

03

Экспериментальное определение гидравлических характеристик высокопористого материала „Металлорезина“

© М.А. Субарев, А.В. Копалкин, С.А. Кунин, В.С. Булычев, Д.С. Тимаев, А.Е. Кудряшов, Р.А. Казаков

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

e-mail: MASubarev@vniief.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2023 г.

В окончательной редакции 9 января 2024 г.

Принято к публикации 13 января 2024 г.

Представлены экспериментальные результаты по определению гидравлических характеристик высокопористой металлорезины в диапазоне пористости от 70 до 85% для образцов из проволоки диаметром 0.1–0.8 мм. Показано, что с увеличением диаметра проволоки при фиксированной пористости потери давления рабочей среды на металлорезине уменьшаются. Представлены найденные обобщенные эмпирические выражения для определения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления в зависимости от пористости и диаметра проволоки, из которой изготовлена металлорезина.

Ключевые слова: пористые металлические материалы, гидравлика, вязкостный коэффициент сопротивления, инерционный коэффициент сопротивления, металлорезина.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57527.178-23

Введение

Использование пористых металлических материалов (ПММ) в качестве интенсификаторов теплообмена является эффективным способом повышения характеристик теплоотвода в теплообменных аппаратах, что обусловлено высокой степенью перемешивания потока и увеличением коэффициента теплоотдачи за счет выравнивания скорости и температуры по сечению потока теплоносителя в ПММ, а также повышением площади теплопередающей поверхности. Несмотря на высокий потенциал пористых материалов, необходимо учитывать то, что их установка в теплопередающие каналы приводит к увеличению гидравлического сопротивления, которое характеризуется вязкостным и инерционным коэффициентами [1]. Данные параметры также определяют эффективный коэффициент теплопроводности рабочей среды в пористом теле [2]. В связи с этим актуальной задачей является корректное определение значений вязкостного и инерционного коэффициентов, характеризующих гидравлические и теплофизические параметры пористых материалов. Потери давления зависят от параметров движения рабочей среды и от характеристик пористой структуры [3], которые определяются технологией изготовления.

Перспективным ПММ, пористость которого можно задавать и контролировать в процессе изготовления, является металлорезина (МР). Особый интерес вызывает МР, изготавливаемая из медной проволоки с серебряным покрытием, которое после прессования в элемент необходимой формы в процессе термообработки плавится и формирует в узловых точках неразъемные паяные

соединения [4]. Данная технология позволяет изготавливать высокопористую МР с пористостью вплоть до 90% [3], обладающую хорошим тепловым контактом между витками спиралей и стенками корпуса, куда она устанавливается, что делает данный тип ПММ привлекательным для использования в качестве интенсификаторов теплообмена.

В настоящее время существует несколько расчетных и экспериментальных подходов по определению потерь давления рабочей среды при ее движении через МР. Наиболее широкое применение получили экспериментальные методы, основанные на теории подобия и анализе размерностей. Так для моделирования гидравлических процессов в МР используются два безразмерных комплекса: коэффициент сопротивления трения на единицу длины пористой вставки и число Рейнольдса рабочей среды в порах [5]. В работе [6] авторы приводят зависимость коэффициента гидравлического трения на единицу длины от числа Рейнольдса для МР с пористостью 75% и диаметром проволоки 0.42 мм. В качестве характерного размера в работе используется средний диаметр поры [5,7] с учетом поправки на вероятностное распределение пор по размерам. В работе [8] представлены две полуэмпирические методики для определения гидравлических потерь в пористых элементах на основе МР. В соответствии с первой методикой необходимо знать набор параметров пористой структуры, который можно определить только экспериментально из статистического анализа плоских шлифов МР. Вторая методика основана на применении вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления, которые определяются через проницаемость среды. Проницаемость, в свою

очередь, находится по эмпирическому выражению [9] через диаметр проволоки и пористость. Использование вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления при расчетах гидравлических потерь давления позволяет исключить ошибку определения характерного размера поры и, как следствие, занижения или завышения коэффициента гидравлического трения. Значения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления, в связи со сложной структурой пористых материалов из МР, можно установить только экспериментально по ее гидравлической характеристике [3]. В технической литературе приводятся эмпирические зависимости данных параметров от пористости (Π) в диапазоне $15\% \leq \Pi \leq 67\%$ для прессованной МР. Применение такой МР в гидро- и газодинамических каналах систем и установок различного назначения приведет к существенному увеличению сопротивления, следовательно, большим потерям давления. В связи с этим возникает интерес к высокопористой МР с пористостью $> 70\%$.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное определение обобщенной эмпирической зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления высокопористой МР от пористости в диапазоне $\Pi = 70-85\%$, и диаметра проволоки $\delta = 0.1-0.8 \text{ mm}$.

1. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик МР

Объектом исследований являлись 16 цилиндрических образцов с МР. Образцы представляли собой медные трубки внешним диаметром $d_{tb} = 54 \text{ mm}$ с толщиной стенки $h_{wl} = 2 \text{ mm}$ и длиной $L_{tb} = 150 \text{ mm}$. Толщина запрессованной МР составляла $L_{MR} = 40 \text{ mm}$. МР была изготовлена из проволок диаметром δ 0.1, 0.21, 0.42 и 0.8 mm. При этом пористость образцов для каждого диаметра лежала в диапазоне $\Pi = 70-85\%$ с шагом 5%.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, предназначенном для измерения перепада статического давления, динамической составляющей давления и температуры воздуха, проходящего через исследуемый образец. На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда.

Исследования проводились на воздухе при атмосферном давлении и температуре 20°C . Варьировался расход воздуха Q , $[\text{m}^3/\text{s}]$ через образец. Микроманометром, подключенным к трубке Пито-Прандтля 2, фиксировалось значение динамической составляющей давления воздуха P_D , $[\text{Pa}]$. Микропроцессорным интеллектуальным преобразователем дифференциального давления 3 фиксировалось значение перепада статического давления воздуха ΔP , $[\text{Pa}]$ на образце. Контроль температуры воздуха T_{air} , $[\text{C}]$, осуществлялся по термопаре 5. Приборная погрешность измерения перепада статического давления воздуха ΔP составляла 4% от измеренного

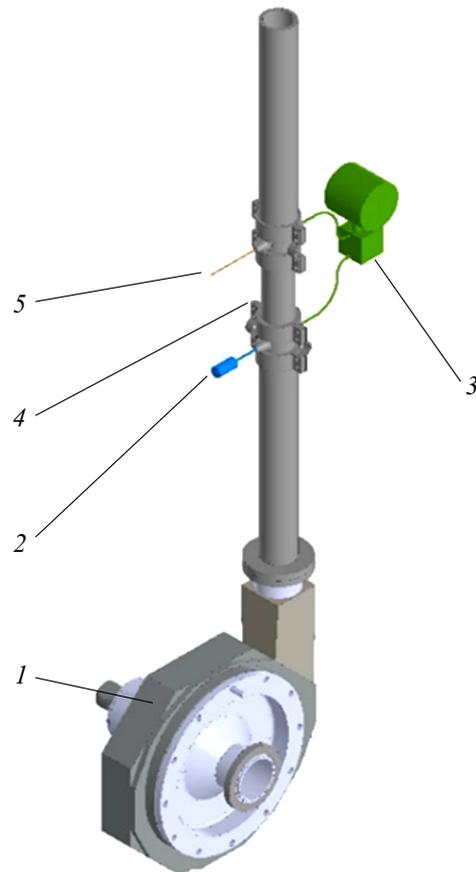


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — центробежный нагнетатель; 2 — прибор КПДМ-1 (трубка Пито-Прандтля, подключенная к микроманометру); 3 — ЭЛЕМЕР АИР-30 S3 CD-4 (преобразователь дифференциального давления); 4 — исследуемый образец с пористым элементом; 5 — термопара КТХА 02.01-062-К1-И-Е310-1,5-100/2000.

