравлического трения на единицу толщины в пористых образцах от чисел Рейнольдса, определенные по формулам (2)-(3) на основе экспериментальных данных.

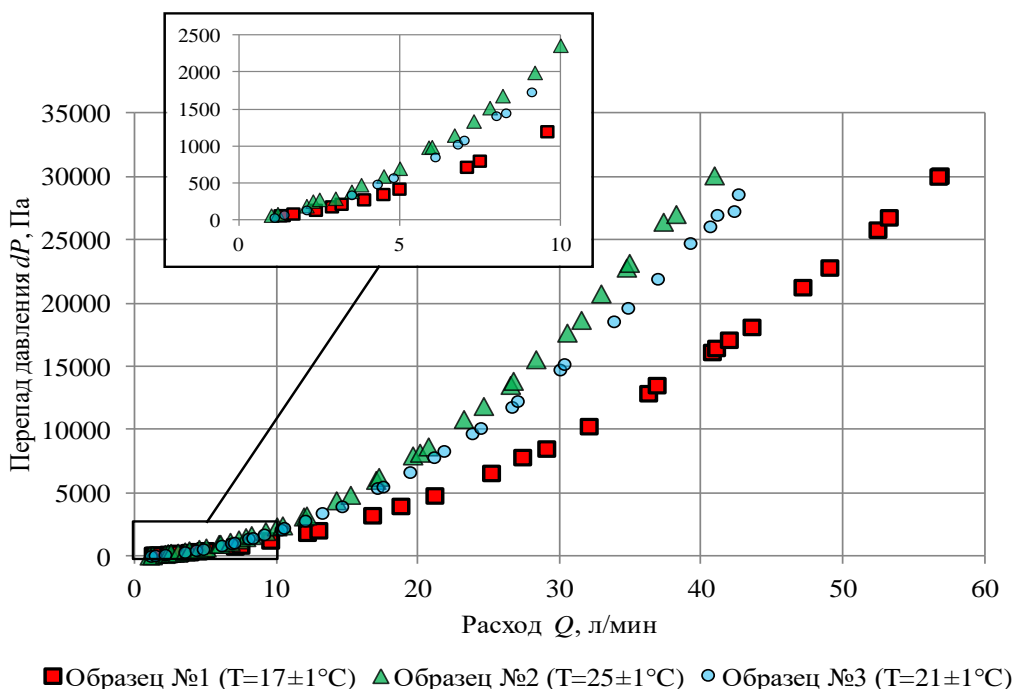


Рис. 6. Первичные экспериментальные данные по определению перепада давления от расхода воды в каналах с пористыми вставками

