

# Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы  
исследования и контроля**

**Physical methods  
of research and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-34-40

## МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРФОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНО-ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ОПМН-П И ОФАМ-К

© Сергей Иванович Лазарев, Юрий Михайлович Головин, Сергей Владимирович Ковалев, Владимир Юрьевич Рыжкин

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия; e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

*Статья поступила 5 марта 2018 г.*

Представлены результаты исследований, на основании которых разработан метод автоматизированного определения микроструктурных неоднородностей полимерных пористых нанофильтрационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К. Предлагаемый метод позволяет идентифицировать поверхностные неоднородности селективно-проницаемых мембран и их коэффициент засоренности. Полученные данные дают возможность в условиях заводских лабораторий прогнозировать и определять срок эффективной работы нанофильтрационных пористых перегородок типа ОПМН-П и ОФАМ-К, оснащенных рулонными элементами баромембранных и электробаромембранных установок концентрирования, очистки технологических растворов и стоков гальванических, химических и пищевых производств. С помощью предлагаемого метода, применимость которого подтверждена результатами использования разработанного программного комплекса, можно автоматизированно рассчитывать среднюю величину диаметра засорения полупроницаемых мембран и коэффициент засоренности пористых тел. Методика расчета базируется на программном обеспечении Matlab 2017. Практическая реализация метода представлена на примере процесса нанофильтрации с применением полупроницаемых мембран типа ОФАМ-К и ОПМН-П.

**Ключевые слова:** метод; расчет; нанофильтрационная мембрана; поверхность; коэффициент засоренности; микроструктурные неоднородности.

## METHOD OF AUTOMATED DETERMINATION OF MORPHOLOGY OF A SELECTIVE-PERMEABLE SURFACE OF NANOFILTRATION MEMBRANES OPMN-P AND OFAM-K

© Sergey I. Lazarev, Yury M. Golovin, Sergey V. Kovalev, Vladimir Yu. Ryzhkin

Tambov State Technical University, Tambov, Russia; e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

*Submitted March 5, 2018.*

The analytical review and determining method of the morphology of structure inhomogeneities of selectively-permeable surface of polymer membranes are presented in this article. The aim of the work was the developing and research of automated method for calculating the morphology of microstructure inhomogeneities of selectively permeable surface of nanofiltration membranes OPMN-P and OFAM-K. The developed method of calculation allows to identify surface microstructural inhomogeneity of semi-permeable membranes and the contamination coefficient. The obtained data about the microstructural inhomogeneities and the ratio of clogging of the membranes allow for the actual conditions of the factory laboratories to predict and define the term of effective operation of nanofiltration by porous membranes OPMN-P and OFAM-K, which are equipped with roller elements of

a baromembrane and electrobaromembrane plants for concentration and purification of technological solutions and wastewater in the electroplating, chemical and food industries. Implementation of this method is confirmed by developed software package for identification of surface microstructure inhomogeneities of semi-permeable membranes and the contamination coefficient. There is a methodology for automated calculation of the average diameter value of semi-permeable membranes clogging and the contamination coefficient of the porous objects in this paper. The software complex based on the proposed method is developed and allows to determine the microstructural inhomogeneity of the surface of the polymer membranes OPMN-P and OFAM-K No. 2018611402RU. The calculation method is based on the developed program that allows to study the description of the main functions of “imaging processing toolbox”. The use of modern tools to achieve the goal of this work is shown by using the capabilities of the software package Matlab 2017. Practically, the method is implemented on the example of the process of nanofiltration with the using of semi-permeable polymer membranes OPMN-P and OFAM-K.

**Keywords:** method; nanofiltration membrane; surface; contamination coefficient; microstructural inhomogeneities.

Эффективность электро-, электробаро- и баромембранных процессов разделения промышленных растворов машиностроительных, химических, биохимических и пищевых производств зависит от морфологии и микроструктурных характеристик поверхности (активного) слоя применяемых полупроводниковых мембран, определяющих их селективные и проницаемые свойства, а также влияющих на так называемый эффект обрастаания мембран, что особенно актуально в случае биохимического производства (обработки барды, крахмального молока, пива).

