

DOI: 10.32864/polymmattech-2018-4-4-52-63

УДК 678.743.41:678.046:539.22:54.14

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ САМООЧИСТКУ ОТ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

В. Ю. ШУМСКАЯ¹⁺, С. Ф. ЖАНДАРОВ¹, Л. А. КАЛИНИН¹, Л. Ф. ИВАНОВ¹, В. В. СНЕЖКОВ², А. Н. ЕГОРОВ², П. Н. ГРАКОВИЧ¹

¹Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

²ОДО НТЦ «Ларта», ул. Кабышева, 9, к. 417, 246029, г. Гомель, Беларусь

Самоочистка фильтровальных устройств от жидкой фазы является побочным процессом фильтрования многофазных сред: газ–аэрозоль масла, газ–аэрозоль воды, масло–вода и т. п. Эффективность самоочистки напрямую влияет на ресурс фильтровального устройства в целом и обусловлена как конструкцией фильтра, так и свойствами фильтруемых жидкостей и фильтровальных материалов. Цель работы — изучение фильтрующих свойств полимерных волокнисто-пористых материалов различных типов, отличающихся природой полимерного материала, пористостью, морфологией, структурой, а также моделирование процесса фильтрации под воздействием сил гравитации.

Процесс самоочистки волокнисто-пористых материалов (ВПМ) в поле сил тяжести от содержащейся в них жидкой фазы исследован с помощью эксперимента по стеканию жидкости в образце, представляющем собой вертикально расположенную прямоугольную пластину из исследуемого ВПМ. Показано, что такое стекание представляет собой сложную комбинацию стекания жидкости по внешней поверхности образца и ее фильтрации внутри пористой структуры материала. Разработана теоретическая модель, включающая оба этих процесса и связывающая экспериментально наблюдаемые величины (уменьшение массы жидкости в образце со временем) с фундаментальными физическими характеристиками ВПМ и фильтруемых жидкостей (проницаемость пористой среды, коэффициент фильтрации, кинематическая вязкость жидкости). Эти характеристики рассчитаны по данным экспериментов для комбинаций нескольких ВПМ и популярных масел, применяющихся в промышленности. Исследовано также влияние капиллярных сил на процесс самоочистки ВПМ. Показано, что высота «масляной зоны», остающейся в исследуемом ВПМ при длительных временах выдержки, зависит прежде всего от пористой структуры материала. Она также может быть предсказана в рамках применяемой модели; теоретические предсказания соответствуют экспериментальным данным.

Ключевые слова: волокнисто-пористые материалы, пористая структура, кинематическая вязкость, коэффициент фильтрации, проницаемость пористой среды, дренажные слои, самоочистка, капиллярные силы.

EFFECT OF STRUCTURE OF POROUS MATERIALS ON THEIR SELF-CLEANING FROM A LIQUID PHASE

V. YU. SHUMSKAYA¹⁺, S. F. ZHANDAROV¹, L. A. KALININ¹, L. F. IVANOV¹, V. V. SNEZHKOVA², A. N. EGOROV², P. N. GRAKOVICH¹

¹V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

²ALC NTC “Larta”, Kabysheva St., 9, room 417, 246029, Gomel, Belarus

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: viktoriya-shumsk@mail.ru

Self-cleaning of filtering equipment from a liquid phase is a side process of filtering multiphase media, such as gas/oil aerosol, gas/water aerosol, oil/water, etc. The self-cleaning efficiency directly affects the performance of the filtering installation as a whole and depends on the properties of filtered fluids and filtering materials as well as on the filter design. The aim of this paper was investigation of filtering properties of various polymer fibrous porous materials (FPM) differing by chemical nature of the polymer material, porosity, morphology, structure, as well as modeling flow of liquids in FPMs under the effect of gravity.

The process of self-cleaning of fibrous porous materials from a liquid phase in a gravitational field was studied by means of an experiment on liquid runoff in a vertical rectangular plate made of the studied FPM. It was demonstrated that this process is a complex combination of the liquid runoff along the specimen surface and its filtering within the bulk of the porous structure of the material. We proposed a theoretical model including both of these processes and relating experimentally observed parameters (mass of the liquid in the specimen as a function of time) to fundamental physical characteristics of the FPM and the liquid (permeability of the porous medium, filtration coefficient, kinematic viscosity of the liquid). From the experimental data, these characteristics have been calculated for several combinations of FPMs and popular oils used in industry. We also studied the effect of capillary forces on FPM self-cleaning. It was shown that the height of the "oil zone" remaining in the specimen after long storage time depends predominantly on the FPM porous structure. Their values predicted by our model are in agreement with the experimental values.

Keywords: fibrous porous materials, porous structure, kinematic viscosity, filtration coefficient, permeability of a porous medium, drainage layers, self-cleaning, capillary forces.

Введение

В современной технологии важное место занимают процессы разделения систем газ–жидкость. Типичные примеры: отделение высших углеводородов и воды из природного или попутного нефтяного газа; удаление жидкой фазы (масло и жидкие в данных условиях углеводороды) из топливного газа, подаваемого в газовые турбины (5 МПа) или нагнетаемого в баллоны автомобилей (25 МПа); очистка различных технологических газов на химических производствах от масла, используемого для смазки уплотнений в компрессорах, и многие другие [1]. На любом машиностроительном предприятии есть система сжатого воздуха (0,5...1,0 МПа), служащая для привода пневмоинструмента, работы пневмоавтоматики, перемешивания путем барботажа электролитов в гальванике или воды в системах водоподготовки, распыления красок или порошков при покраске. Во всех этих системах наличие водомасляного аэрозоля крайне нежелательно.

В отличие от разделения системы газ–твердые частицы в процессе улавливания фильтром жидкости она накапливается в порах и при некоторых условиях начинает вытекать, т. е. фильтр переходит в режим самоочистки. В реальных фильтрах для улавливания капель аэрозоля и стекания (дренажа) собранной жидкости используют разные слои, изготовленные из разных материалов и имеющие разную поровую структуру: сетки; ткани; бумагу; войлок; пористые материалы из полимеров, металлических порошков, керамики и т. п. [2]. Постоянно появляются новые материалы, перспективные для применения в качестве фильтровальных. Но, к сожалению, создатели новых пористых материалов практически никогда не приводят их техни-

ческие характеристики, которые позволяли бы оценить пригодность данного материала для выполнения конкретной функции в конкретном фильтре (коалесцер, сепарационный, дренажный или другой слой).

Процесс движения жидкости в порах активно изучается геофизиками и строителями, т. к. понимание закономерностей фильтрации жидкостей в конкретной пористой структуре необходимо в нефтедобыче и строительстве гидросооружений, например, дамб [3]. Очевидно, что фильтрация масла в полимерной пористой системе имеет много отличий, прежде всего в начальных условиях — давление, скорости потоков, состав и вязкость жидкости, поверхностная энергия и поровая структура материала и многое другое.

Поэтому актуальной и важной научно-прикладной задачей является создание и изучение новых пористых полимерных материалов и многослойных конструкций из них для эффективной очистки многофазных сред: газ–аэрозоль масла, газ–аэрозоль воды, масло–вода и т. п. Важно также совершенствование расчетных моделей, учитывающих особенности пористых материалов [4, 5].

