

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 544.774

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-286-293

ПРОНИЦАЕМОСТЬ НАНОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

Д. П. Волков^{1*}, Ю. П. Заричняк², И. К. Мешковский², М. А. Симонова³

¹ Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы
МЧС России им. Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург, Россия
* dp-lv@yandex.ru

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследуется проницаемость нанопористых стекол с радиусом пор 5—200 нм. Такие пористые стекла используются в качестве тонких фильтров, оптических материалов с регулируемым коэффициентом преломления, твердых адсорбентов, селективных мембран, основы для композиционных материалов в лазерной технике и оптическом приборостроении. Предложены модели структуры таких материалов и методика расчета их молекулярной проницаемости. Результаты расчета по предложенным моделям согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пористое стекло, модель структуры, молекулярная проницаемость, параллельные капилляры, взаимопроницающие компоненты

Ссылка для цитирования: Волков Д. П., Заричняк Ю. П., Мешковский И. К., Симонова М. А. Проницаемость нанопористых стекол // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 3. С. 286—293. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-286-293.

PERMEABILITY OF NANOPOROUS GLASSES

D. P. Volkov^{1*}, Yu. P. Zarichnyak², I. K. Meshkovsky², M. A. Simonova³

¹ E. N. Zinichev St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
St. Petersburg, Russia
* dp-lv@yandex.ru

² ITMO University, St. Petersburg, Russia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The permeability of nanoporous glasses with the pore radius of 5–200 nm is studied. Such porous glasses are used as thin filters, optical materials with adjustable refractive index, solid adsorbents, selective membranes, and as the basis for composite materials in laser technology and optical instrument making. Models of the structure and methods for calculating the molecular permeability of such materials are proposed. Results of calculation using the proposed models are compared with experimental data.

Keywords: porous glass, structure model, molecular permeability, parallel capillaries, interpenetrating components

For citation: Volkov D. P., Zarichnyak Yu. P., Meshkovsky I. K., Simonova M. A. Permeability of nanoporous glasses. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 3. P. 286—293 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-286-293.

Пористые стекла по размерам пор могут быть разделены на нанопористые и ультрапористые. К нанопористым стеклам относят пластины с радиусом пор $r = 1 \dots 10$ нм, полученные из исходного монолитного стекла путем выщелачивания растворами кислот. Для получения ультрапористых стекол нанопористые пластины подвергают дополнительной обработке растворами щелочей, что приводит к увеличению радиуса пор до 200 нм [1—3]. В соответствии с классификацией IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry — Международный союз теоретической и прикладной химии) по размеру пор нанопористые вещества разделяются на три группы: микропористые ($r < 2$ нм); мезопористые ($r = 2 \dots 50$ нм); макропористые ($r > 50$ нм) [4]. Исследуемые в данной работе стекла относятся к группе нанопористых или мезопористых материалов.

Одна из важных характеристик пористого вещества — проницаемость по отношению к газам и жидкостям. Известны попытки создания теории, связывающей геометрическую структуру пористого материала с проницаемостью. Весьма полный обзор предложенных теорий приведен в работах [5, 6], где проницаемость представлена как макроскопическая характеристика пористого материала, определяемая законами Пуазейля и Дарси. В нанопористых стеклах наблюдается молекулярный режим течения газа, подчиняющийся закону Кнудсена. В этой связи цель настоящей статьи — выбор моделей, описывающих структуру нанопористых стекол, и вывод формул для расчета их проницаемости при кнудсеновском режиме течения газа.

Кислотным травлением отдельных компонентов в стеклах сложного состава можно получить структуру с сообщающимися порами. Структура и свойства пластинок из пористого стекла в значительной степени зависят от условий их окончательной термообработки [3, 7—9]. В работах [7, 8] было показано, что при повышении температуры термообработки тел из пористого стекла от 130 до 800 °С (при постоянной длительности 40 мин) в них наблюдаются две стадии изменений. Первая, в диапазоне температур 130—550 °С, характеризуется незначительным уменьшением суммарной пористости и некоторым увеличением среднего радиуса пор. На второй стадии (680—800 °С) суммарная пористость резко уменьшается, а к концу этой стадии основной объем пор почти полностью исчезает. Зависимость пористости (Π) и среднего радиуса пор (r) от температуры термообработки (t) показана на рис. 1.