Широко используемые методы исследования поверхностных микроструктурных неоднородностей или шероховатости нанофильтрационных полимерных мембран (силовая и электронная микроскопия и др.) не позволяют автоматизировать процесс расчета неоднородностей селективно-проницаемой поверхности [1 – 19]. Вместе с тем автоматизированный расчет позволяет адекватно определить производительность мембранныго разделения, очистки и концентрирования промышленных растворов и стоков.

Исследование тонких пленок с использованием методов цифровой обработки изображений [20, 21] включает системы компьютерного «зрения» и методы сбора и обработки изображения при помощи специальных программных продуктов. Это дает возможность одновременно измерять большие неравномерности поверхности структуры в нескольких точках мембраны и тем самым получать более объективную картину изучаемой структуры по сравнению со сканирующими методами [22].

Программы для обработки изображений поверхности (Image Expert Pro 3, Image Expert Sample 2 и др.), как правило, предназначены для анализа металлических, графитовых включений, зернистой структуры, определения количества альфа-фазы, микроструктуры сталей [23]. Они имеют существенный недостаток: не представляют возможность работать с новыми образцами

плоских цифровых изображений, выступая лишь как демонстраторы заложенных в них эталонов сравнения.

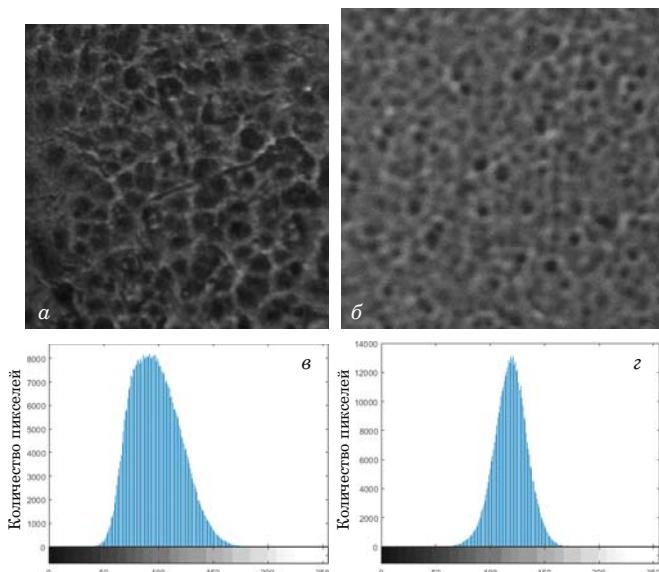
Программы по обработке цифровых изображений композитных полимерных мембран [24, 25] обладают несомненными преимуществами. Это прежде всего адекватность обработки информации по поверхности морфологии объектов ионообменных мембран. Однако специфика подобных программных продуктов заключается в том, что они применимы только для анализа, например, морфологии поверхности ионообменных мембран и определения целевых участков (полиэтилен, армирующая ткань, ионит).

Цель работы — разработка автоматизированного метода определения морфологии микроструктурных неоднородностей селективно-проницаемой поверхности нанофильтрационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К на основе оригинального программного обеспечения [26].

Исследовали полупроницаемые нанофильтрационные композитные полимерные мембранны ОФАМ-К и ОПМН-П, характеристики которых представлены в табл. 1 [27, 28]. Мембранны состояли из поверхности (селективно-проницаемого) слоя и пористой подложки. Изображения объектов, полученные с помощью оптическо-

**Таблица 1.** Рабочие характеристики мембран ОФАМ-К и ОПМН-П

Характеристика	Тип мембранны	
	ОФАМ-К	ОПМН-П
Рабочее давление, МПа	3,0	1,6
Минимальная производительность по воде (при $T = 298$ К), $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент задержания, не менее	0,15 % NaCl 0,95	0,55
Рабочий диапазон, pH	2 – 12	
Максимальная температура, К	323	



**Рис. 1.** Выделенные участки площадью  $100 \times 100$  мкм и гистограммы распределения цвета изображений нанофильтрационных мембран ОПМН-П (*α, γ*) и ОФАМ-К (*β, δ*)

