

В. А. Майоров, Л. Л. Васильев

ВЛИЯНИЕ ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ПУЗЫРЬКОВ РАСТВОРЕННОГО В ЖИДКОСТИ ГАЗА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЕЕ В ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛАХ. I. ДВИЖЕНИЕ ДЕАЭРИРОВАННОЙ ВОДЫ

Приведены методика и результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления при течении деаэрированной воды сквозь пористые металлы.

Одним из основных условий надежной работы разнообразных тепло- и массообменных устройств с пористыми элементами является возможность точного и предсказуемого регулирования расхода капельной жидкости при течении ее сквозь проницаемые матрицы. Однако в этом процессе часто наблюдается нежелательное явление неравномерного и невоспроизводимого уменьшения потока, основной причиной которого, как показано в работе [1], является закупорка пористой структуры выделяющимися пузырьками растворенного в жидкости газа. Последующие аналитическое и экспериментальное исследования [2] позволили выяснить, что зарождение пузырьков и выделение в них растворенного газа при установившемся режиме течения сквозь проницаемую матрицу происходят в условиях, близких к равновесной насыщенности.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования влияния различных параметров процесса на интенсивность выделения пузырьков растворенного газа и на величину вызываемого этим повышением гидравлического сопротивления при движении капельной жидкости (воды) в пористых металлах.

Экспериментальная установка. Гидравлический стенд, изображенный на рис. 1, обеспечивал тщательную очистку и деаэрацию дистиллированной воды, а также подачу ее в широких диапазонах расходов и температуры. Деаэрация воды осуществлялась предварительным прогревом до $\approx 80^\circ\text{C}$ и последующим ее охлаждением под вакуумом в баке 2, снизу которого она без перемешивания всасывалась дозирующим насосом 4. Для исключения пульсаций расхода и давления после насоса в ресивер 5 были помещены два надутых воздухом баллона из эластичной резины.

От механических примесей воду очищали двойным комбинированным фильтром 6. Он имел два последовательно установленных в отдельных кольцах пористых диска толщиной 5 мм и диаметром 50 мм, спеченных из сферического бронзового порошка фракции 63—100 мкм, к входной поверхности каждого из которых прижат сменный фильтр из плотной фильтровальной бумаги толщиной 0,4 мм со средним размером пор 3—7 мкм. Кроме того, предварительная очистка проводилась стеклянными фильтрами со сменными бумажными при заливке воды в бак 2 под действием вакуума в нем.

Измерение и регулировку расхода воды осуществляли с помощью измерительного стенда I, после которого она поступала в теплообменник заполненного глицерином термостата 9 и далее в рабочую камеру 10, закрепленную на стенде II, установленном непосредственно на термостате.

Пористый образец 1 цилиндрической формы с кольцевым бортиком на входной стороне (рис. 2) был герметично закреплен с помощью эпоксидной смолы в текстолитовой втулке 2. На подводящем фланце 3 смонтирован охранный конвективный теплообменник 4, обогреваемый глицерином из термостата. На обоих фланцах имеются отводы для под-

ключения манометров. Давление на выходе образца регулировали вентилем (см. рис. 1).

В экспериментах измеряли температуру и давление воды внутри пористой матрицы. Хромель-копелевая термопара была герметично заделана в проходящем сквозь текстолитовую втулку радиальном сверлении на глубину $\approx 0,5$ радиуса до оси образца. Термоэлектроды выходились между фланцами. В качестве датчика давления в потоке внутри пористого металла использовалась инъекционная игла внешним диаметром