Цель работы — изучение фильтрующих свойств полимерных волокнисто-пористых материалов различных типов, отличающихся природой полимерного материала, пористостью, морфологией, структурой, а также моделирование процесса фильтрации под воздействием сил гравитации.

Материалы и методы исследования

Материалы. Объектом исследования являлись волокнисто-пористые материалы (ВПМ) на основе полимеров. В работе использовали: изотактический волокнисто-пористый полипропилен, изготовленный по технологии «melt blown» (ПП1 — СКТБ «Металлопо-

лимер»; ПП2 — ОДО «Ларта»); иглопробивной материал Филарс из арселона (поли-пара-фенилен-1,3,4-оксадиазол, ТУ ВУ 400031289.082-2012, ОАО «СветлогорскХимволокно»); Грифтекс — волокнисто-пористый политетрафторэтилен ПТФЭ (ИММС НАН Беларуси), полученный методом лазерной абляции в вакууме [6]. Эти материалы отличались друг от друга толщиной, пористостью, морфологией и структурой. Для отладки использованной методики измерений использовали непористую пленку из ПТФЭ по ГОСТ 10007 толщиной 0,25 мм, причем остальные геометрические размеры образца (длина и

ширина) соответствовали длине и ширине испытываемых пористых образцов. Основные характеристики образцов представлены в табл. 1; структура материалов представлена на рис. 1.

В качестве фильтруемых жидкостей использовали масла: нефтяное турбинное марки ТП-22 (ТУ 23.2-30802090-015-2003), вакуумное ВМ-4 (ТУ 38.401-58-3-90) и промышленное И-20 (ТУ 0253-043-48120848-2005). Характеристики масел приведены в табл. 2. Поверхностную энергию масел определяли методом отрыва кольца по ГОСТ 20216 на тензиометре дю Нуи при 28 °С.

Таблица 1 — Характеристики волокнисто-пористых материалов
Table 1 — Properties of the fibrous porous materials used

Материал	Плотность волокон, г/см ³	Средняя пористость, %	Размер пор, мм	Толщина образцов, мм
ПП1 (полипропилен)	0,91 [7]	77	0,8...2,0	10
ПП2 (полипропилен)	0,91 [7]	65	0,3...1,5	5
Филарс (поли-пара-фенилен-1,3,4-оксадиазол, арселон)	1,44 [8]	80	0,3...0,8	1,7
Грифтекс (ПТФЭ)	2,20 [9]	88	0,01...0,6	5
ПТФЭ пленка	1,85*	0	—	0,25

*Приблизительное значение по данным наших оценок

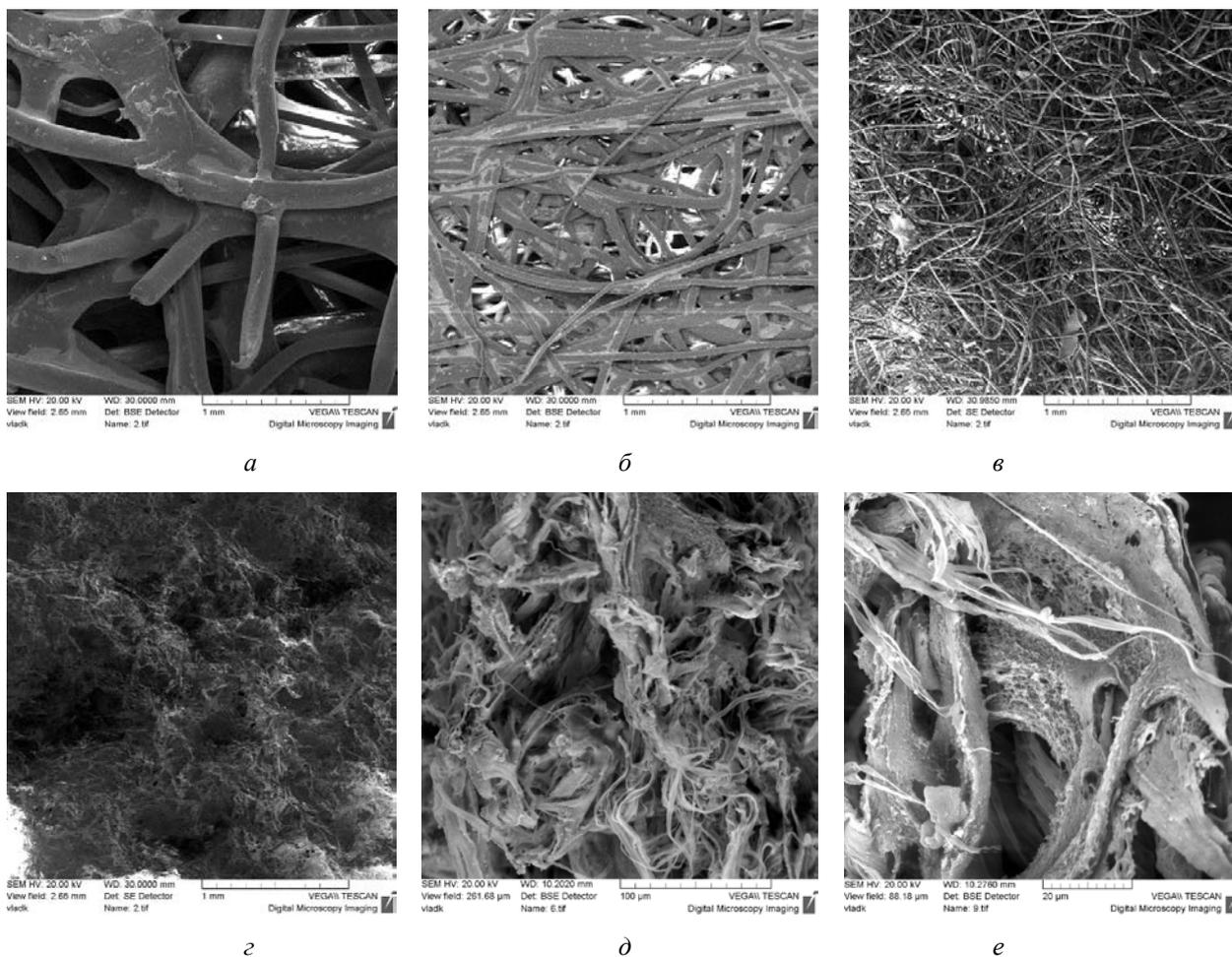


Рисунок 1 — Электронно-микроскопические снимки пористой структуры исследуемых ВПМ: а — ПП1; б — ПП2; в — Филарс, г, д, е — Грифтекс
Fig. 1 — SEM images of porous structures of the fibrous porous materials studied: а — PP1; б — PP2; в — Filars; г, д, е — Grifteks

Таблица 2 — Свойства фильтруемых жидкостей
Table 2 — Properties of filtered liquids

Жидкость (масло)	Плотность, г/см ³	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Поверхностная энергия при 28 °С, мДж/м ²
ТП-22	0,875 [10, 11]	28,8...35,2 (40 °С) [10, 11]	26,7
ВМ-4	0,908 [12, 13]	48...57 (50 °С) [12, 13]	30,6
И-20	0,89 [14, 15]	13...21 (40 °С) [14] 29...35 (40 °С) [15]	29,4

