

ОБЗОРЫ

УДК 532.685

*Л. Л. Васильев, В. А. Майоров***ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ
В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Возможность точного и предсказуемого регулирования расхода капельной жидкости в пористых материалах является одним из важнейших условий надежной работы разнообразных тепло- и массообменных устройств, основанных на использовании течения жидкости в этих материалах. Однако эксперименты по фильтрации жидкости в пористых материалах показали, что наблюдается нежелательное явление неравномерного и невоспроизводимого во времени уменьшения потока. В литературе это явление известно под названием «фильтрационного эффекта» [1] или по аналогии с течением жидкости через капилляры «облитерацией» [2] и обнаружено при движении различных жидкостей в пористых материалах [1—14]. Типичный пример уменьшения потока жидкости через пористый образец при постоянном перепаде давления приведен на рис. 1.

Большой интерес представляет обобщение и анализ имеющихся экспериментальных данных для выяснения истинных причин указанного явления, о котором до настоящего времени в литературе существуют различные мнения.

Наиболее подробно этот вопрос обсуждается в [2, 3]. В качестве основных причин уменьшения потока жидкости при течении в пористых материалах называются следующие:

1) физические свойства (в частности, вязкость) жидкости в тонком слое вблизи сплошной поверхности отличаются от физических свойств в большом объеме;

2) на поверхности твердого тела адсорбируются слои молекул, которые постепенно уменьшают проходное сечение пор в пористой структуре.

При контакте жидкости с твердой поверхностью образуются адсорбционные пленки, свойства которых отличаются от свойств жидкости в большом объеме. Если жидкость является неполярным диэлектриком, дипольный момент молекул которых равен нулю, то взаимодействие молекул материала и жидкости обусловлено молекулярным силовым полем. К таким жидкостям относятся бензол, керосин и т. д. Если жидкость является полярным диэлектриком, то электрическое поле материала вызывает определенную ориентацию молекул жидкости и образование полимолекулярного адсорбционного слоя. К таким жидкостям относятся вода, ацетон и т. д. Если жидкость содержит свободные ионы, то вследствие их адсорбции образуется электрически заряженный двойной слой.

Независимо от причины образования в поверхностных слоях наблюдается изменение структуры жидкости (упорядочение слоев молекул) и, следовательно, изменение структурно чувствительных физических свойств (в частности, вязкости и теплопроводности). Отсюда вытекает,

что первая из упомянутых ранее причин облитерации есть следствие образования адсорбированных слоев.

Для подтверждения гипотезы о существенном влиянии адсорбированного слоя на уменьшение расхода жидкости в пористых материалах необходимо иметь информацию о толщине этого слоя. Толщина его зависит от теплофизических и термодинамических свойств жидкости и твердого тела, температуры, структуры пористого материала. При наложении сдвиговых напряжений (внешнего течения) возможно уменьшение толщины адсорбированных слоев из-за срыва внешних слабо

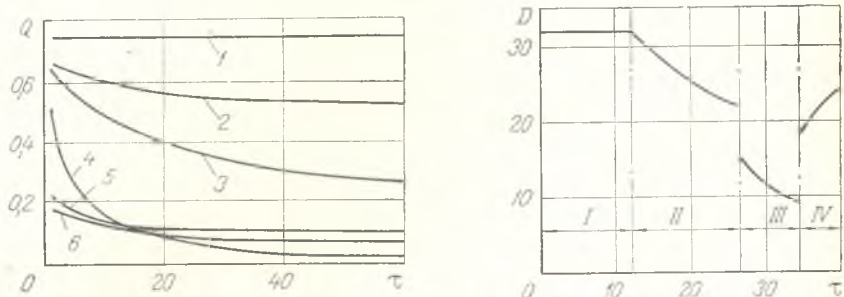


Рис. 1. Изменение расхода жидкости при течении сквозь тонкопористые металлы при постоянном перепаде давления на образце $\Delta P=0,17$ бар [14]: 1—гептан; 2—бензол; 3—изопропиловый спирт; 4—вода; 5—0,5%-ный водный раствор ПАВ; 6—гептан (1—5—образец из пористого титана со средним размером пор 7,3 мкм; 6—пористый фторопласт со средним размером пор 3,6 мкм). Q , $\text{см}^3/\text{с}$; τ , мин

Рис. 2. Изменение расхода воды через стеклянный фильтр при постоянном перепаде давления $\Delta P=0,037$ бар и изменяющемся входном давлении [4]: I—вакуум на входе 0 мм рт. ст.; II—93; III—380; IV—0 мм рт. ст. D , $\text{см}^3/\text{бар}\cdot\text{с}$; τ , мин

связанных молекул. Следует ожидать также постепенного ослабления пограничных слоев жидкости при увеличении температуры вследствие возрастания интенсивности теплового движения молекул.

Непосредственное экспериментальное определение толщины очень тонких граничных слоев отличается значительными трудностями и часто приводит к противоречивым результатам. Наиболее достоверные данные, полученные Б. В. Дерягиным с сотрудниками, приведены в [15—19], где имеется также исчерпывающая библиография по этому вопросу. Следует отметить, что полученные различными способами результаты полностью совпадают. В табл. 1 приведены данные работы [17] по толщинам граничных слоев δ некоторых жидкостей на поверхности кварца при комнатной температуре. Обращает на себя внимание тот факт, что неполярные жидкости ($\mu=0$) не образуют измеримого граничного слоя ($\delta=0$). В [15, 19] показано, что средняя вязкость всего граничного слоя непрерывно возрастает с уменьшением его толщины, а предположение о локальном уменьшении вязкости в слое по экспоненциальному закону по мере удаления от твердой поверхности приводит к результатам, качественно согласующимся с экспериментом [19].