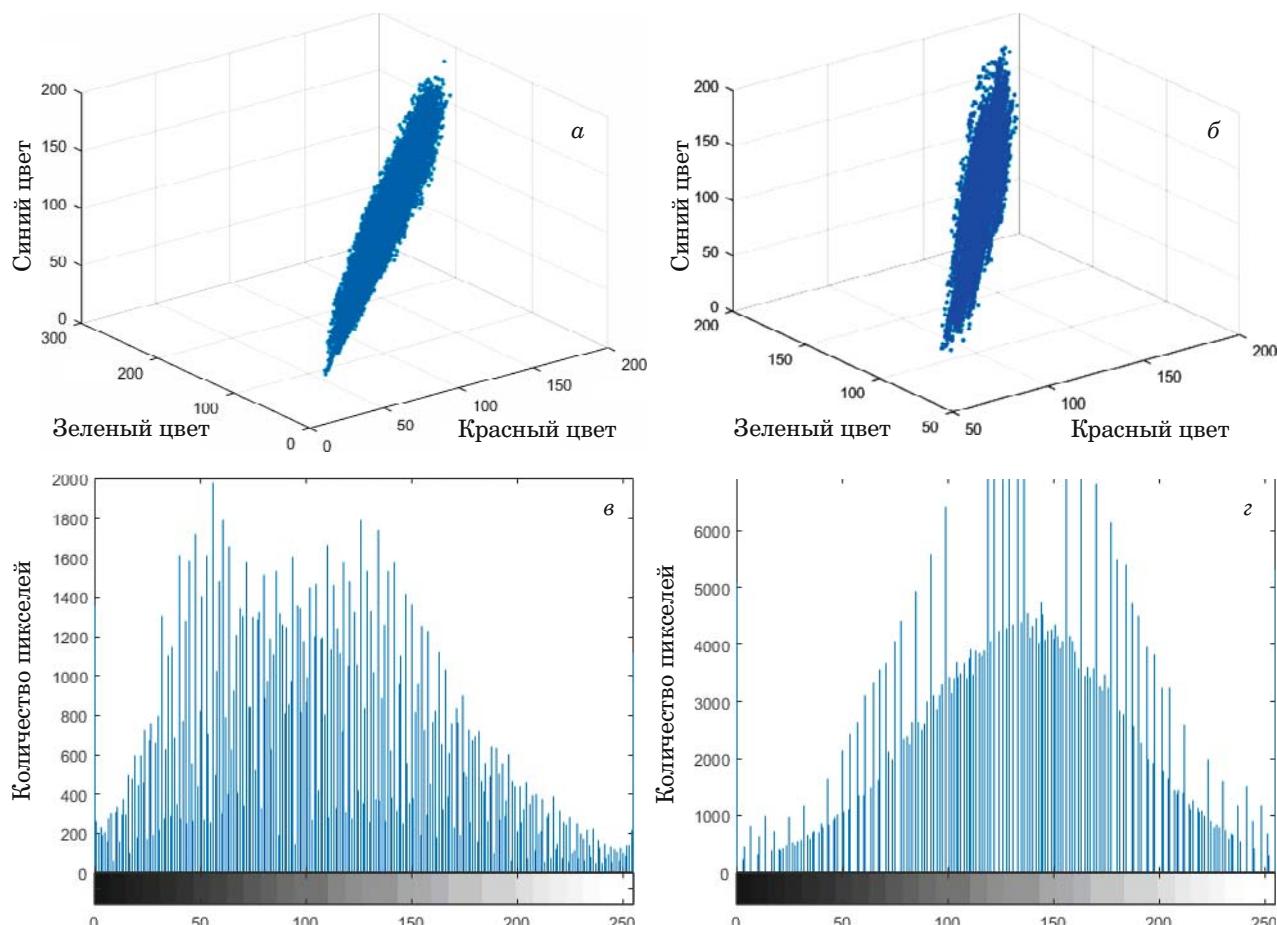
го микроскопа Axio Observer Z1 (ФРГ), фиксировали с использованием программы Axiovision.

Выделенные участки площадью  $100 \times 100$  мкм обрабатывали в Matlab 2017. В итоге получали такие параметры, как средний диаметр засоренности (микроструктурной неоднородности) и коэффициент засоренности. Погрешность определения рассчитывали стандартными методами математической статистики. Для повышения контрастности изображения строили гистограммы распределения цвета: от 0 (черный фон) до 256 (белый).