Исследование самоочистки ВПМ. Исследование процесса течения масла в продольном направлении (в плоскости образцов ВПМ) осуществляли на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 2. До испытания исследуемый образец 1, представляющий собой полоску волокнисто-пористого материала длиной около 200 мм, шириной около 40 мм и толщиной 1,7...10 мм (значения для разных образцов см. в табл. 1), помещали в емкость с маслом заданной марки, предварительно подогретым до температуры 28 °С, и выдерживали в течение 30 мин для заполнения маслом пор образца и удаления пузырьков воздуха. Испытания проводили в закрытой камере с постоянной температурой 28 °С, поддерживаемой с помощью регулируемого электрообогревателя, в течение 1 ч. Заполненный маслом образец подвешивали на штативе 2, установленном на весах 3, соединенных с компьютером. Текущую массу образца, измеряемую весами, фиксировали с помощью специализированного ПО и записывали в файл с частотой дискретизации 10 Гц. Математическую обработку полученных данных проводили на основе модели, описанной ниже в разделе «Теоретическая модель процесса самоочистки ВПМ», с помощью специально разработанной программы, работающей в среде *Mathematica* [16]. Масло, стекающее из образца, собирали в емкость 4 для повторного использования.

Теоретическая модель процесса самоочистки ВПМ

При течении жидкости в плоскости образцов ВПМ параллельно идут два процесса: 1) стекание по внешней поверхности образца и 2) течение в порах внутри образца (собственно фильтрация). Для получения адекватных выводов из результатов вышеописанных экспериментов необходимо исследовать закономерности каждого процесса в отдельности и затем рассмотреть их комбинацию, наблюдаемую в эксперименте. Это важно еще и потому, что аналогичная комбинация «внешнего» и «внутреннего» течений имеет место и в реальных масляных фильтрах.

Стекание жидкости по поверхности пластины. Как известно [17], при стекании жидкости по вертикальной или наклонной стенке под действием силы тяжести возможны три режима течения: 1) обычный ламинарный режим вязкого течения жидкости с постоянной толщиной пленки (имеет место

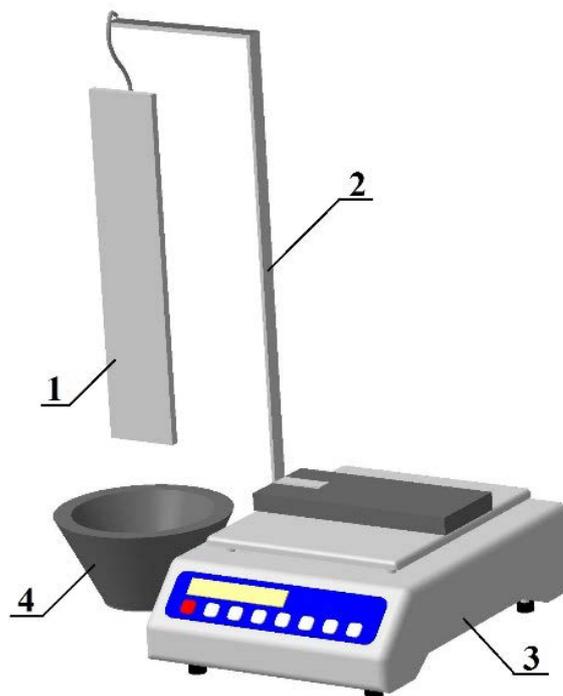


Рисунок 2 — Схема лабораторной установки для исследования фильтрующих свойств ВПМ: 1 – исследуемый образец, 2 – штатив, 3 – электронные весы, 4 – емкость для стекания жидкости
Fig. 2 — Schematic view of the laboratory installation for investigation of filtering properties of materials: 1, investigated specimen; 2, specimen holder; 3, electronic scales; 4, container for the drained liquid

при числах Рейнольдса $Re = uh/v < 20...30$, где u — средняя скорость жидкости по сечению пленки, h — толщина пленки, v — кинематическая вязкость жидкости); 2) волновой режим течения, при котором в пленке наряду с поступательным течением возникает волновое движение ($Re > 30...50$); и 3) турбулентный режим, возникающий вместо ламинарного при больших скоростях движения ($Re > 1500$). Дальнейшее рассмотрение проводим в предположении, что скорость стекания жидкости мала и режим течения является ламинарным; пластину считаем прямоугольной, вертикальной, ориентированной вдоль «длинной» стороны. Решение уравнения Навье-Стокса для такой пластины при граничных условиях, соответствующих медленному стационарному движению под действием силы тяжести, приводит к следующему соотношению [17, 18]:

$$u = \frac{gh^2}{3\nu}, \quad (1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения. Толщина пленки h , в свою очередь, связана с ее массой m , определяемой из данных эксперимента:

$$h = \frac{m}{\rho Pl}, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, P — периметр горизонтального поперечного сечения пластины, l — ее

длина по вертикали. Далее, средняя скорость течения жидкости

$$u = -\frac{d}{dt} \frac{m}{\rho Ph} = -\frac{1}{\rho Ph} \frac{dm}{dt}. \quad (3)$$

Скорость изменения массы пленки dm/dt также естественным образом определяется из эксперимента. Подставив (2) и (3) в (1) и выполнив разделение переменных, получаем

$$\frac{dm}{m^3} = -\frac{g}{3\nu\rho^2 P^2 l^3} dt. \quad (4)$$

Интегрируя (4) при начальном условии $m|_{t=0} = m_0$ (начальной массе пленки), находим

$$\frac{1}{2m^2} - \frac{1}{2m_0^2} = \frac{gt}{3\nu\rho^2 P^2 l^3}, \quad (5)$$

откуда получаем зависимость изменения массы пленки со временем:

$$m(t) = \frac{m_0}{\sqrt{1 + \frac{2gm_0^2}{3\nu\rho^2 P^2 l^3} t}}. \quad (6)$$

Следовательно, экспериментальные зависимости массы пленки от времени можно прогнозировать теоретическими кривыми вида (6). При этом нужно иметь в виду, что значения всех переменных, входящих в уравнение (6), известны *a priori* или легко измеримы, кроме кинематической вязкости жидкости ν . Поэтому эксперимент, описанный в предыдущем разделе, можно использовать для оценки эффективной кинематической вязкости жидкости ν . Из (6) имеем

$$\nu = \frac{2gm_0^2 t}{3\rho^2 P^2 l^3 \left(\frac{m_0^2}{m(t)^2} - 1 \right)}. \quad (7)$$

С течением времени значение ν должно оставаться примерно постоянным и близким к «табличному» значению (определенному стандартным методом).

Для стекания по сплошной (не пористой) пластине «эффективные» значения кинематической вязкости должны быть близки к реальным физическим значениям этого параметра. Для пористых пластин эффективные значения ν являются приближительными; их отличие от реальных значений может дать дополнительную качественную информацию о механизме фильтрации.