Выполненные в [19] количественная оценка и экспериментальная проверка показали, что электрический двойной слой и электровязкостный эффект (торможение вязкого течения обратным электроосмотическим потоком, вызванным потенциалом течения) не являются причинами заметного повышения вязкости жидкости в граничном слое. В работах [19, 20] показано также, что отличие вязкости воды и водного раствора сахарозы в пристенном слое от их объемных значений с повышением температуры уменьшается и исчезает совсем при температуре выше 70°C .

Таблица 1
Физические свойства жидкостей при температуре 20 °С

Жидкость	Дипольный момент μ , Дебай	Толщина граничного слоя на поверхности кварца δ , мкм [17]	Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma \cdot 10^3$, Н/м	Коэффициент абсорбции Бунзена для кислорода
Вода	1,84	0,09	72,75	0,031
Ацетон	2,85	0,08	23,70	0,216
Бензол	0	0	28,87	0,163
Четыреххлористый углерод	0	0	25,68	0,230
Этиловый спирт	1,68	0,06	22,03	0,143

Из приведенных данных следует, что адсорбированные пленки жидкости могут оказывать некоторое влияние на уменьшение расхода жидкости, но только в пористых материалах со средним размером пор значительно меньше микрона.

Таким образом, образование адсорбированного граничного слоя нельзя считать причиной облитерации, потому что оно не объясняет ряд следующих наблюдаемых особенностей процесса течения жидкости в пористых материалах различной структуры и среднего размера пор в диапазоне 1—100 мкм.

1. Почему происходит уменьшение массового потока жидкости? Наличие граничных слоев должно только уменьшать проницаемость по жидкости по сравнению с проницаемостью по газу, делать эту характеристику воспроизводимой при повторных испытаниях, но не вызывать непрерывное уменьшение расхода жидкости со временем при постоянных условиях фильтрации.

2. Почему с увеличением скорости течения жидкости возрастает и скорость уменьшения расхода? В этом случае должно происходить уменьшение толщины адсорбированных слоев за счет срыва внешних слабо связанных рядов молекул жидкости и как следствие должна уменьшаться производная по времени от массового потока.

3. Почему наблюдается уменьшение расхода при течении неполярных жидкостей (керосин, бензол, гептан), которые не образуют измеримого граничного слоя?

4. Почему при тщательно поставленных экспериментах по течению различных жидкостей в пористых материалах разной структуры [4, 6, 8, 21, 22] вообще не наблюдается уменьшения проницаемости по жидкости и ее нестабильное изменение во времени?

Все эти явления получают объяснение, если в качестве достоверной причины облитерации считать закупоривание поровых каналов частицами загрязнений и пузырьками выделяющегося газа.

Наиболее очевидным является первый случай, если учесть чрезвычайно широкое применение пористых материалов в качестве фильтров. Во всех жидкостях имеется большое число частиц механических загрязнений, соизмеримых с диаметром поровых каналов. При течении жидкости через пористый материал эти частицы задерживаются в сужениях поровых каналов и постепенно уменьшают проницаемость материала. Последнее особенно видно при движении жидкостей с контролируемым фракционным содержанием частиц загрязнений [23] через щели фиксированных размеров (4, 10, 14, 21 мкм). Для каналов диаметром, меньшим максимального размера частиц, интенсивность уменьшения расхода возрастает по мере уменьшения характерного размера канала. При осмотре разборных каналов после эксперимента в непосредственной

близости от входа в канал видна темная грязевая полоска [23]. В случае, когда размер твердых частиц меньше характерного размера пор, постепенное зарастивание канала вызывается коагуляционными процессами, интенсифицирующимися в гидродинамическом потоке [24]. В связи с этим следует отметить, что в большинстве работ, в которых отмечается уменьшение проницаемости образцов, отсутствуют сведения о степени предварительной очистки жидкости.

Достоверное объяснение фильтрационного эффекта вследствие постепенного забивания пор пузырьками выделяющегося из жидкости растворенного газа впервые дано в работе [4].

Жидкости содержат растворенные газы, количество которых в равновесных условиях зависит от их свойств, а также от давления и температуры. Зависимость равновесной концентрации z растворенного газа в жидкости от давления для слаборастворимых газов выражается законом Генри $z = A|t|P$, где P — парциальное давление газа над раствором; $A|t|$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств жидкости и газа, а также от температуры. Для большинства жидкостей $A|t|$ уменьшается с ростом температуры. Очень часто растворимость газа в жидкости характеризуют с помощью коэффициента абсорбции Бунзена α , который равен объему газа, приведенному к 0°C и 760 мм рт. ст., поглощенному единицей объема жидкости при парциальном давлении газа, равном 760 мм рт. ст. В табл. 1 в качестве примера приведены данные о коэффициенте абсорбции для кислорода.