На рис. 1 приведены выделенные участки и гистограммы распределения цвета изображений мембран ОПМН-П и ОФАМ-К. Видно, что наибольшее сосредоточение цветового распределения наблюдается в районе 90 (ОПМН-П) и 120 (ОФАМ-К).

На рис. 2 представлены графики видимых цветов — каналов RGB и гистограммы распределения яркости после коррекции контраста изображений. Видно, что точки в основном располагаются примерно в одной плоскости, что говорит о достоверности полученных экспериментальных данных.

Далее определяли порог яркости изображения при помощи Otsu's method (функция Level,



**Рис. 2.** Трехмерные точечные графики видимых цветов и гистограммы распределения яркости после коррекции контраста для мембран ОПМН-П (*α, γ*) и ОФАМ-К (*β, δ*)

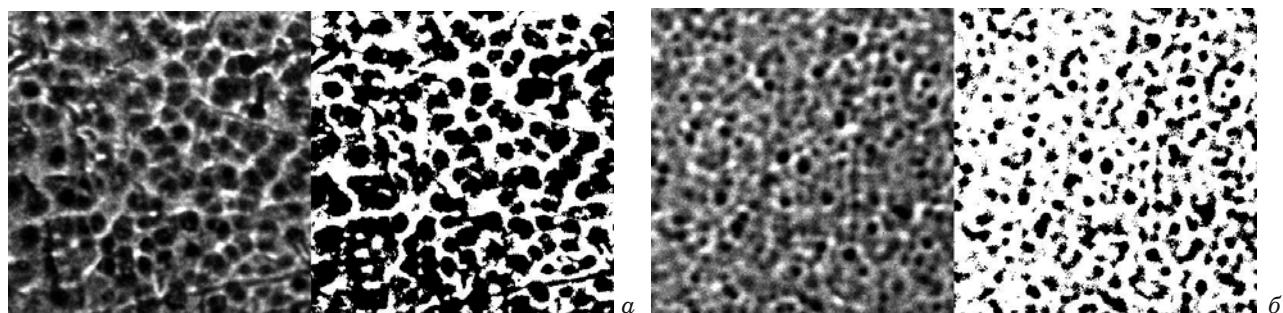


Рис. 3. Черно-белое (справа) и бинарное (слева) изображения мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б)

Matlab 2017). Значение оптимального порога важно, так как из-за неправильности его выбора на выходе можно получить полностью некорректные данные.

Затем черно-белое изображение переводили в бинарное, используя отсечение по порогу яркости (рис. 3). Полученные изображения сравнивали. Поскольку на практике значение порога не всегда получается истинным из-за свойств яркости или шумов, в случае недостаточно контрастного изображения его значение принимали с точностью до второй значащей цифры после запятой.

Для разделения изображения на RGB-цвета (красный, зеленый и синий), что позволяет при последующем наложении их друг на друга получать более точное бинарное изображение, использовали фильтры. На рис. 4 приведены обработанные отдельные изображения по цветам и их сумма для мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б).

Далее суммарные изображения переводили в черный фон (Matlab 2017). При этом микроструктурные неоднородности проявлялись в виде белых включений. По бинарному изображению определяли площади неоднородностей. Гистограммы распределения площадей строили с определенным шагом в зависимости от количества полученных данных (рис. 5).

Для оценки погрешности и надежности определения количественных характеристик морфологии поверхности анализировали три-четыре оптических изображения, полученных для различных участков поверхности исследуемой мембранны. Процедуру обработки каждого изображения повторяли восемь – десять раз [30].

Коэффициент засоренности  $k$ , влияющий на прогноз и определяющий срок эффективной работы мембран, элементов и установок при баромембранным и электробаромембранным разделении, концентрировании и очистке промышленных растворов и стоков, рассчитывали с исполь-



Рис. 4. Обработанные отдельные изображения по цветам и их сумма для мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б)

зованием разработанного программного обеспечения [26] по формуле

$$k = \sum S_{\text{неодн}} / \sum S_n, \quad (1)$$

где  $S_{\text{неодн}}$ ,  $S_n$  — площади неоднородности и исследуемого изображения,  $\text{мкм}^2$ .