Течение жидкости внутри пластины (в порах). Установлено, что при медленном стационарном движении несжимаемой жидкости в неподвижной изотропной среде скорость фильтрации линейно за-

висит от градиента давления (закон Дарси) [19]. Для движения жидкости в поле силы тяжести эта зависимость может быть записана в виде [19, 20]

$$\vec{u} = -C \text{ grad } H, \quad (8)$$

где \vec{u} — скорость фильтрации (вектор, направленный в сторону движения жидкости, величина которого равна объемному расходу жидкости в расчете на единицу площади полного поперечного сечения образца); $C = k\rho g / \mu$ — коэффициент фильтрации (k — проницаемость пористой среды, μ — динамическая вязкость жидкости), H — напор (величина, имеющая размерность длины). Очевидно, что коэффициент фильтрации зависит как от свойств пористой среды, так и от свойств жидкости, в то время как проницаемость от свойств жидкости не зависит. Для каждой конкретной системы процесс фильтрации описывается решением уравнения (8) при конкретных граничных условиях. При этом аналитические решения возможны лишь для простейших симметричных систем. Например, нестационарная фильтрация в пористой среде, заполняющей часть непроницаемой для жидкости вертикальной трубки (жидкость при этом находится выше уровня пористой среды в виде столба высотой h , см. рис. 3), описывается уравнением [20]

$$h(t) = h(0) \exp\left(-\frac{C}{l} t\right). \quad (9)$$

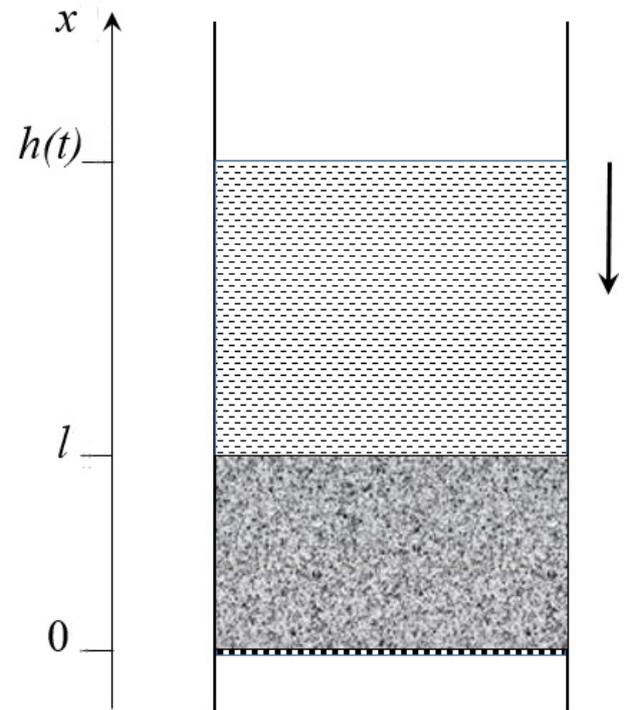


Рисунок 3 — Схема фильтрации жидкости в трубке с непроницаемыми стенками согласно [20] (см. (9))
Fig. 3 — Filtration of a liquid in a pipe with impermeable walls according to [20] (see Eq. (9))

Такие простые решения возможны по двум причинам: 1) осевая симметрия системы, благодаря которой задача становится квазиодномерной, и 2) непроницаемость боковых стенок, из-за которой жидкость может покидать систему только вдоль ее продольной оси. Очевидно, что образцы, использованные в экспериментах, этим условиям не удовлетворяют. Во-первых, пористые пластины нецилиндричны и все их три характерных размера значительно различаются, вследствие чего система является существенно трехмерной. Во-вторых, пористая среда пластин граничит с атмосферой, и заполняющая пластины жидкость может выходить на поверхность и стекать вдоль границ (высачивание [20]). Всё это делает решение задачи фильтрации крайне сложным. Однако в первом приближении можно предположить, что стекание жидкости и внутри реального фильтра приближенно описывается уравнением, аналогичным (9). Если m_1 — масса жидкости, находящейся внутри пластины (в отличие от m — массы жидкости на поверхности), то ее изменение во времени можно представить как

$$m_1(t) = m_{10} \exp\left(-\frac{C}{l}t\right) = m_{10} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (10)$$

где $C = l/\tau$ — эффективный коэффициент фильтрации, τ — время, за которое масса m_1 уменьшается в e раз. Так как часть массы теряется за счет высачивания через боковые стенки, эффективный коэффициент фильтрации получается завышенным по сравнению с реальным. С другой стороны, увеличение количества жидкости на стенках пористого образца приводит к возрастанию рассчитанного эффективного значения кинематической вязкости по сравнению с реальным, определенным на сплошной пластине.

С учетом вышеизложенного приближенную зависимость массы жидкости, остающейся на пористой пластине в любой момент времени $t \geq 0$, можно записать в виде

$$M(t) = m_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \alpha t}} + (m_{10} - m_\infty) \exp\left(-\frac{C}{l}t\right) + m_\infty, \quad (11)$$

где $m_0 + m_{10}$ — полная масса жидкости в образце при $t = 0$, m_∞ — масса, удерживаемая в образце (большой частью в порах) при длительных временах испытания за счет капиллярных сил, не учитываемых уравнениями Дарси и Навье–Стокса,

$$\alpha = 2gm_0^2 / 3\nu\rho^2 P^2 l^3. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Характеристики фильтруемой жидкости и пористой среды, определяемые в эксперименте, и алгоритм их расчета. Уравнение (11) содержит три экспериментально измеримые величины (l , t и $M(t)$) и четыре *a priori* неизвестных параметра (m_0 , m_∞ , α и C), зависящих от характеристик пористой среды и фильтруемой жидкости. (Пятый параметр, m_{10} , не является независимым, т. к. $m_0 + m_{10} = M|_{t=0}$). На предварительном этапе обработки результатов эксперимента удобно ограничиться оценкой этих четырех параметров и лишь затем перейти к определению на их основе фундаментальных свойств жидкости (кинематическая вязкость) и ВПМ (проницаемость).

В эксперименте записывается зависимость полной массы установки, находящейся на весах (включая массу штатива, сухого образца и элементов его крепления к штативу) от времени. На рис. 4, *a* изображен исходный график для системы ВПМ Грифтекс–масло ВМ-4 с учетом массы штатива. Масса штатива составляла 260,9 г (точка 1); начальная точка графика после закрепления на штативе пропитанного жидкостью образца соответствовала в большинстве экспериментов 275...310 г (точка 2). После вычитания из полной массы масс штатива, непропитанного образца и крепежа, а также установки на ноль времени начала эксперимента получаем график, изображенный на рис. 4, *б*, где значение массы, отложенное по вертикальной оси, соответствует полной массе жидкости в образце $M(t)$. Далее экспериментальный график приближали теоретической кривой вида (11), используя средства программной среды *Mathematica* (алгоритм приближения основан на нелинейном методе наименьших квадратов с подстроечными параметрами m_0 , m_∞ , α и C). Теоретическая кривая изображена на рис. 4, *в* тонкой сплошной линией. Как видно из рисунка (экспериментальные точки для наглядности прорезжены), она удовлетворительно соответствует экспериментальной зависимости $M(t)$. При этом значения подстроечных параметров оказались равными