При движении жидкости сквозь пористый материал давление в ней падает и растворенный газ может оказаться в пересыщенном состоянии, несмотря на то что жидкость была насыщенной в месте ее контакта с газом (например, в системе наддува сжатым газом). Образование газовых пузырьков в подводящей линии маловероятно, так как избыточное давление газа в маленьких пузырьках должно быть очень большим для противодействия поверхностному натяжению. Образование и рост пузырьков газа происходит внутри пористой структуры, где благодаря значительной шероховатости поверхности облегчаются условия зарождения ядер. Кроме того, центрами образования пузырьков могут служить остатки воздуха, заполнявшего ранее пористый материал.

С учетом ряда допущений в [4] выведено приближенное уравнение для расчета уменьшения расхода жидкости вследствие выделения растворенного газа при постоянном перепаде давления на образце до тех пор, пока пузырьки газа не начнут перемещаться в пористой структуре с потоком жидкости:

$$G = G_0 \exp\left(-a \frac{G_0^2 \tau}{P}\right).$$

Здесь G — изменяющаяся величина расхода; G_0 — расход в начальный момент времени; a — некоторая постоянная, зависящая от свойств жидкости и пористого материала; P — давление; τ — время.

Это уравнение позволяет качественно оценить влияние таких параметров, как G_0 , P , τ . В частности, отсюда следует, что с увеличением расхода жидкости увеличивается темп уменьшения проходного сечения. Выполненное экспериментальное исследование позволило автору уверенно объяснить увеличение сопротивления пористых материалов в результате закупорки пор пузырьками выделяющегося из жидкости растворенного газа. Наиболее интересные данные [4] приведены на рис. 2, где показано влияние абсолютного давления P на изменение расхода дистиллированной воды со временем через стеклянный фильтр при постоянном перепаде давления на нем $\Delta P = 0,037$ бар и последовательном

Характеристики некоторых исследованных образцов

Таблица 2

Пористый материал	Пористость	Средний диаметр пор, мкм	Проницаемость, Дарси	Вид жидкости	Лит. источник
Нержавеющая сталь	0,367	24,5	2,00	Вода, керосин	[6]
Спеченное стекло	0,346	33,0	2,80	Вода, керосин	[6]
Бронза, фракция А	0,246	9,9	0,24	Вода, керосин	[6]
Бронза, фракция В	0,317	33,0	3,30	Вода, керосин	[6]
Сталь	0,34	52	5,0	Дизельное топливо	[22]
Сталь	0,29	98	5,9	Дизельное топливо	[22]
Спеченное стекло	0,284	17,1	2,54	Вода	[21]
Алеврит	0,250	1,87	0,023	Керосин, бензин	[21]
Песчаник	0,300	6,81	0,416	Вода	[21]

ступенчатом увеличении вакуума на входе фильтра. Для участка *I* вакуум составляет 0 мм рт. ст., для участка *II*—93, *III*—380, *IV*— снова 0 мм рт. ст. В области *I* не происходит выделения растворенного воздуха из насыщенной при атмосферном давлении воды, но при уменьшении давления на выходе фильтра (область *II*) вода становится пересыщенной и происходит значительное выделение пузырьков воздуха и постепенная закупорка фильтра. При переходе в область *III* с еще меньшим абсолютным давлением сопротивление фильтра скачкообразно увеличивается. При возвращении к атмосферному давлению после фильтра в области *IV* расход сначала скачкообразно, а затем постепенно восстанавливается.

Выделение растворенного газа из жидкости при движении ее через пористые материалы является причиной приводимых в [1, 3] и оставляемых без объяснения поразительных результатов первых исследований фильтрационного эффекта: свежeproфильтованная вода при повторном использовании не только не давала обычно наблюдаемого уменьшения скорости фильтрации, но, более того, регенерировала фильтры, закупоренные при ранних экспериментах. В результате специального исследования автор работы [4] установил отмеченное явление также и при фильтровании масел.

К сожалению, малоизвестность результатов [4] не позволила долгое время дать правильную трактовку явления и организовать корректную постановку эксперимента для исследования влияния степени предварительного насыщения жидкости газом на интенсивность увеличения сопротивления вследствие закупорки пор пузырьками газа.

Точно поставленные эксперименты с учетом результатов [4] сделаны авторами работ [6, 7].

Исследования в [6] выполнены на пористых образцах толщиной 12,5 мм, характеристики которых приведены в табл. 2. Проницаемость образцов в ходе исследований (относительная проницаемость) выражена в долях проницаемости при движении деаэрированной жидкости. Эксперименты проведены с водой и керосином при постоянном перепаде давления на образце.

В опытах тщательно определялось состояние жидкости в пористом теле на входе и выходе. Установлено, что если жидкость достигает состояния насыщенности газом только на выходе из образца, то проницаемость не зависит от количества газа, содержавшегося в пористом теле перед началом эксперимента. Даже для первоначального сухого образца абсолютная (100%) проницаемость достигается быстро, поскольку воздух выталкивается жидкостью и остатки его растворяются в потоке

насыщенной жидкости. Абсолютная проницаемость достигается почти мгновенно при использовании керосина и через 30—40 с при экспериментах с водой.