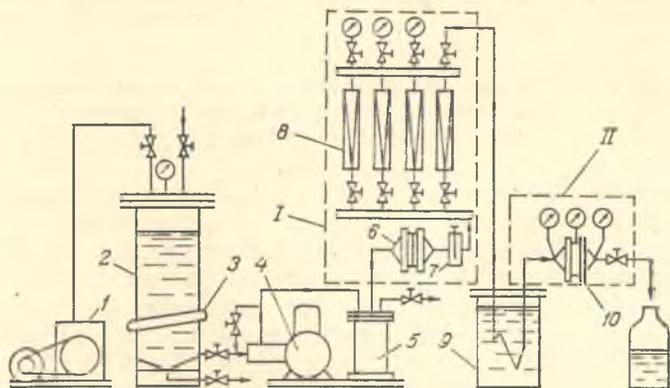


Рис. 1. Схема гидравлического стенда: 1 — вакуумный насос; 2 — бак; 3 — трубчатый электронагреватель; 4 — дозирующий насос; 5 — ресивер; 6 — фильтр; 7 — регулирующий вентиль; 8 — батарея стеклянных ротаметров; 9 — термостат; 10 — рабочая камера; I, II — измерительные стенды

1 мм, герметично заделанная в проходящем через текстолитовую втулку радиальном канале на глубину $\approx 0,5$ радиуса до оси. К игле, а также к рабочей камере до и после образца подключены образцовые манометры.

Методика проведения экспериментов. Для определения влияния выделяющихся пузырьков растворенного в воде воздуха на увеличение сопротивления при движении ее в пористых металлах была постепенно отработана программа трехдневных испытаний каждого образца.

На рис. 3 приведены две схемы проведения ежедневных экспериментов: *a* включает 15 серий измерений. Отдельное измерение на схеме обозначено точкой и определяли при фиксированном расходе воды давления P_2 перед образцом и P_1 внутри него.

Серии 01, 03, 05, 06, 08, 10, 11, 13, 15 включают замеры сначала при постепенном увеличении расхода (9 отсчетов), а затем при постепенном его уменьшении через те же самые 9 значений при атмосферном давлении после образца. Эти значения расхода одинаковы для всех образцов и при их одинаковых диаметрах 28 мм соответствуют следующим удельным массовым расходам воды: 0,915; 1,43; 2,08; 2,70; 4,28; 6,80; 10,0; 13,7; 17,3 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Цель этих серий — установить влияние величины удельного расхода воды и предыстории процесса (увеличение или уменьшение расхода) на сопротивление образца.

При удельных расходах меньше 4,28 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ показания подключенного к игле манометра не снимали вследствие чрезмерно большой ошибки отсчета малого давления.

Серии 02, 07, 12 включают измерения через одну минуту в течение 5 мин при постоянном массовом расходе 10 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и атмосферном давлении на выходе образца. Их назначение — выявить изменение сопротивления со временем при постоянном расходе.

В сериях 04, 09, 14 проводятся те же замеры, что и в сериях 02, 07, 12, но при постоянном повышенном избыточном давлении P_0 после образца, равном 5 ати. Цель их — в сравнении с сериями 02, 07, 12 определить влияние давления после образца на изменение его сопротивле-

ния со временем. Группы 01—05, 06—10, 11—15 различаются температурой: серии 01—05 проводятся при постоянной температуре воды 20 °С; 06—10 — при 50 °С; 11—15 — при 90 °С. Этим определяли воздействие температуры на изменение сопротивления.

В 1-й день трехдневной программы выполнены эксперименты с деаэрированной водой только по сериям 01, 06, 11 для нахождения исходных характеристик образца. Кроме того, проводили дополнительные измерения по серии 01 при обратном токе воды через образец (при сме-

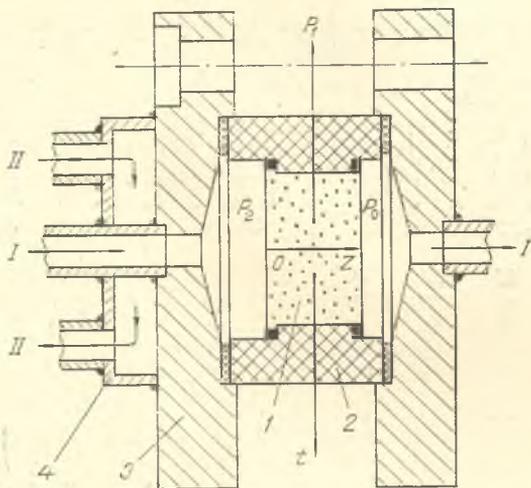


Рис. 2. Схема крепления образца в рабочей камере: 1 — пористый образец; 2 — текстолитовая втулка; 3 — подводящий фланец; 4 — конвективный охранный нагреватель; t , P_1 — выходы термомпары и иглы; I — поток воды; II — поток обогревающего глицерина

не его положения в рабочей камере) для проверки правильности показаний иглы. После каждого дня образцы высушивали в сушильном шкафу.