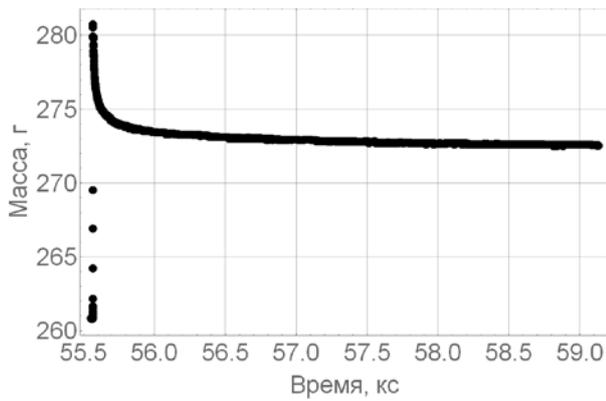
$$m_0 = 8,09 \text{ г} \quad (m_{10} = M|_{t=0} - m_0 = 10,36 - 8,09 = 2,27 \text{ г});$$

$$m_\infty = 1,74 \text{ г};$$

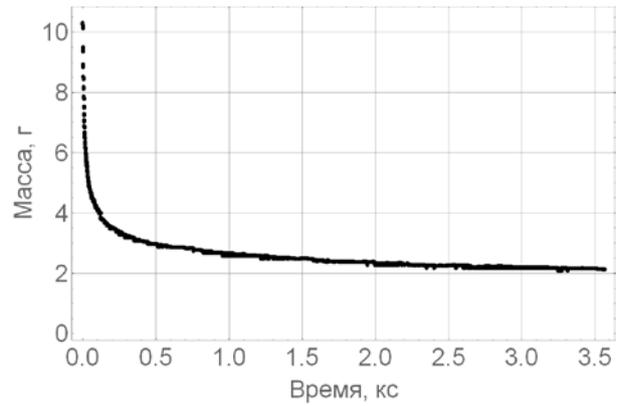
$$\alpha = 0,188 \text{ с}^{-1};$$

$$C = 1,02 \times 10^{-4} \text{ м/с}.$$

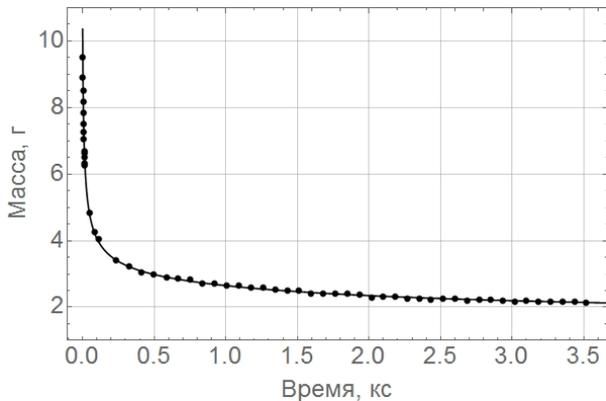
Значения m_0 , m_{10} и m_∞ используются для предварительного контроля правильности приближения (очевидно, должно быть $m_0 < M|_{t=0}$ и $m_\infty < m_{10}$, что в данном случае выполняется). Из значений α и C



а



б



в

Рисунок 4 — График зависимости массы от времени: а — исходный для системы ВПМ Грифтекс–масло VM-4; б — масса жидкости как функция времени; в — то же с наложенной теоретической кривой

Fig. 4 — The measured mass as a function of time: а — for Grifteks/VM-4 system; б — mass of the liquid as a function of time; в — experimental plot of the mass of the liquid (separate points) and theoretical plot (solid line)

далее можно получить характеристики жидкости и пористой среды, связанные с фильтрацией. Уравнение (12) дает эффективную кинематическую вязкость жидкости

$$\nu = \frac{2gm_0^2}{3\alpha\rho^2R^2l^3}. \quad (13)$$

Для данного образца расчеты дают

$$\nu = 4,252 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} = 42,52 \text{ мм}^2/\text{с}.$$

Это несколько меньше, чем вязкость масла VM-4 при 50 °С по ТУ 38.401-58-3-90 (48–57 мм²/с, см. табл. 2) и, тем более, при температуре эксперимента 28 °С. Однако для данного метода оценки вязкости жидкости расхождение с табличными данными в 12–15% можно считать удовлетворительным. Более того, эксперимент убедительно доказывает, что в этой системе ВПМ–жидкость практически не наблюдается высачивания (проникновения жидкости из глубины образца к внешней поверхности с последующим стеканием).

Полученное значение коэффициента фильтрации $C = 1,02 \times 10^{-4}$ м/с также выглядит весьма реалистичным. Для сравнения укажем, что типичные значения C при движении воды в глине имеют порядок $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м/с, в песке $10^{-5} \dots 10^{-2}$ м/с [19]. Следует иметь в виду, что коэффициент фильтрации зависит от свойств как жидкости, так и пористой си-

стемы (в частности, он обратно пропорционален вязкости жидкости и прямо пропорционален квадрату размера пор [20]). От значения C уже легко можно перейти к параметру, характеризующему только пористую среду и не зависящему от жидкости. Как указано выше,

$$C = k\rho g / \mu, \quad (14)$$

где ρ — плотность жидкости, μ — ее динамическая вязкость, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ — ускорение свободного падения, а величина k , имеющая размерность квадрата длины, зависит только от свойств пористой среды. Эта величина называется проницаемостью среды [21]. С другой стороны, динамическая вязкость жидкости [22]

$$\mu = \rho\nu, \quad (15)$$

где ν — ее кинематическая вязкость.

Используя (14) и (15), проницаемость среды k можно выразить через величины, определяемые в эксперименте:

$$k = \frac{C\nu}{g}. \quad (16)$$

Для исследуемого образца Грифтекс–масло VM-4 вычисления дают

$$k = 4,42 \times 10^{-10} \text{ м}^2 = 442 \text{ Д}.$$

Здесь D — *дарси*, внесистемная единица проницаемости пористых сред, приблизительно равная 1 мкм^2 [23]. Типичная проницаемость горных пород-коллекторов (песка, глины) составляет от 5×10^{-3} до $1 D$. Поскольку размеры пор в полимерных ВПМ больше, чем в глине и песке, то и проницаемость их существенно больше. Характерный размер пор оценивали визуально по электронно-микроскопическим фотографиям (рис. 1). Общую пористость ВПМ определяли как отношение объема пор к полному объему образца ВПМ; при расчете объема пор использовали значения плотности волокон, из которых изготовлен материал (табл. 1).

Экспериментально определенные эффективная кинематическая вязкость масел и эффективные характеристики ВПМ.

В табл. 3 приведены значения эффективных параметров фильтруемых жидкостей и пористых сред, рассчитанных по данным проведенных экспериментов.

Контрольные измерения кинематической вязкости масел, осуществленные на сплошной (не пористой) пластине ПТФЭ, дали значения, почти не отличающиеся от стандартных (табл. 2). Очень близкие значения получены также для материала Грифтекс. По всей видимости, это указывает на то, что в этом материале фильтрация жидкости внутри образца и стекание ее по стенкам происходят практически независимо, чему способствует многоуровневая структура пор в материале. Мельчайшие поры (от долей мкм) препятствуют перетеканию масла с поверхности образца внутрь и обратно, а более крупные (до нескольких сотен микрон) обеспечивают быструю фильтрацию (рис. 1, *з*, *д*, *е*). Увеличе-

ние размера пор способствует высачиванию — жидкость переходит из внутренних областей на боковые стенки образца, количество ее на стенках вследствие этого увеличивается, и модель, описываемая уравнением (11), дает все менее адекватные результаты. Для пористых образцов имеет смысл говорить лишь об *эффективной* кинематической вязкости жидкостей, которая характеризует уже не столько их собственную вязкость, сколько скорость высачивания из объема образца ВПМ на внешние стенки. Так, для материала Филарс эффективная вязкость превышает реальную в 10 раз и более, а для ПП1 (полипропилен с крупными порами) — в 100–200 раз (табл. 3). Это свидетельствует о том, что значительная часть масла стекает по боковым стенкам фильтра.