значения, приборная погрешность измерения температуры воздуха ΔT_{air} составляла 0.1°C , приборная погрешность измерения динамической составляющей давления воздуха ΔP_D составляла $(0.1 + 0.05 \cdot P_{Dmeasured})$, $[\text{Pa}]$. В стенде была реализована возможность линейного перемещения трубки Пито-Прандтля и термопары в измеряемых сечениях воздушного потока. Из измеренных в семи точках поперечного сечения подводного канала значений динамической составляющей давления воздуха P_{Di} определялся расход рабочей среды в соответствии с выражением:

$$Q = V_{med} \cdot S = \left(\sum_i \sqrt{2 \cdot P_{Di} / \rho(T_i)} \cdot \pi \cdot d^2 \right) / (4 \cdot n), \tag{1}$$

где V_{med} — средняя скорость движения воздуха, $[\text{m/s}]$; S — площадь внутреннего сечения канала, $[\text{m}^2]$; P_{Di} — измеренное значение динамической составляющей давления воздуха в i -й точке поперечного сечения трубы, $[\text{Pa}]$; $\rho(T_i)$ — функция плотности воздуха от температуры, $[\text{kg/m}^3]$; n — общее количество измерений; d — внутренний диаметр образца, $[\text{m}]$.

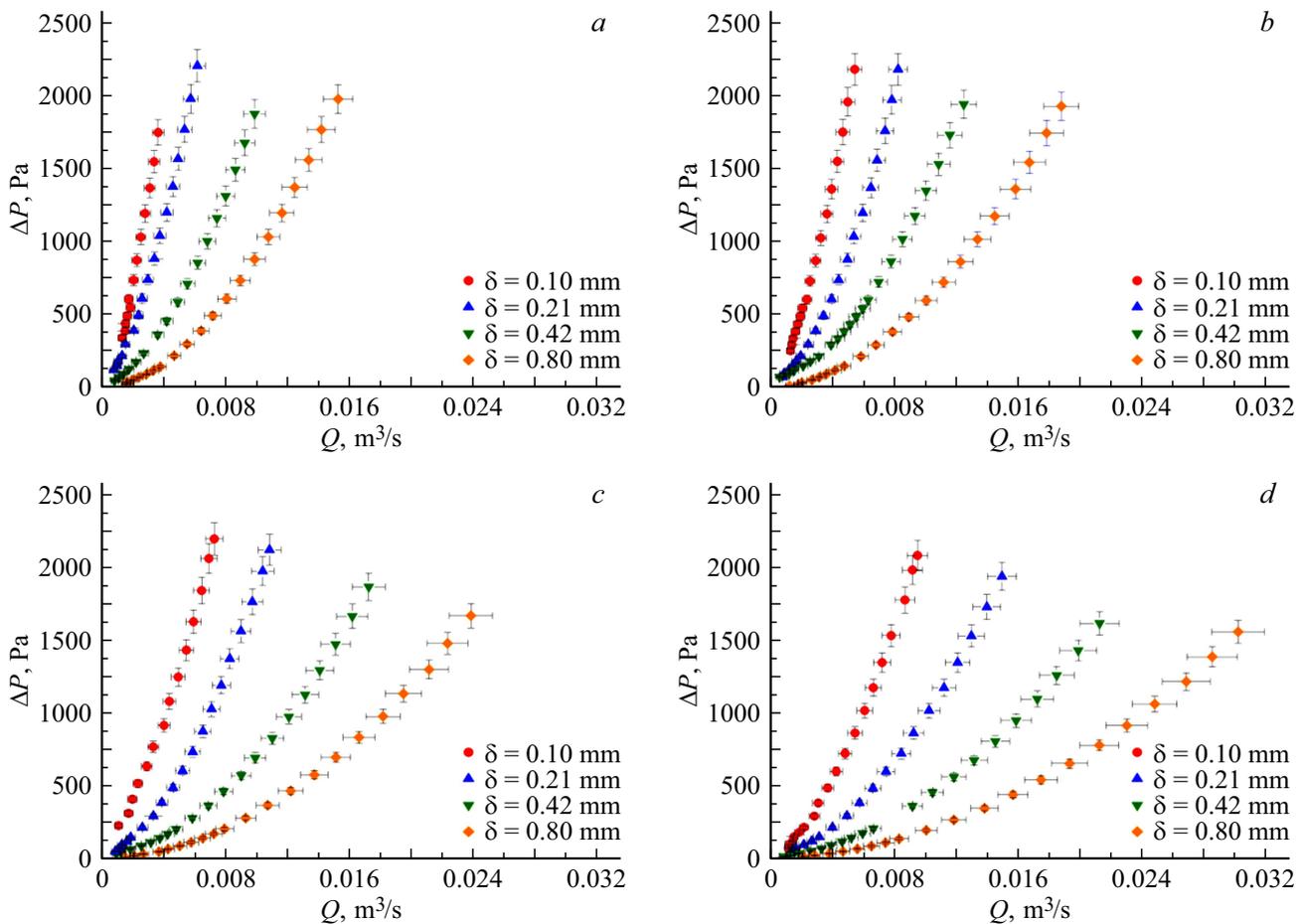


Рис. 2. Экспериментальные зависимости перепада давления воздуха на МР от расхода для образцов, отличающихся диаметром проволоки и пористостью: *a* — пористость 70%; *b* — 75%; *c* — 80%; *d* — 85%.

На рис. 2 представлены экспериментальные гидравлические характеристики для всех исследуемых образцов.

Из рисунка видно, что с увеличением диаметра проволоки при постоянном расходе воздуха перепад давления на МР с одинаковой пористостью падает. Также потери давления падают и с увеличением пористости, при фиксированных диаметре проволоки и расходе воздуха. Таким образом, экспериментально показано, что потери давления рабочей среды при движении через МР зависят как от пористости, так и от диаметра проволоки.