Эксперименты по схеме *a* из 15 серий проводили во 2-й и 3-й дни программы.

Во 2-й день опыты выполняли с насыщенной воздухом водой. Насыщение осуществлялось длительным перемешиванием ее в стеклянных бутылках при атмосферном давлении и температуре 20 °С. При этом вода после отстаивания подавалась дозирующим насосом прямо из бутылки.

В 3-й день снова использовалась деаэрированная вода.

Сравнение данных 1-го и 3-го дней программы позволило выявить изменение характеристик образца со временем — не произошло ли повышения его сопротивления вследствие загрязнения механическими примесями. Сравнение результатов 2-го дня программы с результатами 1-го и 3-го дней позволяет оценить влияние пузырьков растворенного воздуха на изменение сопротивления образца.

Для более полного исследования влияния температуры и предыстория процесса (направления изменения температуры) была отработана 3-дневная программа измерений по схеме *b*. Она включала одинаковые серии 01—05 типа серий 01 по схеме *a*, проводимые сначала при последовательном увеличении температуры при значениях 20, 40, 60, 80, 90 °С, а затем серии 06—10 при тех же ее величинах, но в обратной их последовательности.

Здесь следует отметить, что в промежутках времени между сериями замеров, когда происходило изменение температуры термостата, в рабочей камере повышалось давление до 0,5 МПа, чтобы исключить возможности насыщения образцов пузырьками воздуха.

В 1-й день программы эксперименты выполняли с деаэрированной водой только по сериям 01—05 (определены исходные характеристики

образцов). Кроме того, проведены измерения по серии 01 при обратном токе — проверка правильности показаний иглы. Во 2-й день опыты проводили с насыщенной воздухом водой по полной программе. В 3-й день замеры осуществляли с деаэрированной водой только по сериям 01—05 для определения конечных характеристик образцов.

Методика обработки результатов. Данные гидравлических испыта-

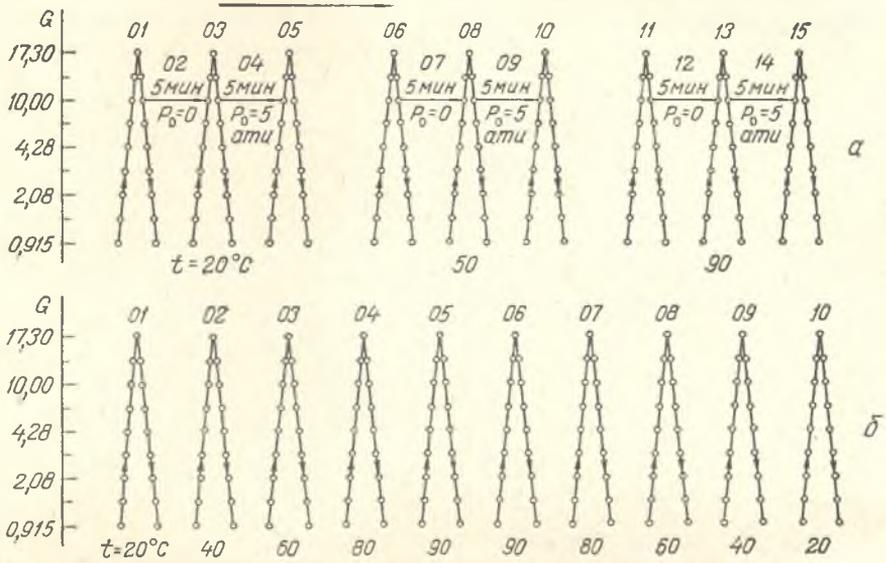


Рис. 3. Схемы выполнения ежедневных измерений. G , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$