Интересно также сравнить коэффициенты фильтрации для исследованных систем, а также значения проницаемости применяемых ВПМ. Как видно из табл. 3, для большинства систем значения C примерно одинаковы и составляют $0,1 \dots 0,2 \text{ мм/с}$, что по порядку величины соответствует коэффициентам фильтрации воды в песке и примерно на три порядка больше коэффициентов фильтрации воды в глине. Исключением являются системы, где в качестве ВПМ использовался полипропилен ПП1, отличающийся большими размерами пор и диаметрами волокон (рис. 1 и табл. 3). Для этих систем коэффициент фильтрации на порядок выше, что означает более высокую скорость фильтрации, но, возможно, худшее качество фильтрования. Эффективные значения проницаемости ВПМ рассчитывали по формуле (16). При этом возможны два способа расчета: по

Таблица 3 — Значения эффективной вязкости фильтруемых жидкостей и эффективных параметров пористых сред
Table 3 — Estimated effective viscosity of the filtered liquids and effective parameters of fibrous porous media

ВПМ	Масло	Пористость ВПМ, %	Размер пор, мм	ν , мм ² /с	C , мм/с	k , Д		Высота «масляной зоны», мм
						с эфф. вязк.	с реальн. вязк.	
ПТФЭ (пластина)	ТП-22	0	–	23,2	–	–	–	–
	ВМ-4	0	–	36,2	–	–	–	–
	И-20	0	–	40,4	–	–	–	–
ПП1	ТП-22	76,3		$5,1 \times 10^3$	1,860	$9,7 \times 10^5$	4390	22,2
	ВМ-4	77,4	0,8...2,0	$10,0 \times 10^3$	0,770	$7,8 \times 10^5$	2840	20,5
	И-20	77,0		$5,1 \times 10^3$	1,460	$7,6 \times 10^5$	6010	19,6
ПП2	ТП-22	65,6		4,8	0,112	55	265	89,8
	ВМ-4	65,7	0,3...1,5	237	0,018	458	67	108,3
	И-20	62,9		46,3	0,063	297	259	91,3
Филарс	ТП-22	77,9		292	0,201	$6,0 \times 10^3$	474	156
	ВМ-4	81,1	0,3...0,8	536	0,130	$7,1 \times 10^3$	480	144
	И-20	80,3		248	0,163	$4,1 \times 10^3$	671	152
Грифтекс	ТП-22	86,8	Многоуровневая система	29,9	0,119	363	281	6,6
	ВМ-4	89,8		42,5	0,102	442	377	9,6
	И-20	87,4		45,1	0,110	505	453	4,9

эффективному значению вязкости масла, получаемому в эксперименте с данным пористым материалом, и по реальной кинематической вязкости, определяемой для стекания масла по сплошной пластине. В первом случае значения k получаются неправдоподобно большими (до $10^4 \dots 10^6$ Д), что связано с отклонением поведения системы от модельного и завышением эффективной кинематической вязкости жидкостей. Во втором случае для всех ВПМ, кроме ПП1, значения k составляют 300...700 Д, что можно считать хорошим приближением к действительности. Для ПП1 проницаемость примерно на порядок больше. Отметим еще раз, что проницаемость k является характеристикой только пористой системы (ВПМ), в то время как коэффициент фильтрации C зависит еще и от параметров фильтруемой жидкости (вязкости и плотности).

Таким образом, описанный простейший эксперимент по самоочистке ВПМ позволяет достаточно быстро и точно определить проницаемость пористой среды и коэффициент фильтрации. Для этого, кроме исследуемой в эксперименте динамики изменения массы пористого образца, необходимо знать вязкость масла при температуре испытания (измеряется независимо любым доступным методом, например, по стеканию масла по сплошной пластине).

Влияние капиллярных явлений на самоочистку ВПМ от жидкой фазы. Предложенный выше подход не учитывает в деталях действия капиллярных сил, влияющих на характер движения жидкостей в пористых образцах. Как закон Дарси, так и уравнения, описывающие стекание жидкостей по сплошной

вертикальной или наклонной стенке, пренебрегают поверхностным натяжением (поверхностной энергией) жидкости. Это справедливо в случае стационарного стекания жидкости (например, когда ее количество в верхней части образца всё время пополняется из внешнего источника), но для проведенных нами экспериментов на капиллярные силы необходимо вносить поправку. Экспериментально было установлено, что по мере стекания жидкости во всех образцах в их нижней части остается зона, в которой практически все поры заполнены маслом. На рис. 5 представлены фотографии образцов, выдержанных в вертикальном положении в течение длительного времени (около 100 сут).

Как видно из рисунка, высота «масляной зоны» может сильно различаться для разных образцов. Она зависит от структуры ВПМ и свойств масла (вязкости и поверхностного натяжения). Теоретический расчет этой высоты, базирующийся на фундаментальных физических свойствах ВПМ и фильтруемой жидкости, по-видимому, достаточно сложен. Поэтому в нашей модели «масляная зона» характеризуется полуэмпирическим параметром m_∞ (уравнение (11)), представляющим собой массу масла, удерживаемого в образце (большая часть в порах) при длительных временах испытания (хранения). Значение m_∞ связано с высотой «масляной зоны» z очевидным соотношением