Гидродинамика потока рабочей среды в пористых материалах определяется гидравлическим сопротивлением, характеризующим потери давления, которое в общем случае представляется в виде суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих — модифицированное уравнение Дарси (уравнение Дюуи-Рейнольдса-Форшхеймера) [10–13]:

$$dP/dx = \alpha \cdot \mu \cdot V_f + \beta \cdot \rho \cdot V_f^2, \quad (2)$$

где P — давление рабочей среды, [Pa]; x — координата в направлении потока, [m]; μ — коэффициент динамической вязкости рабочей среды, [Pa·s]; ρ — плотность рабочей среды, [kg/m³]; V_f — скорость фильтрации,

отнесенная к полному сечению канала без учета заполнения площади проходного сечения пористым материалом, [m/s]; α — вязкостный коэффициент сопротивления материала, [m⁻²]; β — инерционный коэффициент сопротивления пористого материала, [m⁻¹].

С целью определения значения вязкостного и инерционного коэффициентов выражение (2) приводилось к следующему виду:

$$\Delta P / (L \cdot V_f) = \alpha \cdot \mu + \beta \cdot \rho \cdot V_f, \quad (3)$$

где L — длина пористого материала по направлению движения рабочей среды, [m].

Далее строилась графическая зависимость комплекса $A = \Delta P / (L \cdot V_f)$ от скорости фильтрации V_f , которая аппроксимировалась прямой

$$A(V_f) = B_0 + B_1 \cdot V_f. \quad (4)$$

По коэффициентам аппроксимирующей прямой определялись искомые значения вязкостного и инерционного коэффициентов МР:

$$\alpha = B_0 / \mu; \quad \beta = B_1 / \rho. \quad (5)$$

Таблица 1. Экспериментальные значения вязкостных α [m⁻²] коэффициентов сопротивления исследуемых образцов МР

Толщина проволоки, mm	Пористость, %			
	70	75	80	85
0.1	$(6.5 \pm 0.3) \cdot 10^8$	$(4.48 \pm 0.11) \cdot 10^8$	$(2.09 \pm 0.16) \cdot 10^8$	$(1.71 \pm 0.07) \cdot 10^8$
0.21	$(3.67 \pm 0.13) \cdot 10^8$	$(1.89 \pm 0.07) \cdot 10^8$	$(1.36 \pm 0.05) \cdot 10^8$	$(6.6 \pm 0.3) \cdot 10^7$
0.42	$(1.83 \pm 0.03) \cdot 10^8$	$(1.02 \pm 0.01) \cdot 10^8$	$(5.31 \pm 0.04) \cdot 10^7$	$(3.18 \pm 0.03) \cdot 10^7$
0.8	$(2.97 \pm 0.04) \cdot 10^7$	$(1.93 \pm 0.02) \cdot 10^7$	$(1.26 \pm 0.02) \cdot 10^7$	$(6.94 \pm 0.01) \cdot 10^6$