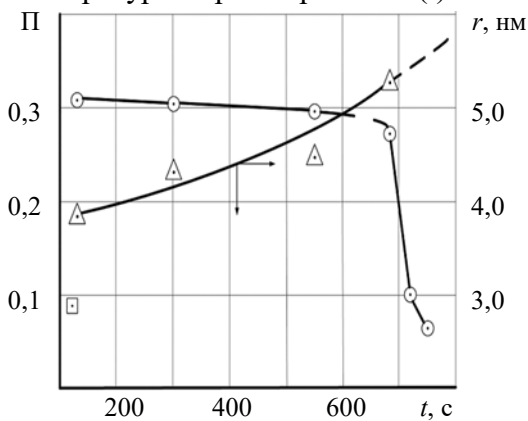


Рис. 1

Технология получения пористых стекол позволяет описать их структуру моделями двух типов: 1 — моделью параллельных капилляров [5, 10] и 2 — трехмерной изотропной моделью с взаимопроникающими компонентами [10, 11]. Как было отмечено, в результате термообработки пористость стеклянных пластинок остается практически постоянной, а диаметр (d) пор увеличивается. Это можно объяснить следующим образом.

В процессе получения пористой структуры на стенках пор (капилляров) образуются микрошероховатости (рис. 2, а). В результате термообработки микрошероховатости начинают оплавляться (рис. 2, б) и постепенно сглаживаются (рис. 2, в). В соответствии с этим представим микрошероховатости на стенках капилляра в упрощенном виде, а именно в виде зубцов

одинаковой формы и размера (рис. 2, *з*). Далее представим капилляр в виде, показанном на рис. 2, *д*: здесь выступы микрошероховатостей „собраны“ с одной стороны капилляра, а впадины — с другой, причем длины выступов и впадин равны между собой и составляют половину длины капилляра.

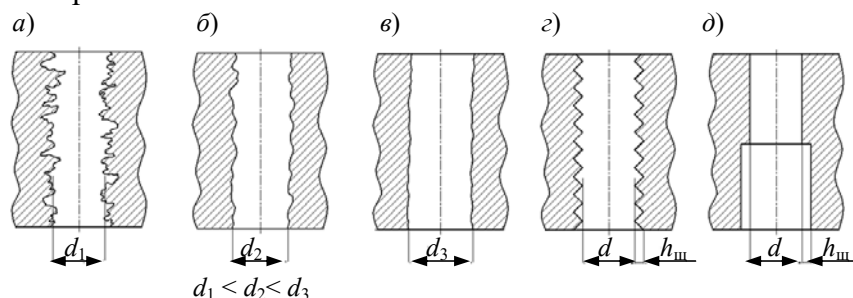


Рис. 2

Анализ процесса фильтрации газа через пластинки из пористого стекла проведен на элементарных ячейках (рис. 3). На рис. 3, *а*, *в* представлены элементарные ячейки исходной пористой структуры (после кислотного травления) для 1-й и 2-й моделей: здесь l_1 и l_2 — радиусы поры (капилляра), соответствующие выступам и впадинам микрошероховатостей, L — длина капилляра, k_{m1} и k_{m2} — проницаемость компонентов. С повышением температуры термообработки выступы микрошероховатостей оплавляются, при этом l_1 увеличивается, а l_2 уменьшается. При температуре 680 °С микрошероховатости сгладились, т.е. $l_1=l_2$. Элементарные ячейки приобретают вид, изображенный на рис. 3, *б*, *г* (модели 1 и 2 соответственно).