ний обрабатывали исходя из уравнения движения жидкостей и газов в пористых материалах

$$-\frac{dP}{dZ} = \alpha \mu \nu G + \beta \nu G^2. \quad (1)$$

Сначала находили исходные гидравлические характеристики образцов — вязкостный α и инерционный β коэффициенты сопротивления. Для этого использовали данные 1-го дня по перепаду давления $P_2 - P_0$ на всем образце при течении деаэрированной воды, которые имели вид

$$(P_2 - P_0) / \delta \mu \nu G = \alpha + \beta G / \mu. \quad (2)$$

Оказалось, что для всех образцов в исследованном диапазоне расходов и температур обработанные таким способом результаты в пределах экспериментального разброса 5% располагаются около горизонтальной прямой $(P_2 - P_0) / \delta \mu \nu G = \alpha = \text{const}$. Затем рассчитывалась нормирующая величина перепада давления на образце для всех исследованных значений расхода отдельно для каждой температуры:

$$(P_2 - P_0)^* = \alpha \mu \nu \delta G. \quad (3)$$

После этого результаты по перепаду давления $P_2 - P_0$ на всем образце 2-го и 3-го дней программы приводили к безразмерному виду

$$\Pi_{2-0} = (P_2 - P_0) / (P_2 - P_0)^*. \quad (4)$$

Преимущества такой формы обработки результатов состоят в следующем: а) сглаживаются данные, поскольку величина α определяется в итоге сравнения результатов нескольких серий из 17 измерений каждая при различных температурах; б) отклонение величины Π_{2-0} от единицы для результатов 2-го и 3-го дней программы позволяет быстро оценить изменение сопротивления образца только вследствие внешних эф-

фектов — выделения пузырьков растворенного воздуха или забивания матрицы механическими загрязнениями.

Аналогичным образом обрабатывали данные по перепаду давления на отдельных участках образца: от входа до иглы $P_2 - P_1$ и от иглы до выхода $P_1 - P_0$. Здесь сначала находили расстояние $Z_{и}$ иглы от входной поверхности ($Z=0$) в безразмерном виде $z_{и} = Z_{и}/\delta$. Эта величина находилась как среднее всех данных 1-го дня для различных температур от стношения перепада давления $P_1 - P_0$ на выходном участке образца меж-

Характеристики исследованных образцов

№ образца	Пористость P	Фракция порошка, мкм	Средний размер пор d_{II} , мкм	Толщина образца δ , мм	Координата иглы $z_{и}$	Коэффициент сопротивления $\alpha \cdot 10^{-12}$, м ⁻²
1	0,335	63—100	26,5	20,1	0,52	0,205
2	0,350	50—63	20,0	19,7	0,47	0,53
3	0,300	50—63	16,0	19,15	0,64	0,59
4	0,285	50—63	14,8	19,0	0,39	0,925

ду иглой P_1 и выходом P_0 к полному перепаду давления $P_2 - P_0$ на образце:

$$1 - z_{и} = \frac{(P_1 - P_0)}{(P_2 - P_0)}. \quad (5)$$

После этого результаты по перепаду давления на участке от иглы до выхода из образца приводили к безразмерному виду:

$$\Pi_{1-0} = (P_1 - P_0)/(1 - z_{и})(P_2 - P_0)^* \quad (6)$$

и аналогично для участка от входа до иглы

$$\Pi_{2-1} = (P_2 - P_1)/z_{и}(P_2 - P_0)^*. \quad (7)$$

Отклонение величин Π_{1-0} , Π_{2-1} от единицы позволяет оценить изменение сопротивления на отдельных участках во 2-й и 3-й дни программы.

Сопротивление при течении деаэрированной воды. Пористые цилиндрические образцы были изготовлены из сферического бронзового порошка спеканием при свободной засыпке в форме. Пористость определялась объемно-весовым методом, средний размер пор оценивался в соответствии с рекомендациями работы [3]. Характеристика образцов показана в таблице, а их микроструктура представлена на рис. 4.