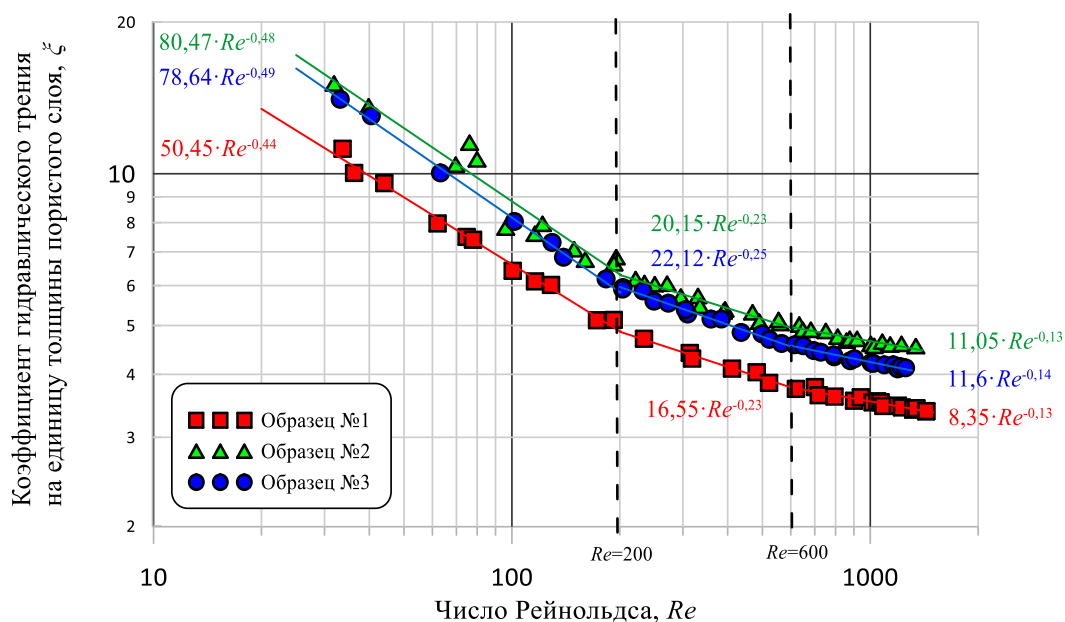


Рис. 7. Результаты обработки экспериментальных данных

Анализ полученных результатов проводился в предположении, что зависимость коэффициента гидравлического сопротивления на единицу толщины пористого слоя от числа Рейнольдса может быть аппроксимирована степенной функцией. При этом рассматривались различные диапазоны по числам Рейнольдса, в рамках которых степенные функции имеют наименьшее отклонение от экспериментальных значений.

Методом наименьших квадратов были получены диапазоны по числам Рейнольдса, в рамках которых данные весьма удовлетворительно описываются одними функциями. Однако, на рис. 7 можно видеть, что общих зависимостей для всех трех элементов нет. Графики имеют схожие углы наклона, но отличаются постоянным множителем. Это может свидетельствовать о качественно одинаковом характере течения рабочей среды в пористых втулках. Однако помимо пористости, среднего размера пор и зависимости распределения пор по размерам на гидравлическое сопротивление могут оказывать влияние и другие геометрические параметры, например, соотношение размера пор и толщины слоя, диаметр навивки проволоки, отношение диаметра втулки к ее толщине, шероховатость проволоки и т.п. Влияние этих факторов на гидросопротивление требует дополнительного изучения.

Несмотря на сказанное выше, основным результатом, который удалось получить для всех трех исследованных образцов – это граничные значения чисел Рейнольдса, характеризующие возможную смену режимов или характера течения среды:

- 1) в диапазоне числе Рейнольдса $30 < Re \leq 200$ зависимость ζ может быть аппроксимирована функцией $\zeta \sim Re^{-0,48}$;
- 2) в диапазоне числе Рейнольдса $200 < Re \leq 600$ зависимость ζ может быть аппроксимирована функцией $\zeta \sim Re^{-0,24}$;
- 3) в диапазоне числе Рейнольдса $Re > 600$ зависимость ζ может быть аппроксимирована функцией $\zeta \sim Re^{-0,13}$.

Заключение

Приведены результаты экспериментального определения значений коэффициента гидравлического трения на единицу толщины слоя пористых вставок в зависимости от чисел Рейнольдса. В качестве характерного размера использовался средний диаметр пор с учетом поправки на вероятностное распределение пор по размерам, а в качестве характерной скорости выбиралась средняя скорость потока в порах.

Полученные результаты являются важными для выбора режимных параметров течения жидкости при проведении гидравлического расчета контуров с подобными пористыми структурами, а также при подборе насосов и циркуляторов, обеспечивающих движение жидкости в таких контурах.

Библиографический список

1. **Жижкин, А.М.** Гидравлические потери в элементах из материала МР // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. – 2006. – № 2-2 (10). – С. 173-176.
2. **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. – Самара, 2003. – С. 185-190.
3. **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.
4. **Жижкин А.М.** Особенности гидродинамики тонкостенных пористых изделий из материала МР // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2011. № 3-3 (27). С. 145-149.

5. Жижкин, А.М. Проектный расчет фильтрующих элементов из материала МР / А.М. Жижкин, Г.В. Лазуткин // Вестник СамГУПС. – 2015. – № 1 (27). – С. 145-152.

*Дата поступления
в редакцию: 23.02.2019*

Yu.I. Anoshkin, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov, M.A. Subarev, A.E. Khrobostov

**EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRAULIC RESISTANCE OF POROUS MATERIAL
MADE OF SPIRAL WIRE IN ROUND CHANNEL**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Investigation of hydraulic pressure losses per unit length of a porous element, which depend not only on the properties of the pumped liquid and on the speed of its flow, but also on the characteristics of the porous structure.

Design/methodology/approach: The paper presents experimental data obtained in the study of pressure drop from the flow of the working medium in three porous samples on the bench of NSTU FT-18. The data were reduced to a dimensionless form according to the theory of hydrodynamic similarity according to the recommendations given in the literature for such porous materials.

Results: The values of the boundaries of the ranges of Reynolds numbers are obtained, which characterize a possible change of regimes or the nature of the flow.

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