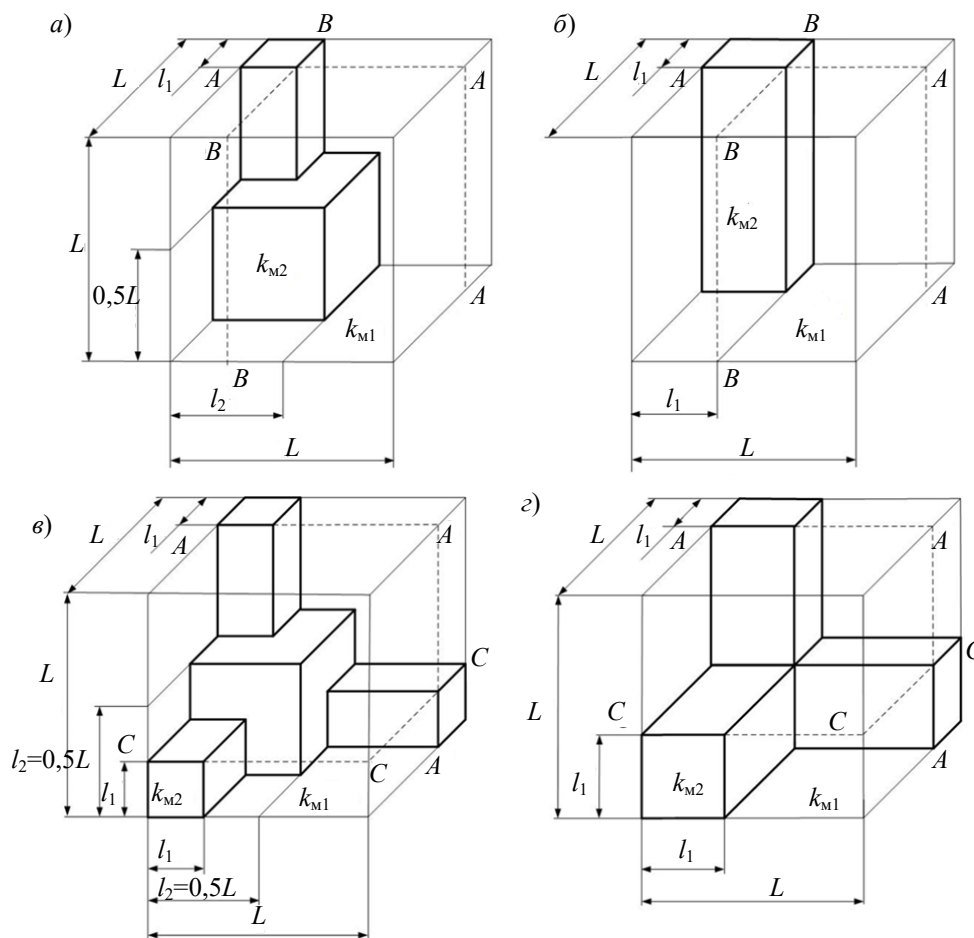


Рис. 3

В работе [8] приведены экспериментальные данные по размерам удельной поверхности пор пластинок из пористого стекла. На основе этих данных была определена средняя высота

микрошероховатостей, составляющая $h_{ш}=1,5$ нм. В начальный момент времени пористость пластинок $\Pi=0,3$, а средний радиус пор $r=3,9$ нм. Примем, что этот радиус соответствует выступам микрошероховатостей l_1 . Тогда радиус пор, соответствующий впадинам микрошероховатостей, будет равен $r=l_2\approx 1,4l_1\approx 5,5$ нм. В соответствии с принятыми допущениями найдем значения относительных радиусов $\bar{l}_1=l_1/L$ и $\bar{l}_2=l_2/L$ для рассматриваемых моделей.

а) *Модель параллельных капилляров*. Запишем выражение для пористости элементарной ячейки до термообработки (см. рис. 3, а):

$$\Pi = 0,5\bar{l}_1^2 + 0,5\bar{l}_2^2 = 0,5\bar{l}_1^2 + 0,5(1,4\bar{l}_1)^2. \quad (1)$$

Отсюда найдем, что при $\Pi = 0,3$ $\bar{l}_1 = l_1/L = 0,45$. После термообработки ($t=680$ °С) $\bar{l}_1 = \bar{l}_2$, тогда согласно формуле (1) получим, что при $\Pi = 0,28$ $\bar{l}_1 = 0,53$. Далее примем, что изменение $\bar{l}_1$ в результате термообработки происходит по линейному закону.

б) *Модель с взаимопроникающими компонентами*. Примем, что в начальный момент времени $l_2 = 0,5L$ и $\Pi = 0,3$. Тогда из выражения для пористости

$$\Pi = \bar{l}_2^3 + 3\bar{l}_1^2(1 - \bar{l}_2) \quad (2)$$

найдем, что $\bar{l}_1 = 0,34$. При $t=680$ °С $\Pi = 0,28$ и согласно уравнению (2) $\bar{l}_1 = \bar{l}_2 = 0,35$.

Значения $\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$ при различной температуре отжига приведены в таблице.