$$z = \frac{m_\infty}{\rho P}, \quad (17)$$

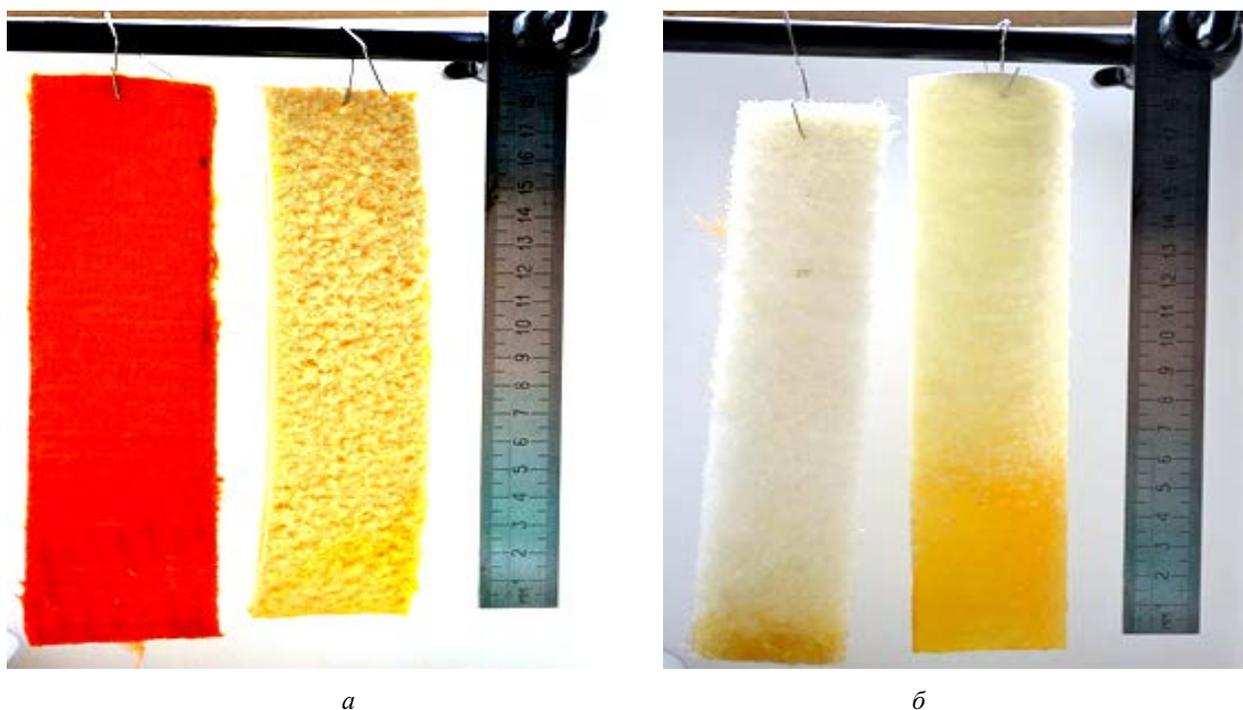


Рисунок 5 — Образцы ВПМ после 100 суток выдержки: а – Филарс и Грифтекс; б – ПП1 и ПП2

Fig. 5 — Specimens of fibrous porous materials after keeping in vertical position for 100 days: а – Filars and, Griftex, б – PP1 and PP2

где, как и выше, ρ — плотность жидкости, P — периметр горизонтального поперечного сечения пластины. Поскольку m_∞ является одним из параметров модели, рассчитываемым для каждого образца, то и значения z можно оценить для каждого образца на основе проведенных экспериментов, не измеряя их непосредственно. В табл. 3 они приведены в последнем столбце. Как видно из таблицы, высота «масляной зоны» для разных образцов изменяется в пределах от 5 примерно до 160 мм. Для образцов полипропилена одинакового химического строения, но имеющих различную пористую структуру (ПП1 и ПП2) значения z различаются в 4–5 раз, что подтверждается фотографиями на рис. 5, б. Особенно высокая «масляная зона» образуется на ВПМ Филарс, что связано с его мелкопористым строением и низкой жесткостью структуры. К сожалению, на рис. 5, а из-за его низкой контрастности высота «масляной зоны» не просматривается.

Исследование свойств «масляных зон» позволяет ответить на один важный вопрос, возникающий при выборе наиболее эффективной схемы фильтрации. Для некоторых устройств бывает необходимо использовать волокнисто-пористые фильтры значительной длины (до метра и даже более). Такую длину фильтра можно обеспечить двумя способами: 1) изготавливать цельный фильтр нужной длины и 2) набирать фильтр из нескольких отдельных коротких секций, стыкуя их торцы (рис. 6). Второй способ, очевидно, выглядит более простым и дешевым. Однако, как видно из рис. 6, «масляная зона» возникает внутри каждой секции, т. к. зона стыка представляет собой глобальный (по всему поперечному сечению) дефект структуры ВПМ, и гидродинамическое сопротивление, появляющееся в этом месте, препятствует свободному стеканию масла как внутри фильтра, так и по боковым стенкам. В то же время в цельном фильтре присутствует только одна «масляная зона», высота которой не зависит от высоты фильтра и определяется лишь пористой структурой ВПМ и свойствами жидкости. Таким образом, в цельном фильтре длина активно фильтрующих зон (не задерживающих масло) может быть намного больше, чем в составном (согласно рис. 6 — 93% и 70% соответственно). Поэтому наиболее эффективным решением будет применение цельного фильтра нужных размеров, если только это не приведет к существенному удорожанию конструкции.

Отметим, что по совокупности полученных результатов наиболее эффективным фильтрующим материалом оказывается Грифтекс. Его многоуровневая структура пор обеспечивает практически независимое стекание масла по поверхности образца и в объеме ВПМ. Имея проницаемость и коэффициент фильтрации, близкие к аналогичным параметрам для других пористых материалов, Грифтекс обладает минимальной высотой «масляной зоны» (всего 5–10 мм), что обеспечивает эффективную фильтрацию в реальных масляных фильтрах.



Рисунок 6 — Сплошной и составной фильтры из материала Грифтекс после длительной эксплуатации
Fig. 6 — Continuous and piecewise Grifteks filters after long use

Выводы

Стеkanie жидкости по вертикальной пластине из волокнисто-пористого материала представляет собой сложную комбинацию стекания по внешней поверхности пластины и фильтрации в ее внутренних слоях.

Разработанная нами теоретическая модель, рассматривающая эти процессы в аддитивном приближении, позволяет связать экспериментально наблюдаемые величины (уменьшение массы жидкости в образце со временем) с эффективными характеристиками ВПМ (проницаемость пористой среды), жидкости (эффективная вязкость) и системы как целого (коэффициент фильтрации). Рассчитанные значения параметров для исследованных масел и полимерных ВПМ близки к литературным значениям.

Дополнительный учет капиллярных сил в рамках модели позволяет теоретически оценить высоту «масляной зоны», остающейся в исследуемом ВПМ при длительных временах выдержки. Она составляет для разных ВПМ 5...160 мм и зависит прежде всего от пористой структуры материала. Теоретические оценки соответствуют экспериментальным наблюдениям.

Эффективность самоочистки ВПМ от жидкой фазы зависит как от гидродинамических, так и от капиллярных свойств жидкости и пористого материала. Она возрастает с высотой фильтра, т. к. при увеличении высоты длина активно фильтрующих зон также увеличивается, а размер пассивных «масляных зон» остается постоянным.

Наиболее эффективным фильтрующим материалом из рассмотренных ВПМ является Грифтекс, многоуровневая структура пор которого обеспечивает практически независимое движение масла на поверхности и внутри пористого образца. Грифтекс обладает также минимальной высотой «масляной зоны» (всего 5–10 мм), что способствует эффективной фильтрации масел в реальных фильтроэлементах.

Благодарности

Авторы благодарят н. с. Кудрицкого В. Г. за получение качественных электронно-микроскопических изображений структуры элементов, исследованных ВПМ.

Обозначения

C — коэффициент фильтрации; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; H — напор; h — толщина пленки жидкости; k — проницаемость пористой среды; l — высота пластины; M — полная масса жидкости в образце ($m + m_1$); m — масса жидкости на поверхности пластины; m_0 — масса жидкости на поверхности пластины в начальный момент; m_1 — масса жидкости внутри пластины; m_{10} — масса жидкости внутри пластины в начальный момент; m_{\square} — масса масла, остающегося в образце при длительных временах испытания (хранения); P — периметр поперечного (горизонтального) сечения образца; Re — число Рейнольдса; t — время; u — средняя скорость жидкости, стекающей по внешней поверхности пластины; z — высота «масляной зоны»; $\alpha = 2gm_0^2 / 3\nu\rho^2 P^2 l^3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ — параметр модели, характеризующий скорость стекания; μ — динамическая вязкость жидкости; ν — кинематическая вязкость жидкости; ρ — плотность жидкости.