Если жидкость на выходе из образца значительно пересыщена газом, то всегда наблюдается уменьшение проницаемости образцов вследствие выделения и аккумуляции пузырьков газа внутри пористого материала. По мере течения жидкости сквозь образец выделение газа происходит пропорционально степени ее пересыщения при локальных давлениях и температуре. Изменение проницаемости количественно невоспроизводи-

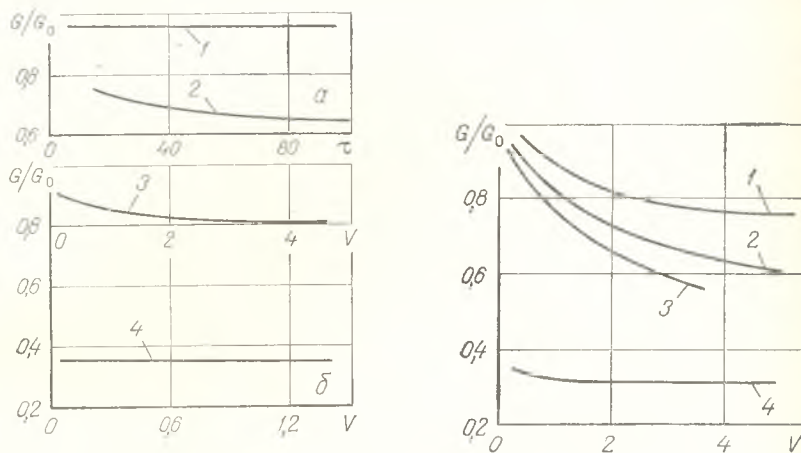


Рис. 3. Изменение расхода воды, насыщенной воздухом, при течении через пористый стеклянный образец [6] (а) и керосина, насыщенного воздухом, при течении через пористый бронзовый образец фракции А [6] (б): 1 — насыщенность пористого материала водой вначале полная, в конце 86,5%; 2 — вначале частичная, в конце 86,5%; 3 — насыщенность пористого материала керосином вначале полная, в конце 93,6%; 4 — вначале частичная, в конце 80,7%. V , л; τ , с

Рис. 4. Изменение проницаемости при течении керосина, перенасыщенного воздухом и содержащего пузырьки воздуха, через различные пористые материалы [6]: 1 — стекло, $\tau=8,5$ мин; 2 — бронза фракции В, $\tau=12,5$ мин; 3 — бронза фракции А, $\tau=64$ мин; 4 — нержавеющая сталь, $\tau=38$ мин. V , л

мо, поскольку содержание газа в порах зависит в основном от степени смачивания поверхности и от наличия образования пузырьков, а эти характеристики не поддаются контролю. Если в подводимой к образцу жидкости не содержатся пузырьки газа, то достигается ее пониженный, но стационарный расход. Для пористых структур, которые первоначально полностью насыщены жидкостью, такое стационарное состояние устанавливается очень быстро, но для структур, первоначально содержащих некоторое количество газа, время установления стационарного состояния значительно увеличивается.

На рис. 3 показано изменение расхода жидкости (относительной проницаемости) при таких условиях. Начальные и конечные значения насыщенности пористой структуры жидкостью указаны в каждом случае. Уменьшение проницаемости значительно больше для пористых структур, первоначально не полностью насыщенных жидкостью, вследствие наличия большого количества центров для выделения газа. Во всех случаях достигается стационарное состояние и не происходит полного блокирования пор для потока жидкости, что объясняется наступлением равновесия в количестве центров выделения газа и уносе пузырьков. В то же время установившееся пониженное значение проницаемости не является

фиксированной величиной для каждого образца и зависит от условий процесса, т. е. является невоспроизводимым.

Если в подводимой к образцу жидкости содержатся пузырьки газа, то уменьшение проницаемости является значительным и приближение к стационарному состоянию происходит очень медленно, что иллюстрируется на рис. 4.

Результаты, подтверждающие заключение о влиянии выделяющегося растворенного газа, получены также в работе [7] при течении через тех-

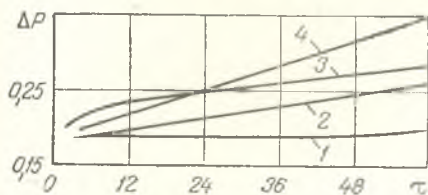


Рис. 5. Влияние свойств жидкости на интенсивность увеличения перепада давления на образце при постоянном расходе [7]. ΔP , бар; τ , мин

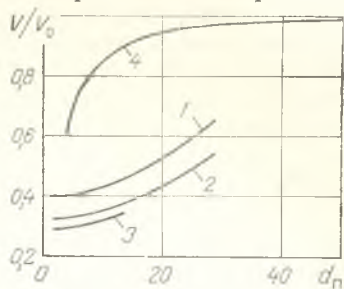


Рис. 6. Зависимость уменьшения расхода жидкости от среднего размера пор материала и свойств жидкости. d_n , мкм

ническую фильтровальную бумагу незагрязненного дизельного топлива при постоянном расходе.

В первом случае эксперимент проводился с частичным предварительным удалением растворенного воздуха. Для этого дизельное топливо нагревалось и выдерживалось некоторое время при температуре 40°C . Перед поступлением в образец температура топлива понижалась с помощью теплообменника до 20°C . Во втором случае при этой температуре исследовалось топливо, которое вследствие предварительного охлаждения и выдержки при температуре 10°C оказалось пересыщенным воздухом. Результаты приведены на рис. 5 (кривые 1 и 2 соответственно). Кривая 3 — результаты течения топлива через образец, частично насыщенный воздухом. При этих условиях рост сопротивления происходит вначале значительно быстрее. Следует отметить, что условия этого опыта аналогичны условиям экспериментов [6], результаты которых представлены на рис. 3. Наблюдается качественное совпадение результатов. Далее была сделана оценка влияния испаряемости жидкости на интенсивность фильтрационного эффекта. Для этого в топливо было введено 1,5% по весу серного эфира. Эта добавка изменила заметно только давление насыщенных паров, все остальные свойства смеси были практически одинаковыми со свойствами чистого топлива. Результаты (кривая 4) подтверждают влияние испаряемости жидкости на интенсивность образования парогазовых пузырьков и вызываемое этим повышение сопротивления пористого материала.