Температура термообработки, t °С	Пористость Π	Радиус пор r , нм	Модель			
			параллельных капилляров		с взаимопроникающими компонентами	
			$\bar{l}_1$	$\bar{l}_2$	$\bar{l}_1$	$\bar{l}_2$
130	0,30	3,9	0,45	0,63	0,34	0,50
300	0,29	4,3	0,47	0,61	0,34	0,48
550	0,28	5,1	0,51	0,56	0,35	0,43
680	0,28	5,6	0,53	0,53	0,35	0,35

В работах [12, 13] отмечается, что если длина свободного пробега молекул газа больше диаметра капилляра, то закономерности переноса обусловлены молекулярным режимом. Молекулярный режим течения газа будет наблюдаться и в пористых стеклах. В этом случае ламинарное течение Пуазейля и закон фильтрации Дарси выполняться не будут. Если длина свободного пробега молекул газа значительно больше диаметра пор, то процессы столкновения молекул со стенками пор доминируют над соударением молекул между собой. В этом случае транспорт газа через мембрану происходит по механизму диффузии Кнудсена [14]. При наличии перепада давления молекулы газа в таких капиллярах движутся не отдельными слоями, а независимо друг от друга, постоянно сталкиваясь со стенками капилляра. При этом принимается, что молекулы газа будут проходить через капилляр, образуя молекулярный пучок, в котором каждая молекула движется с той скоростью, какую она имела при входе в капилляр. Такое движение молекул газа называется кнудсеновским течением. Кнудсеновское течение в прямом цилиндрическом капилляре радиусом r и длиной L , на концах которого поддерживается постоянное давление p_1 и p_2 , описывается уравнением [15]

$$\frac{pV}{\tau} = \frac{4\pi r^3}{3} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \frac{\Delta p}{L}, \quad (3)$$

где V — объем газа, прошедшего через капилляр за время τ ; Δp — перепад давления на длине капилляра L ; R — газовая постоянная; M — молекулярный вес; p — среднее давление газа; T — термодинамическая температура.

Как отмечено выше, при молекулярном режиме течения газа закон Дарси в форме

$$\frac{V}{\tau} = \frac{k}{\mu} S \frac{\Delta p}{L}, \quad (4)$$

где S — площадь поры (капилляра), μ — вязкость, k — проницаемость пористого материала по Дарси, не выполняется, так как происходит отклонение вязкости пристенных слоев от объемной.

В [16] предложено выражение для учета вязкости газа при разрежении:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{2-f_1}{f_1} + \frac{2-f_2}{f_2} \right) \cdot \text{Kn}}, \quad (5)$$

где μ_0 — вязкость газа при атмосферном давлении p_0 ; $\text{Kn} = \Lambda/d$ — критерий Кнудсена; $\Lambda = \Lambda_0 p_0/p$ — длина свободного пробега молекул при давлении p ; коэффициенты f_1 и f_2 соответствуют, как правило, значениям $f = f_1 = f_2 = 0,6 \dots 1,0$.

Отнесем в уравнении (4) объемный расход газа к среднему давлению $(p_1 + p_2)/2$ и учтем изменение вязкости, тогда получим модифицированный закон Дарси для молекулярного режима течения газа:

$$\frac{pV}{\tau} = \frac{k}{\mu} \frac{p_1 + p_2}{2} S \frac{\Delta p}{L}. \quad (6)$$

В работе [17] величина $k_M = \frac{k}{\mu} \frac{p_1 + p_2}{2}$ названа молекулярной проницаемостью и отмечено, что каждый вид потока газа можно характеризовать различными постоянными проницаемостями; из (6) видно, что размерность проницаемости k_M в системе СИ — метр в квадрате на секунду ($\text{м}^2/\text{с}$). Коэффициент проницаемости, определяемый уравнением (6), зависит от диаметра и типа пор и от природы газа.