Таблица 2. Экспериментальные значения инерционных β [m⁻¹] коэффициентов сопротивления исследуемых образцов МР

Толщина проволоки, mm	Пористость, %			
	70	75	80	85
0.1	$(5.6 \pm 0.4) \cdot 10^3$	$(3.59 \pm 0.11) \cdot 10^3$	$(2.60 \pm 0.09) \cdot 10^3$	$(1.35 \pm 0.04) \cdot 10^3$
0.21	$(3.04 \pm 0.11) \cdot 10^3$	$(1.82 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$(1.07 \pm 0.03) \cdot 10^3$	$(5.80 \pm 0.14) \cdot 10^2$
0.42	$(1.05 \pm 0.05) \cdot 10^3$	$(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^2$	$(4.13 \pm 0.07) \cdot 10^2$	$(2.40 \pm 0.04) \cdot 10^2$
0.8	$(6.52 \pm 0.06) \cdot 10^2$	$(4.11 \pm 0.03) \cdot 10^2$	$(2.19 \pm 0.02) \cdot 10^2$	$(1.29 \pm 0.01) \cdot 10^2$

Таблица 3. Диапазоны чисел Рейнольдса для определения значения вязкостного и инерционного коэффициентов

Толщина проволоки, mm	Пористость, %			
	70	75	80	85
0.1	3300–5900	2400–8800	3300–12 000	2000–16000
0.21	1200–9900	1300–13 400	1400–17 900	2200–24 800
0.42	3600–16 100	4300–20 500	5200–28 200	1400–35 200
0.8	2600–25 200	3400–31 600	2500–39 900	3700–50 600

Полученные значения данных коэффициентов и диапазоны чисел Рейнольдса, в пределах которых они найдены, представлены в табл. 1–3 соответственно. Для числа Рейнольдса в качестве определяющей скорости использовалась скорость фильтрации V_f , в качестве определяющего размера — гидравлический диаметр канала, в который установлена МР, а в качестве температуры, определяющей значение кинематической вязкости μ , — температура газа на выходе из пористого элемента T_{air} . Число Прандтля во всех измерениях лежало в диапазоне $Pr = 0.733–0.745$. В качестве температуры, определяющей теплофизические свойства рабочей среды, использовалась температура газа на выходе из пористого элемента T_{air} .

На основе полученных значений с использованием метода анализа экспериментальных данных [14] были найдены эмпирические зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления исследуемых образцов МР от пористости и диаметра проволоки, из которой они изготовлены:

$$\alpha = \delta^{-2} \cdot P^{-8} \cdot C, \tag{6}$$

$$\beta = 0.031 \cdot \delta^{-1} \cdot P^{-8}, \tag{7}$$

где δ — диаметр проволоки, из которой изготовлена МР, [m]; P — пористость МР; C — коэффициент,

подобранный опытным путем для каждого из образцов. Для МР из проволоки 0.1 mm $C = 0.5$; для МР из проволоки 0.21 mm $C = 1.25$; для МР из проволоки 0.42 mm $C = 1.5$; для МР из проволоки 0.8 mm $C = 1$.

Найденные эмпирические выражения описывают экспериментальные данные со средними отклонениями в 20 и 13% для вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления соответственно и применимы в диапазонах диаметра проволоки $\delta = 0.1–0.8$ mm, пористости $P = 70–85\%$ и чисел Рейнольдса, представленных в табл. 3. В соответствии с (3) были выполнены расчеты потерь давления от расхода воздуха при его движении сквозь исследуемые элементы МР в рамках режимных параметров, соответствующих экспериментальным, при этом в расчет закладывалось отклонение пористости в $\pm 1\%$, обусловленное технологией изготовления. На рис. 3 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей перепада давления от расхода. Экспериментальные данные представлены точками, область расчетных значений потерь давления — штриховкой.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что найденные экспериментальным методом эмпирические зависимости вязкостного (6) и инерционного (7) коэффициентов сопротивления в рамках исследован-