Изменение проницаемости при течении через пористый материал пересыщенной жидкости в значительной степени зависит от среднего размера пор структуры. С уменьшением среднего и особенно минимального диаметра пор d_n возрастает величина капиллярного давления $\Delta P_n = 4\sigma \cos \Theta / d_n$, препятствующего продавливанию пузырьков газа через узкие каналы. В результате с уменьшением d_n все большее количество газа удерживается в образце. Кроме того, с уменьшением размера пор облегчаются условия зарождения газовых пузырьков. Для проверки

этой зависимости эксперименты должны быть проведены на пористых образцах из одинакового материала. На рис. 6 (кривые 1—3) представлены данные [11] по течению через стеклянные пористые фильтры воды, этанола и ацетона соответственно. Здесь V — объем фильтрата за определенный промежуток времени; V_0 — объем фильтрата дегазированного (теоретический объем). Снижение проницаемости начинает проявляться при диаметре пор ≈ 50 мкм и быстро возрастает при его уменьшении. Зависимости 1—3 отражают влияние растворимости воздуха в жидкости на уменьшение проницаемости. С ростом растворимости (последовательно: вода, этанол, ацетон (см. табл. 1)) интенсивность этого процесса должна возрастать. В основном это подтверждается полученными результатами, однако для воды уменьшение проницаемости слишком велико по сравнению с уменьшением растворимости воздуха. Автором [11] это объясняется существенно большей величиной для воды (по сравнению с остальными жидкостями) коэффициента поверхностного натяжения (см. табл. 1). На этом же рис. 6 (кривая 4) представлены данные работы [10] для стали 50ХГ при течении воды. Наблюдается качественное совпадение всех данных. Численные же величины сопоставить трудно, так как они зависят от количества протекшей жидкости, свойств пористого материала, насыщенности жидкости газом и т. д. Здесь можно отметить также, что для образца из порошкового никеля со средним размером пор больше 70 мкм увеличение сопротивления составило 18% при очень длительном (в течение 53 ч) течении азиррованной воды при удельном массовом расходе $9,75 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ [8].

При оценке влияния среднего размера пор образцов на уменьшение расхода жидкости становится очевидной зависимость результатов не столько от величины капиллярного давления ΔP_K , сколько от соотношения между капиллярным давлением и перепадом давления на образце ΔP : уменьшение расхода становится заметным и существенным, если отношение $\Delta P_K/\Delta P$ больше или соизмеримо с единицей. При $\Delta P_K/\Delta P > 1$ образующиеся пузырьки газа не могут быть выдавлены из пористой структуры потоком жидкости. Причем именно в этом случае увеличение перепада давления приводит к более интенсивному повышению сопротивления вследствие увеличения количества выделяющегося газа при увеличении расхода жидкости. При $\Delta P_K/\Delta P \ll 1$ пузырьки не задерживаются в пористой структуре и увеличение сопротивления происходит вследствие формирования двухфазного газожидкостного потока. Оценка этого соотношения для результатов немногочисленных работ, в которых имеются сведения о величинах $d_{\text{п}}$ и ΔP , подтверждает его справедливость. Так, для воды при 20°C [14] (см. рис. 1) $\Delta P_K/\Delta P \approx 2,3$, для экспериментальных результатов работы [9] $\Delta P_K/\Delta P \approx 2,5 \div 8$, для представленных на рис. 6 данных работы [10] при $d_{\text{п}} = 5$ мкм и $\Delta P = 1,2$ бар $\Delta P_K/\Delta P \approx 0,5$, для результатов исследований, описанных в [11], $\Delta P_K/\Delta P \approx 1 \div 10$.

Существенное влияние на интенсивность процесса увеличения сопротивления пористых материалов оказывает повышение температуры жидкости, поскольку растворимость газа зависит от ее температуры. При приближении к температуре насыщения давление паров жидкости становится настолько большим, что влияние растворимости газа на рост парогазовых пузырьков уже может не учитываться [11] (рис. 7). При приближении к температуре насыщения ацетона $t_s = 56^\circ \text{C}$ сопротивление образца резко возрастает. Это обусловлено тем, что начинается интенсивный рост парогазовых пузырьков и происходит переход к режиму двухфазного течения. Однако основной причиной этого процесса все же является первоначальное зарождение газовых пузырьков — паровые пузырьки при $t \ll t_s$ появиться не могут.

Визуальное подтверждение наличия пузырьков газа в прозрачных стеклянных фильтрах или в фильтрах, находящихся между стеклянными пластинами, приведено на фотографиях в работах [4, 6, 7]. Интересно отметить также, что автором [14] выделение воздуха в виде цепочек пузырьков в объеме жидкости над поверхностью образца наблюдался при течении воды через титановый фильтр со средним размером пор 7,3 мкм под действием перепада давления всего лишь 0,52 бар.