Рассмотрим процесс фильтрации газа через элементарные ячейки. В [18] были введены понятия: „проницаемость каркаса“ k_{M1} и „проницаемость поры“ k_{M2} . Используем эти понятия и в данной работе. Разобьем элементарную ячейку модели параллельных капилляров (см. рис. 3, а) плоскостями $A-A$ и $B-B$, непроницаемыми для линий тока, на отдельные участки. Записав выражения для фильтрационных сопротивлений этих участков, получим уравнение для эффективной проницаемости элементарной ячейки анизотропной модели:

$$k_M = k_{M2} \left[\frac{\bar{l}_1^2}{\bar{l}_1^2 + (1 - \bar{l}_2^2)} v + \frac{2(\bar{l}_2^2 - \bar{l}_1^2)v}{1 - v} \right], \quad v = \frac{k_{M1}}{k_{M2}}. \quad (7)$$

При $\bar{l}_1 = \bar{l}_2$ (см. рис. 3, б) формула (7) примет вид уравнения слоистой структуры, когда слои параллельны потоку [4]:

$$k_M = k_{M2} \bar{l}_1^2 + k_{M1} (1 - \bar{l}_1^2). \quad (8)$$

В рассматриваемом случае „каркас“ беспористый, т.е. $k_{M1} = 0$ и $v = k_{M1}/k_{M2} = 0$. Тогда выражение (7) преобразуется к виду

$$k_M = k_{M2} \bar{l}_1^2. \quad (9)$$

Для модели взаимопроникающих компонентов применим комбинированное дробление элементарной ячейки плоскостями $A-A$ и $C-C$ (см. рис. 3, в, г). В этом случае формула для эффективной проницаемости при условии $k_{M1} = 0$ имеет следующий вид:

$$k_M = k_{M2} \frac{\bar{l}_1^2}{1 - \bar{l}_1 + \bar{l}_1^2}. \quad (10)$$

Неизвестной величиной в формулах (9), (10) остается „проницаемость поры“ $k_{м2}$. В элементарной ячейке модели параллельных капилляров (рис. 3, а, б) в направлении фильтрации газа площадь поперечного сечения $s = l_1^2$. Тогда расход газа через капилляр (пору) при молекулярном режиме течения задается законом Кнудсена:

$$\frac{pV}{\tau} = \frac{4}{3} r s \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \cdot \frac{\Delta p}{L}. \quad (11)$$

Расход газа через элементарную ячейку может быть определен из модифицированного закона Дарси (6). В этом случае L и $s = L^2$ — ширина и площадь поперечного сечения элементарной ячейки. Приравняв (6) и (11), получим выражение для проницаемости элементарной ячейки в модели параллельных капилляров:

$$k_m = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \cdot \frac{l_1^2}{L^2} = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \cdot \overline{l_1^2}. \quad (12)$$

Сравнение уравнений (9) и (12) показывает, что „проницаемость поры“

$$k_{м2} = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}}. \quad (13)$$

Проницаемость элементарной ячейки структуры с взаимопроникающими компонентами (10) определяется как

$$k_m = \frac{4}{3} r \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \cdot \frac{\overline{l_1^2}}{1 - \overline{l_1} + \overline{l_1^2}}. \quad (14)$$

Таким образом, получены выражения для расчета коэффициента проницаемости пористых материалов при молекулярном режиме течения газа для разных моделей, когда поры и „каркас“ образуют анизотропную структуру с однонаправленными продольными капиллярами (12) либо трехмерно изотропную структуру с взаимопроникающими компонентами (14). По формулам (12) и (14) рассчитаны коэффициенты проницаемости мелкопористых стекол для водорода, гелия, неона и аргона. Результаты расчетов представлены на рис. 4, а, б; на рис. 4, а кривыми 1, 2 для гелия и 3, 4 для аргона обозначен расчет по формулам (12) и (14) соответственно, знаками 5 и 6 соответственно для гелия и аргона отмечены экспериментальные данные [4]; на рис. 4, б: 1, 2 для водорода и 3, 4 для неона — расчет по формулам (12) и (14) соответственно, знаки 5, 6 (водород и неон) — эксперимент [4].