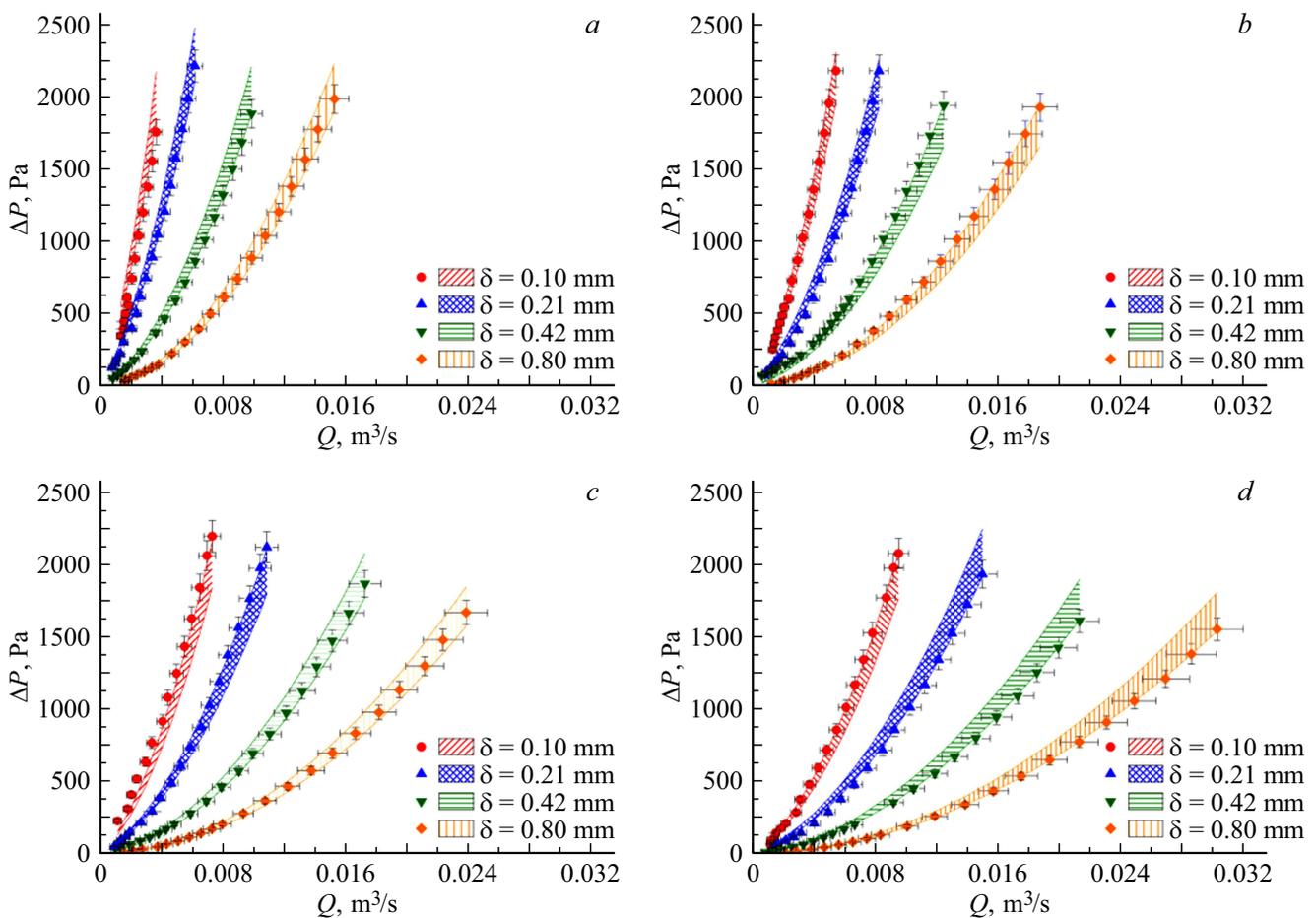


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости перепада давления воздуха на МР от расхода для образцов, отличающихся диаметром проволоки и пористостью: *a* — пористость 70%; *b* — 75%; *c* — 80%; *d* — 85%.