Практически во всех работах, за исключением [6—8, 21—22], не контролировалась насыщенность жидкости растворенным воздухом

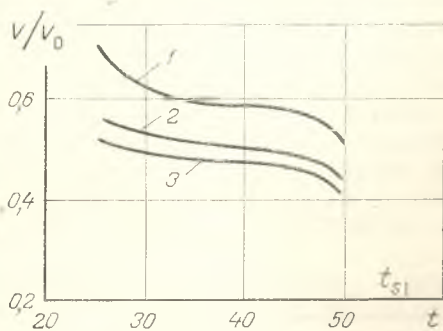


Рис. 7. Зависимость уменьшения расхода ацетона от температуры при течении через стеклянный фильтр [11]: 1 — $\Delta P = 0,026$ бар; 2 — 0,053; 3 — 0,106

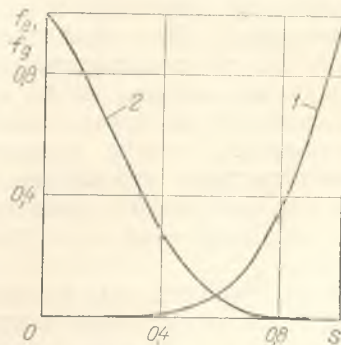


Рис. 8. Зависимость относительной фазовой проницаемости жидкости (1) и газа (2) от насыщенности s пористой среды жидкостной фазой при течении газовой смеси в грунтах [25]

перед подачей в пористый образец. В то же время использованная в работах [10, 12, 13] система подачи жидкости с помощью наддув сжатым воздухом высокого давления дает все основания считать концентрацию растворенного воздуха достаточно высокой. Особенно характерны в этом отношении данные [13], где периодически продувались пористые материалы (о влиянии продувки на уменьшение проницаемости указано ранее — кривая 3 на рис. 5).

Механизм увеличения сопротивления при выделении пузырьков газа внутри пористой структуры состоит в следующем. Образующиеся пузырьки газа постепенно растут и занимают центральные части пор, что приводит к более существенному уменьшению расхода жидкости по сравнению с изменением занимаемого ею объема. Количественные соотношения между изменением объема жидкости в порах (насыщенность s) и изменением проницаемости для потока воды определяются зависимости относительной фазовой проницаемости жидкой f_e и газовой f_g фаз от насыщенности s пористой структуры жидкой фазой. Эти зависимости находятся экспериментально и, в частности, для течения газовой смеси в грунтах описываются следующими формулами [25]:

$$f_e = \left(\frac{s - 0,2}{0,8} \right)^{3,5}, \quad 0,2 \leq s < 1; \quad f_e = 0, \quad 0 < s < 0,2;$$

$$f_g = \left(\frac{0,9 - s}{0,9} \right)^{3,5} \cdot (1 + 3s), \quad 0 < s < 0,9; \quad f_g = 0, \quad 0,9 < s < 1.$$

Они изображены графически на рис. 8.

Следовательно, до тех пор, пока пузырьки газа не займут примерно 0,1 объема пор, они не двигаются в пористой среде ($f_g=0$), но при этом проницаемость для жидкости уменьшается от $f_e=1$ при $s=1$ до $f_e=0,626$ при $s=0,90$, т. е. на 37,4%. Приведенные зависимости для фазовых проницаемостей получены для потока подготовленной до входа в образец газовой смеси. В [26] показано, что при близких к единице значениях насыщенности относительная фазовая проницаемость для жидкости f_e не зависит от способа создания двухфазной смеси внутри пористой структуры, тогда как газовая проницаемость f_g может меняться в десятки раз, причем наименьшая величина газопроницаемости имеет место именно при выделении газа в виде пузырьков из жидкости. Это объясняется тем, что при движении готовой газовой смеси компоненты движутся отдельно, причем газ — по наиболее крупным порам, в то время как пузырьки выделяющегося газа продавливаются через все, в том числе и узкие, поровые каналы. Таким образом, можно ожидать, что выделяющиеся пузырьки газа покидают пористую структуру при значениях насыщенности, меньших $s=0,9$ (в отличие от представляемых на рис. 8 зависимостей), при которых относительная проницаемость по жидкости будет меньше $f_e=0,626$.

Когда воздушные пузырьки займут значительную часть пор ($s \leq 0,9$), поток жидкости начинает продавливать пузырьки через сужения поровых каналов. Увеличения сопротивления образца больше не происходит, и оно стабилизируется, при этом перепад давления на образце значительно больше капиллярного давления: $\Delta P > \Delta P_k$. При $\Delta P_k > \Delta P$ пузырьки газа постепенно накапливаются внутри пористой структуры и вызывают дальнейшее уменьшение проницаемости для жидкости.

Существенная зависимость интенсивности уменьшения расхода от вида жидкости, отмеченная авторами работ [1, 9, 11, 13, 14], объясняется различным (причем неконтролировавшимся) насыщением этих жидкостей растворенным воздухом, различным поверхностным натяжением и смачиваемостью. Влияние первых двух причин показано ранее. Смачивающая способность, определяемая не только свойствами жидкости, но и пористого материала, оказывает значительное влияние на интенсивность образования зародышей пузырьков газа внутри пористой структуры.

Очень важной характеристикой процесса зарождения газового пузырька в пористой структуре является адгезионное натяжение $\tau = \sigma \cos \Theta$, которое определяет работу образования поверхности пузырька на границе с твердой поверхностью. Адгезионное натяжение является комплексной характеристикой, включающей как поверхностное натяжение жидкости, так и ее смачивающую способность — краевой угол Θ .