Эксперименты по полной трехдневной программе по схеме *a* (см. рис. 3) выполнены с образцами № 1—3; по полной трехдневной программе по схеме *b* — с образцами № 2, 4. Для всех образцов получены качественно одинаковые результаты.

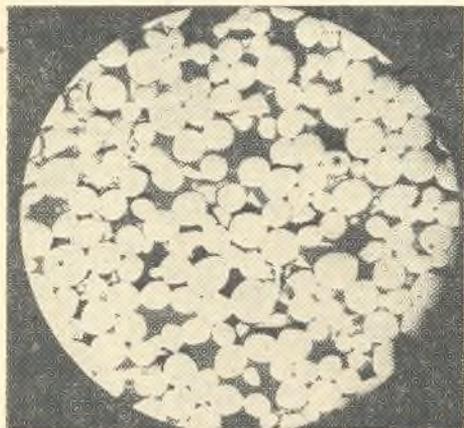
Для идентификации результатов принята составная нумерация, например 2.11, *a*. Первая цифра обозначает номер дня трехдневной программы (2-й); вторые две — номер серии (11); буква *a* — вид схемы проведения эксперимента согласно рис. 3.

В исследованном диапазоне удельных массовых расходов $G=0,915 \div 17,3$ кг/(м²·с) и интервале температур 20—90 °С приведенные к виду (2) данные 1-го дня в пределах экспериментального разброса $\mp 5\%$ расположены около горизонтальной прямой $(P_2 - P_0)/\delta \mu \nu G = \alpha = \text{const}$. Это свидетельствует о том, что при таких условиях инерционная составляющая сопротивления $\beta \nu G^2$ много меньше вязкостной $\alpha \mu \nu G$ и поэтому величину β определить не удалось. Значения коэффициента вязкостного сопротивления α приведены в таблице. Сравнение с имеющимися в работе [4] аналогичными характеристиками для металлов из сферического порошка со средним размером частиц 50 мкм показало их близкое соответствие: в [4] для $P=0,30$ найдено $\alpha=1 \cdot 10^{12}$ м⁻².

Полученные результаты лишней раз подтверждают тот факт, что коэффициент вязкостного сопротивления является характеристикой порис-

той матрицы и не изменяется с ростом температуры (в данных условиях в интервале 20—90 °С), тогда как перепад давления на образце при течении капельных жидкостей резко снижается за счет уменьшения вязкости.

Сравнение данных проливки прямым и обратным током при температуре 20 °С в 1-й день программы показало, что перепад давления на образце при этом одинаков, а сумма показаний подключенного к игле манометра при прямом и обратном токе равна перепаду давления на образце — игла дает правильные показания давления внутри пористой структуры. Значения безразмерной координаты $z_{и}$ установки иглы приведены в таблице.



образце — игла дает правильные показания давления внутри пористой структуры. Значения безразмерной координаты $z_{и}$ установки иглы приведены в таблице.

Рис. 4. Микроструктура ($\times 100$) бронзы пористостью $\Pi=0.34$, изготовленной спеканием свободно засыпанного сферического порошка фракции 50—63 мкм

Анализ результатов 3-го дня показывает, что значения безразмерных перепадов давления на образце Π_{2-0} и на отдельных его участках Π_{1-0} , Π_{2-1} в пределах экспериментального разброса не отличаются от единицы как во время проведения измерений при определенной температуре для каждой из групп серий 01.a—05.a, 06.a—10.a, 11.a—15.a, так и при изменении температуры и переходе из одной группы в другую. При этом не наблюдается и увеличения перепада давления со временем в сериях 02.a, 04.a, 07.a, 09.a, 12.a, 14.a. Аналогичные результаты получены и для измерений по схеме б. На основании этого можно сделать заключение о том, что при длительном течении деаэрированной воды с различными расходами и температурой не происходит непредсказуемого увеличения сопротивления образца и отсутствует загрязнение его механическими примесями при очистке воды фильтрами, средний размер пор которых в 3—5 раз меньше аналогичной характеристики исследуемого образца.