ных диапазонов чисел Рейнольдса позволяют выполнить оценку потерь давления рабочей среды при ее движении сквозь пористые элементы МР в диапазоне пористости $0.7 \leq \Pi \leq 0.85$ и диаметра проволоки $0.1 \text{ mm} \leq \delta \leq 0.8 \text{ mm}$, при этом максимальное отклонение расчетных значений потерь давления от экспериментальных не превышает 20%.

Заключение

В работе приведены результаты экспериментальных исследований гидравлических характеристик высокопористых элементов из МР в диапазоне пористости $70\% \leq \Pi \leq 85\%$ из проволоки диаметром 0.1, 0.21, 0.42 и 0.8 mm. Экспериментально показано, что при фиксированном расходе рабочей среды и одинаковой пористости потери давления на элементах МР из тонкой проволоки превышают потери на элементах из толстой проволоки.

По экспериментально полученным гидравлическим характеристикам для каждого из исследуемых образцов определены значения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления, что позволило найти

зависимость данных параметров от пористости и диаметра проволоки. Эмпирическая зависимость вязкостного коэффициента сопротивления описывается выражением $\alpha = \delta^{-2} \cdot \Pi^{-8} \cdot C$, где C — константа, определяемая диаметром проволоки МР. Эмпирическая зависимость инерционного коэффициента сопротивления описывается выражением $\beta = 0.031 \cdot \delta^{-1} \cdot \Pi^{-8}$. Максимальное отклонение расчетных потерь давления с использованием найденных эмпирических коэффициентов не превышает 20% в исследованном динамическом диапазоне чисел Рейнольдса и параметров МР.

Полученные результаты представляют практический интерес, так как найденные эмпирические выражения могут быть использованы в инженерных гидравлических и тепловых расчетах при проектировании конструктивных элементов на основе МР для установок и систем различного назначения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. *Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов* (Машиностроение, М., 1988)
- [2] В.В. Харитонов. *Теплофизика лазерных зеркал* (МИФИ, М., 1993)
- [3] С.В. Белов, П.А. Витязь, В.К. Шелег, В.М. Капцевич, В.А. Павлов, Л.С. Шмелев, В.К. Сорокин, А.Г. Косторнов, А.Е. Рутковский, Д.М. Карпинос, В.С. Спиридонов, В.Н. Анцифиров. *Пористые проницаемые материалы* (Металлургия, М., 1987)
- [4] С.Н. Шошин, М.В. Кременчугский, Р.А. Казаков, Д.А. Линяев. *Способ изготовления пористой детали из проволочного материала* (Патент на изобретение RU 2663389C1, 2018)
- [5] А.М. Жижкин, Г.В. Лазуткин, М.А. Брылева, Г.В. Изранова, С.В. Путилин. *Вестник Сам. ГУПС*, **38** (4), 16 (2017).
- [6] Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.А. Легчанов, М.А. Субарев, А.Е. Хробостов. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, **124** (1), 92 (2019).
- [7] А.М. Жижкин. В сб. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения* (Самара, 2003)
- [8] А.А. Добров, А.Е. Хробостов, Д.С. Тимаев, Г.Н. Качалин, А.В. Копалкин, Е.А. Кудряшов. *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, **127** (4), 72 (2019).
DOI: 10.46960/1816-210X_2019_4_72
- [9] C.Y. Zhao, T. Kim, T.J. Lu, H.P. Hodson. *Thermal Transport Phenomena in Porous Metal Foams and Sintered Beds, Final report* (University of Cambridge, 2001)
- [10] И.А. Попов. *Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах* (Центр инновационных технологий, Казань, 2007)
- [11] T.J. Lu, H.A. Stone, M.F. Ashby. *Acta Mater.*, **46**, 36195 (1998).
- [12] O. Reynolds. *Papers on Mechanical and Physical Subjects* (Cambridge University Press, 1900)
- [13] P.Z. Forschheimer. *Vereines Deutscher Ingenieure*, **45**, 1781 (1901).
- [14] А.Т. Гаюбов. Автореф. *Анализ влияния нелинейных эффектов на течения флюидов и получение универсального уравнения движения флюидов в пористых средах с различной геометрией* (РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, М., 2021)