Качественное представление о влиянии адгезионного натяжения на изменение расхода жидкости можно получить, анализируя кривые 1, 6 на рис. 1. Кривая 1 характеризует изменение расхода гептана через титановый образец толщиной 0,37 мм со средним размером пор 7,3 мкм, 6 — изменение расхода гептана через пористый фторопласт толщиной 1,25 мм со средним размером пор 3,62 мкм. Гептан идеально смачивает металл ($\Theta=0^\circ$) и значительно хуже фторопласт ($\Theta=24^\circ$). Отсюда следует, что уменьшение адгезионного натяжения при течении гептана через фторопласт способствует улучшению условий зарождения пузырьков, что приводит к постепенному уменьшению расхода. Для проверки возможности устранения выделения растворенного в воде воздуха за

счет улучшения смачиваемости автором [14] был использован 0,5%-ный раствор поверхностно-активного вещества в воде — кривая 5. По сравнению с чистой водой (кривая 4) расход раствора ПАВ сначала уменьшается менее резко, а затем остается практически постоянным. В отличие от чистой воды при течении раствора ПАВ с самого начала на внешней поверхности образца наблюдалось выделение большого количества пузырьков воздуха самых различных размеров (от миллиметра до пузырькового тумана), что свидетельствует об установлении режима движения двухфазного газожидкостного потока через пористый материал. Таким образом, в противоположность ожидаемому добавление ПАВ улучшило условия образования пузырьков за счет более значительного снижения поверхностного натяжения. Кроме того, уменьшение поверхностного натяжения при добавлении ПАВ снижает также и сопротивление при движении двухфазного потока в пористом материале вследствие уменьшения капиллярного давления при продавливании пузырьков даже через мельчайшие поровые каналы, о чем свидетельствует появление пузырькового тумана.

Отделить влияние адгезионного натяжения (смачиваемости) от влияния количества растворенного газа и величины поверхностного натяжения на увеличение сопротивления в остальных случаях [1, 9, 11, 13, 14] течения жидкостей с различными физическими свойствами не удастся, поскольку величины поверхностного натяжения жидкостей близки друг к другу, пористые материалы имеют различную структуру, отсутствуют сведения о концентрации растворенного в жидкости газа и т. д.

Из изложенного следует, что выделение растворенного газа является основной причиной невоспроизводимого повышения сопротивления при течении жидкости сквозь пористые материалы. Стабилизации внутреннего сопротивления пористой структуры, как показано в [8, 21, 22], можно добиться с помощью дегазации жидкости в вакууме. Характеристики образцов приведены в табл. 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что проницаемость образцов по жидкости и газу одинакова, не изменяется со временем и не зависит от вида жидкости и от размера пор. Следует особо отметить результаты работы [21], где показано, что даже в пористых материалах со средним размером пор около микрона не наблюдалось уменьшения проницаемости при очень длительной (до 200 ч) фильтрации.

В [6] описана экспериментальная установка, на которой абсолютная (100%) проницаемость пористого материала достигалась при течении жидкости через первоначально сухие образцы при значительно менее жестких условиях по дегазации — жидкость на выходе была в состоянии насыщенности газом.

Таким образом, основными причинами, вызывающими невоспроизводимое повышение сопротивления при течении капельных жидкостей через пористые материалы со средним размером пор больше микрона, являются: забивание пор выделяющимися пузырьками растворенного в жидкости газа; загрязнение пористого материала механическими примесями, содержащимися в недостаточно тщательно очищенной жидкости. Резко противоречивые результаты ранних исследований движения капельных жидкостей в пористых материалах, приведенные в работе [1—3], объясняются недостаточной тщательностью постановки эксперимента. Для исключения невоспроизводимого повышения сопротивления при течении капельной жидкости необходимо: применением предварительной дегазации жидкости устранить возможность достижения состояния равновесной насыщенности жидкости раство-

ренным газом на выходе образца; обеспечить тщательную очистку жидкости от механических загрязнений с помощью фильтров, имеющих средний размер пор не менее чем в полтора-два раза меньший аналогичной характеристики пористого образца.

Figure Captions

Fig. 1. Flow rate variation of liquid flowing via thin-porous metals at constant pressure drop over a sample $\Delta P=0.17$ bar [14]: 1, heptane; 2, benzene; 3, isopropyl alcohol; 4, water; 5, 0.5 aqueous solution of a surfactant; 6, heptane (1—5, the porous titanium sample with 7.3 μm mean size of pores; 6, porous Teflon with 3.6 μm mean size of pores). Q , cm^3/s ; τ , min.

Fig. 2. Water flow rate variation via a glass filter at constant pressure drop $\Delta P=0.037$ bar and varying inlet pressure [4]: I, vacuum at the inlet 0 mm Hg; II, 93; III, 380; IV, 0 mm Hg. D , $\text{cm}^3/\text{bar}\cdot\text{s}$; τ , min.

Fig. 3. Flow rate variation of water saturated with air with its flow via a porous glass sample [6] (a) and that of kerosene saturated with air with its flow via a porous bronze sample of fraction A [6] (b): 1, complete saturation of the porous material with water at the beginning, 86.5% saturation at the end; 2, partial saturation at the beginning, 86.5% saturation at the end; 3, complete saturation of the porous material with kerosene at the beginning, 93.6% saturation at the end; 4, partial saturation at the beginning, 80.7% saturation at the end. V , l; τ , s.