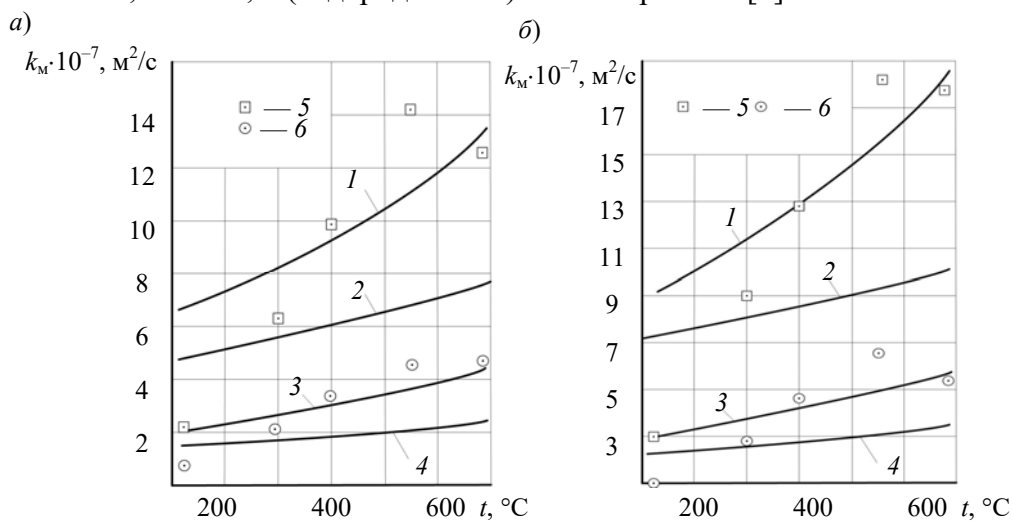


Рис. 4

Как видно из графиков, результаты расчетов качественно совпадают с экспериментальными данными, однако при температуре термообработки до $t = 300^\circ\text{C}$ наблюдается значительное

(до 200 %) превышение расчетных значений над экспериментальными. Основной причиной такого различия и резкого увеличения экспериментальных значений газопроницаемости стеклянных пластинок может быть изменение степени сквознопористости при повышении температуры термической обработки, тогда как в моделях доля сквозных и закрытых пор не учитывается и принимается, что все поры сквозные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешковский И. К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц: Монография. СПб: СПбГУ ИТМО, 1998. 332 с.
2. Ермакова Л. Е., Волкова А. В., Антропова Т. В., Сидорова М. Получение ультра- и нанопористых стекол и исследование их структурных и электрокинетических характеристик в растворах 1:1-зарядных электролитов // Коллоидный журнал. 2007. Т. 69, № 5. С. 603—611.
3. Шахильдян Г. Ю. Структурные особенности нанопористых стекол после высокотемпературного спекания // Науч. журн. „GLOBUS“. Технические науки. 2021. № 5 (41). С. 36—40.
4. Соби́на Е. П. Метрология пористости и проницаемости твердых веществ и материалов: Монография. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 428 с.
5. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые материалы. М.: Гостехтеориздат, 1960. 247 с.
6. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.—Л.: Гостехиздат, 1947. 244 с.
7. Мешковский И. К., Белоцерковский Г. М., Плаченев Т. Г., Молчанова О. С. Исследование изменений, происходящих в структуре пористого стекла // Журн. прикладной химии. 1968. Т. 41, № 7. С. 1452—1457.
8. Мешковский И. К., Белоцерковский Г. М., Плаченев Т. Г. Исследование изменений пористой структуры и газопроницаемости тел из пористого стекла в зависимости от условий термообработки // Журн. прикладной химии. 1970. Т. 43, № 1. С. 87—92.
9. Гавронская Ю. Ю., Пак В. Н. Наноструктурированные материалы на основе пористого стекла // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 2). С. 261—266.
10. Герасимов Д. С. Основные определения и понятия фильтрации жидкостей и газов. Среды и границы применимости закона Дарси: Учеб. пособие. Тюмень: Тюмен. Гос. нефтегазовый ун-т, 2013. 41 с.
11. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Монография. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
12. Кришер О. Научные основы техники сушки. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 539 с.
13. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехтеориздат, 1954. 296 с.
14. Пятков Е. С. Мезопористые керамические мембраны для фракционирования низкомолекулярных углеводородов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017.
15. Тимофеев Д. П. Кинетика адсорбции. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 252 с.
16. Прасолов Р. С. Исследование теплообмена при переходном вакууме: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1967.
17. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 504 с.
18. Волков Д. П. Проницаемость пористых материалов // Инженерно-физический журн. 1981. Т. 41, № 3. С. 421—427.

Сведения об авторах

Дмитрий Павлович Волков

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России им. Е. Н. Зиничева, кафедра физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности; E-mail: dp-lv@yandex.ru

Юрий Петрович Заричняк

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Университет ИТМО, образовательный центр „Энергоэффективные инженерные системы“; E-mail: zarich4@gmail.com

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, научно-исследовательский центр световодной фотоники; директор Центра;
E-mail: igorkm@itmo.ru
- Марина Александровна Симонова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности Инженерно-строительного института;
E-mail: masima62@inbox.ru

Поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 14.01.2024.