К этому можно добавить, что за день измерений по полной программе сквозь образец проходило до 50 л воды. К концу третьего дня через образец в общей сложности протекало до 125 л. Бумажные фильтры с размером пор 3—7 мкм приходилось менять каждый день.

Обозначения

G — удельный массовый расход жидкости; Π — пористость; P — давление; v — удельный объем жидкости; Z — координата; α , β — вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления пористого материала; δ — толщина образца; μ — динамическая вязкость жидкости; Π — относительный перепад давления; нижние индексы 0, 1, 2 относятся к параметрам на выходе, внутри и на входе образца соответственно.

Nomenclature

G , specific mass flow rate of the liquid; Π , porosity; P , pressure; v , specific volume of the liquid; Z , coordinate; α , β , viscous and inertia resistance coefficients of the porous material; δ , sample thickness; μ , dynamic viscosity of the liquid; Π , relative pressure drop. Subscripts: 0, 1, 2, refer to the parameters at the outlet, inside and at the inlet of the sample, respectively.

Figure Captions

Fig. 1. Scheme of the hydraulic stand; 1, vacuum pump; 2, tank; 3, tubular electric heater; 4, batching pump; 5, receiver; 6, filter; 7, controlling valve; 8, battery of glass rotameters; 9, thermostat; 10, working chamber; 1, 11, measuring stands.

Fig. 2. Scheme of fastening a sample in the working chamber: 1, porous sample; 2, textolite insert; 3, conveying flange; 4, convective safety heater; t, P_1 , outputs of a thermocouple and needle; I, water flow; II, heating glycerine flow.

Fig. 3. Scheme of performing everyday measurements.

Fig. 4. Microstructure ($\times 100$) of bronze with a porosity $\Pi=0.34$ manufactured by sintering freely charged spherical powder 50-63 μm in fraction.

Summary

The installation, the experimental methods and the processing procedures of the experimental results as well as some data on the effect of the evolving bubbles of the gas dissolved in the liquid upon the hydraulic resistance of the liquid when flowing through porous metals are described.

Литература

1. Васильев Л. Л., Майоров В. А. Особенности движения капельных жидкостей в пористых материалах.— ИФЖ, 1981, т. 40, № 6, с. 1111—1123.
2. Майоров В. А., Васильев Л. Л. Зарождение газовых и паровых пузырьков при движении жидкости в пористых металлах.— ИФЖ, 1982, т. 42, № 4, с. 533—539.
3. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении.— М.: Машиностроение, 1981.—247 с.
4. Белов С. В. Вязкостный и инерционный коэффициенты насадок и пористых металлов из сферических частиц.— Изв. вузов. Машиностроение, 1976, № 10, с. 87—90.

Новополоцкий политехнический институт,
ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, г. Минск

30.11.83.

УДК 533.6.08:532.526:536.244

В. К. Зеленюк, А. И. Попов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Показано, что инерционность теплового пограничного слоя проявляется при сравнительно высоких, однако вполне достижимых в эксперименте частотах и является существенной поправкой к обычно определяемой тепловой инерции термодатчиков.

Формирование сигнала контактного термометра и термоанемометра во многом определяется характеристиками их теплового и гидродинамического слоев. При измерениях пульсаций температуры и скорости пограничные слои обычно считаются квазистационарными, т. е. предполагается, что в каждый момент времени их характеристики точно такие же, как у стационарных пограничных слоев с имеющимися в этот момент времени мгновенными значениями скорости и температуры набегающего потока. Другими словами — пограничные слои считаются безынерционными. Это приводит к тому, что задача о внутреннем нестационарном теплообмене датчика решается при граничных условиях третьего рода с постоянным коэффициентом теплопередачи. В таком приближении инерционность термометров и термоанемометров изучена достаточно хорошо [1].

Очевидно, что это приближение выполняется при медленных изменениях скорости или температуры и нарушается при быстрых. Имеются теоретические [2—4] и экспериментальные [4—6] исследования, уточняющие это общее положение.