Fig. 4. Penetrability variation for kerosene oversaturated with air, containing air bubbles and flowing via different porous materials [6]: 1, glass, $\tau=8.5$ min; 2, bronze of fraction B, $\tau=12.5$ min; 3, bronze of fraction A, $\tau=64$ min; 4, stainless steel, $\tau=38$ min. V , l.

Fig. 5. The effect of liquid properties on the intensity of increasing pressure drop over the sample at constant flow rate [7]. ΔP , bar; τ , min.

Fig. 6. A decrease in liquid flow rate as a function of mean size of material pores and liquid properties, d_p , μm .

Fig. 7. A decrease of acetone flow rate vs temperature for its flow via a glass filter [11]. ΔP , bar.

Fig. 8. Relative phase penetrability of liquid (1) and gas (2) vs saturation s of a porous medium with a liquid phase for gas-water flow in grounds [25].

Литература

1. Зигель В. Фильтрация.— М.: ГИНТИ, 1939.— 172 с.
2. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении.— М.: Машиностроение, 1976.— 183 с.
3. Беркман А. С., Мельникова И. Г. Пористая проницаемая керамика.— Л.: Стройиздат, 1969.— 141 с.
4. Mehner W. Gasausscheidung als Ursache des Filtereffektes.— *Dei Chemische Fabrik*, 1937, Bd. 10, N 1/2, S. 2—9.
5. Duwez P., Martens H. E. The powder metallurgy of porous metals and alloys having a controlled porosity.— *Metal Technology*, 1948, vol. 15, N 4, p. 1—27.
6. Eisenklam P. Porous masses.— *Chemical Engineering Practice*, 1956, vol. 2, p. 342—463.
7. Емельянов Л. А. Фильтрация дизельного топлива.— Л.— М.: Машгиз, 1962.— 107 с.
8. Kunz H. R., Langston L. S., Hilton B. H., Wyde S. S., Nashick G. H. Vapor chamber fin studies.— *NASA Report CR-812*, 1967.
9. Потапова Н. П. Исследование воздействия ультразвука на течение чистой жидкости через пористые перегородки.— В сб.: Акустика и ультразвук. Киев: Техника, 1966, № 2, с. 70—76.
10. Белов С. В., Павлихин Г. П. О некоторых особенностях фильтрации жидкостей через пористые металлы.— *Изв. вузов. Машиностроение*, 1972, № 6, с. 70—76.
11. Hennig R. Beitrag zur Untersuchung der Filterverstopfung durch Gasausscheidung und Flüssigkeitsverdampfung.— *Chemie Technik*, 1975, Bd. 27, N 8, S. 446—448.
12. Косторнов А. Г., Шевчук М. С. Гидравлические характеристики и структура пористых металлов из металлических волокон. III. Исследование закономерностей жидкостной проницаемости материалов.— *Порошковая металлургия*, 1977, № 9, с. 50—56.
13. Косторнов А. Г. О явлениях облитерации в проницаемых волоконных материалах.— *Порошковая металлургия*, 1978, № 6, с. 35—38.
14. Кудряшов А. Ф. Излучение течения жидкости и газа в тонкопористых материалах.

лах применительно к процессам фильтрования и ультрафильтрования: Автореф. Дис. ... канд. тех. наук.— М.: МИХМ, 1975.— 23 с.

15. Дерягин Б. В., Самыгин М. М. Измерения вязкости тонких полимолекулярных слоев жидкостей.— Совещание по вязкости жидкостей и коллоидных растворов. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1941, т. 1, с. 59—66.

16. Дерягин Б. В., Крылов Н. А. Аномальные явления при течении жидкостей через жесткие узкопористые фильтры.— Совещание по вязкости жидкостей и коллоидных растворов. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1944, т. 2, с. 52—53.

17. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Булгадаев А. В. Исследование сдвиговой упругости жидкостей в объеме и граничных слоях.— В сб.: Исследования в области поверхностных сил. М.: Наука, 1967, с. 43—52.

18. Зорин З. М., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Изменение капиллярного давления, поверхностного натяжения и вязкости жидкостей в кварцевых микрокапиллярах.— В сб.: Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М.: Наука, 1972, с. 214—221.

19. Дерягин Б. В., Железный Б. В., Зорин З. М., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Свойства жидкостей в тонких кварцевых капиллярах.— В сб.: Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов. М.: Наука, 1974, с. 90—94.

20. Товбина З. М. Вязкость водных растворов в капиллярах силикагеля.— В сб.: Исследования в области поверхностных сил. М.: Наука, 1967, с. 24—30.

21. Требин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах.— М.: Гостоптехиздат, 1959.— 155 с.

22. Каминский Я. А. Движение газов и жидкостей в пористом металлокерамическом материале.— Порошковая металлургия, 1965, № 8, с. 53—61.

23. Никитин Г. А., Чирков С. В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов.— М.: Транспорт, 1969.— 183 с.

24. Красиков Н. Н. Облитерация капиллярных щелей при течении минеральных масел.— ИФЖ, 1971, т. 20, № 2, с. 210—214.

25. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика.— М.: Гостоптехиздат, 1963.— 395 с.

26. Эфрос Д. А. Исследование фильтрации неоднородных систем.— Л.: Гостоптехиздат, 1963.— 351 с.

*Институт тепло- и массообмена
им. А. В. Лыкова АН БССР, г. Минск,
Новополоцкий политехнический институт*

18.06.80.