REFERENCES

1. Meshkovskiy I.K. *Kompozitsionnyye opticheskiye materialy na osnove poristyykh matrits* (Composite Optical Materials Based on Porous Matrices), St. Petersburg, 1998, 332 p. (in Russ.)
2. Ermakova L.E., Volkova A.V., Antropova T.V., Sidorova M. *Colloid Journal*, 2007, no. 5(69), pp. 603–611. (in Russ.)
3. Shakhgildyan G.Yu. *Scientific journal "GLOBUS". Technical Sciences*, 2021, no. 5(41), pp. 36–40. (in Russ.)
4. Sobina E.P. *Metrologiya poristosti i pronitsayemosti tverdykh veshchestv i materialov* (Metrology of Porosity and Permeability of Solids and Materials), Yekaterinburg, 2021, 428 p. (in Russ.)
5. Scheidegger A.E. *The Physics of Flow through Porous Media*, Univ. of Toronto press, 1957.
6. Leybenzon L.S. *Dvizheniye prirodnnykh zhidkostey i gazov v poristoy srede* (Movement of Natural Liquids and Gases in Porous Media), Moscow, Leningrad, 1947, 244 p. (in Russ.)
7. Meshkovskiy I.K., Belotserkovskiy G.M., Plachenov T.G., Molchanova O.S. *Journal of Applied Chemistry of the USSR*, 1968, no. 7(41), pp. 1452–1457. (in Russ.)
8. Meshkovskiy I.K., Belotserkovskiy G.M., Plachenov T.G. *Journal of Applied Chemistry of the USSR*, 1970, no. 1(43), pp. 87–92. (in Russ.)
9. Gavronskaya Yu.Yu., Pak V.N. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2015, no. 2, pp. 261–266. (in Russ.)
10. Gerasimov D.S. *Osnovnyye opredeleniya i ponyatiya fil'tratsii zhidkostey i gazov. Sredy i granitsy primenyayemosti zakona Darsi* (Basic Definitions and Concepts of Liquid Filtration and Gases. Environments and Limits of Applicability of Darcy's law), Tyumen, 2013, 41 p. (in Russ.)
11. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* (Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials), Leningrad, 1974, 264 p. (in Russ.)
12. Krischer O. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Berlin u. a., Springer Verl., 1956.
13. Lykov A.V. *Yavleniya perenosa v kapillyarno-poristyykh telakh* (Transport Phenomena in Capillary-Porous Bodies), Moscow, 1954, 296 p. (in Russ.)
14. Pyatkov E.S. *Mezoporistyye keramicheskiye membrany dlya fraktsionirovaniya nizkomolekulyarnykh uglevodorodov* (Mesoporous Ceramic Membranes for Fractionation Low Molecular Weight Hydrocarbons), Candidate's thesis, Moscow, 2017, 111 p. (in Russ.)
15. Timofeev D.P. *Kinetika adsorbtsii* (Adsorption Kinetics), Moscow, 1962, 252 p. (in Russ.)
16. Prasolov R.S. *Issledovaniye teploobmena pri perekhodnom vakuumе* (Study of Heat Transfer in Transient Vacuum), Doctor's thesis, Leningrad, 1967, 376 p. (in Russ.)
17. Barrer R.M. *Diffusion in and through solids*, Cambridge, 1941.
18. Volkov D.P. *Journal of Engineering Physics*, 1981, no. 3(41), pp. 946–951.

Data on authors

- Dmitry P. Volkov** — PhD, Associate Professor; E. N. Zinichev St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Department of Physical and Technical Fundamentals of Fire Safety; E-mail: dp-lv@yandex.ru
- Yuriy P. Zarichnyak** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Educational center "Energy efficient engineering systems"; E-mail: zarich4@gmail.com
- Igor K. Meshkovskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Research Center for Light Guide Photonics; Director, Chief Researcher; E-mail: igorkm@itmo.ru
- Marina A. Simonova** — PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Technosphere Safety of the Institute of Civil Engineering; E-mail: masima62@inbox.ru

Received 10.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 14.01.2024.