Литература

1. Гракович П. Н., Иванов Л. Ф., Смирнов А. В. Опыт разработки и использования фильтров «Гриф» для очистки сжатых газов // Технические газы. 2013. № 2. С. 43–48.
2. Мазус М. Г., Мальгин А. Д., Моргулис М. Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

3. Волков И. М., Кононенко П. Ф., Федичкин И. К. Гидротехнические сооружения. М.: Колос, 1968. 464 с.
4. Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд. М.: МАКС Пресс, 2017. 88 с.
5. Ентов В. М. Теория фильтрации // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2, С. 121–128.
6. Гракович П. Н., Иванов Л. Ф., Калинин Л. А., Рябченко И. Л., Толстопятов Е. М., Красовский А. М. Лазерная абляция политетрафторэтилена // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 3. С. 97–105.
7. Полипропилен [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полипропилен> (дата обращения: 25.09.2018).
8. Термостойкая нить «Арселон» // Сохим: сайт ОАО «СветлогорскХимволокно» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sohim.by/rus/production/arselon/yarn/> (дата обращения: 25.09.2018).
9. Политетрафторэтилен // Википедия [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Политетрафторэтилен> (дата обращения: 25.09.2018).
10. Паспорт качества ТП-22Б // Эксперт-ойл: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.expert-oil.com/site.xp/051048053.html> (дата обращения: 26.09.2018).
11. Масла турбинные ТП, ТП-22, ТП-30, ТП-46 // Валентина-М: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.valentina-m.by/agrinol/turbine.oil/Tr> (дата обращения: 26.09.2018).
12. Паспорт качества ВМ-4 // Эксперт-ойл: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.expert-oil.com/site.xp/052050049.html> (дата обращения: 25.09.2018).
13. Вакуумное масло ВМ-4 ТУ 38.401-58-3-90 // Вакуум-сервис: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://vacservice.ru/catalog/vacuum-oils-and-liquids/vakuumnoe-maslo-vm-4-tu-38-401-58-3-90> (дата обращения: 26.09.2018).
14. Паспорт качества И-20А // Эксперт-ойл: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.expert-oil.com/site.xp/050053049.html> (дата обращения: 25.09.2018).
15. Масло индустриальное И-20А // Нафтан: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: http://naftan.by/ru/p_oil_industry.aspx#product1 (дата обращения: 26.09.2018).
16. Wolfram Language & System. Documentation Center // Wolfram [Электронный ресурс]. URL: <https://reference.wolfram.com/language/> (дата обращения: 24.09.2018).
17. Семенов П. А. Течение жидкости в тонких слоях // Журнал технической физики. 1944. Т. 14, № 7–8. С. 427–437.
18. Левич В. Г. Физико-химическая термодинамика. 2-е изд. М.: Физматлит, 1959. 700 с.
19. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
20. Вилькер Д. С. Лабораторный практикум по гидромеханике. М.: Физматлит, 1959. 352 с.
21. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.; Ижевск: РХД, 2008. 254 с.
22. Иродов И. Е. Физика макросистем. Основные законы. 3-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 207 с.
23. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.; Ижевск: ИКИ, 2004. 640 с.

References

1. Grakovich P. N., Ivanov L. F., Smirnov A. V. Opyt razrabotki i ispol'zovaniya fil'trov «Grif» dlya ochistki szhatykh gazov [Development an application of Grif filters for cleaning compressed gases]. *Tekhnicheskie gazy*, 2013, no. 2, pp. 43–48.
2. Mazus M. G., Mal'gin A. D., Morgulis M. L. *Fil'try dlya ulavlivaniya promyshlennykh pyley* [Filters for trapping industrial dusts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 240 p.
3. Volkov I. M., Kononenko P. F., Fedichkin I. K. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydrotechnical facilities]. Moscow: Kolos Publ., 1968. 464 p.
4. Leont'ev N. E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Basics of the theory of filtration]. Moscow: MAKS Press Publ., 2017. 88 p.

5. Entov V. M. Teoriya fil'tratsii [Theory of filtration]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros educational journal], 1998, no. 2, pp. 121–128.
6. Grakovich P. N., Ivanov L. F., Kalinin L. A., Ryabchenko I. L., Tolstopyatov E. M., Krasovskiy A. M. Lazernaya ablyatsiya politetraforetilena [Laser ablation of poly(tetrafluoroethylene)]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian chemical journal], 2008, vol. 52, no. 3, pp. 97–105.
7. Polipropilen (Polypropylene). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полипропилен> (accessed 25.09.2018).
8. Termostoykaya nit' «Arselon» (Heat-resistant yarn “Arselon”). Available at: <http://www.sohim.by/rus/production/arselon/yarn/> (accessed 25.09.2018).
9. Politetraforetilen (Poly(tetrafluoroethylene)). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Политетрафторэтилен> (accessed 25.09.2018).
10. Pasport kachestva TP-22B (Quality certificate for TP-22B). Available at: <http://www.expert-oil.com/site.xp/051048053.html> (accessed 26.09.2018).
11. Masla turbinnye TP, TP-22, TP-30, TP-46 (Turbine oils TP, TP-22, TP-30, TP-46). Available at: <http://www.valentina-m.by/agrinol/turbinie.oil/Тр> (accessed 26.09.2018).
12. Pasport kachestva VM-4 (Quality certificate for VM-4). Available at: <http://www.expert-oil.com/site.xp/052050049.html> (accessed 25.09.2018).
13. Vakuumnoe maslo VM-4 TU 38.401-58-3-90 (Vacuum oil VM-4). Available at: <http://vacservice.ru/catalog/vacuum-oils-and-liquids/vakuumnoe-maslo-vm-4-tu-38-401-58-3-90> (accessed 26.09.2018).
14. Pasport kachestva I-20A (Quality certificate for I-20A). Available at: <http://www.expert-oil.com/site.xp/050053049.html> (accessed 25.09.2018).
15. Maslo industrial'noe I-20A (Industrial oil I-20A). Available at: http://naftan.by/ru/p_oil_industry.aspx#product1 (accessed 26.09.2018).
16. Wolfram Language & System Documentation Center. Available at: <http://reference.wolfram.com/language/> (accessed 24.09.2018).
17. Semenov P. A. Techenie zhidkosti v tonkikh sloyakh [Fluid flow in thin layers]. *Zhurnal tehnichekoj fiziki* [Technical Physics], 1944, vol. 14, no. 7–8, pp. 427–437.
18. Levich V. G. *Fiziko-khimicheskaya termodinamika* [Physicochemical thermodynamics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1959. 700 p.
19. Polubarinova-Kochina P. Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of groundwater movement]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 664 p.
20. Vil'ker D. S. *Laboratornyy praktikum po gidromekhanike* [Laboratory practical work on fluid mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1959. 352 p.
21. Sheydegger A. E. *Fizika techeniya zhidkostey cherez poristye sredy* [Physics of fluid flow through porous media]. Moscow; Izhevsk: RKHD Publ., 2008. 254 p.
22. Irodov I. E. *Fizika makrosistem. Osnovnye zakony* [Physics of macro systems. Basic laws]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2006. 207 p.
23. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede* [Flow of homogeneous liquids in a porous medium]. Moscow; Izhevsk: IKI, 2004. 640 p.

Поступила в редакцию 27.09.2018

© В. Ю. Шумская, С. Ф. Жандаров, Л. А. Калинин, Л. Ф. Иванов, В. В. Снежков, А. Н. Егоров, П. Н. Гракович, 2018