Средний диаметр микроструктурной неоднородности определяли как

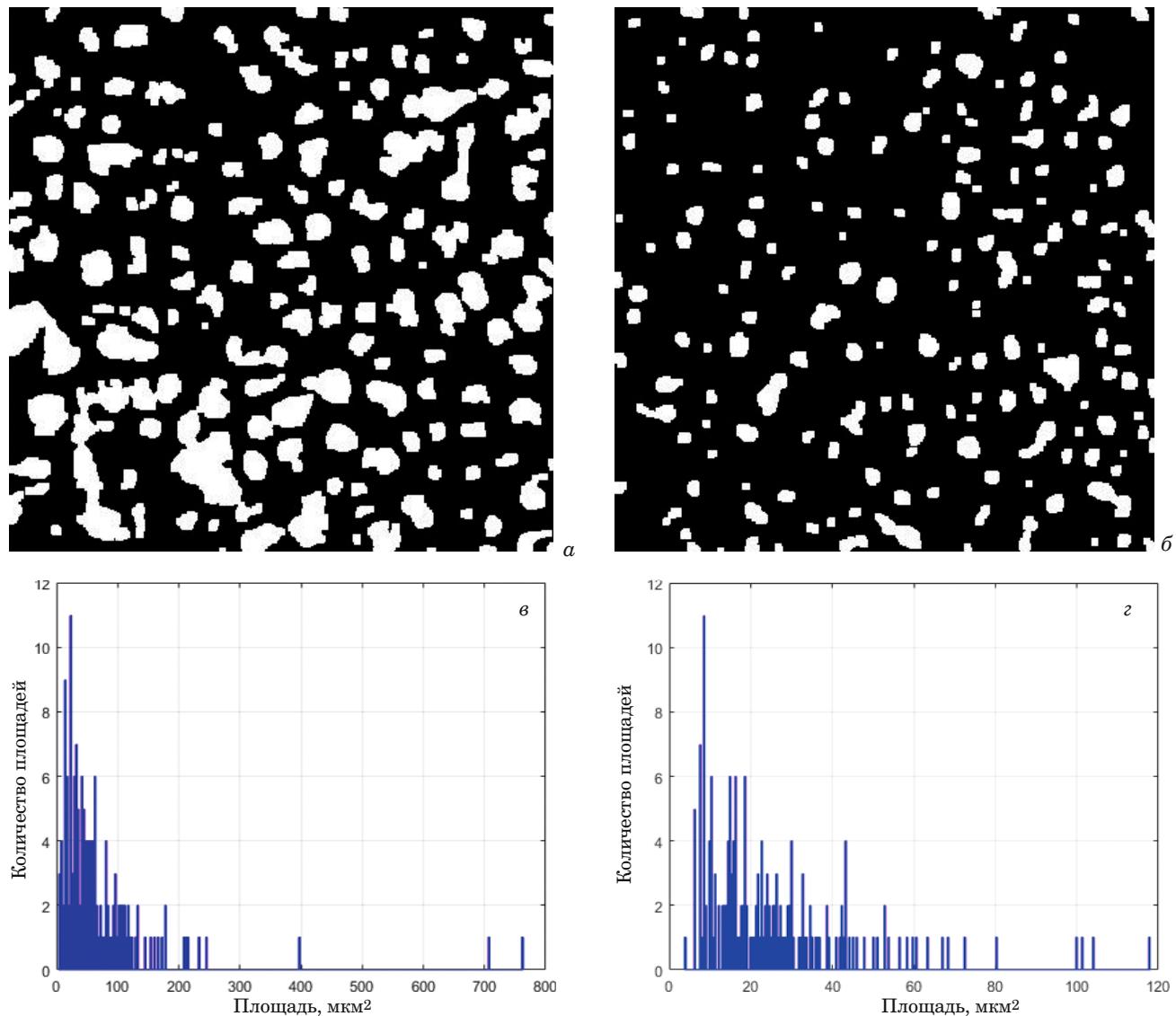
$$D_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{ср}}}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{ср}}$  — полученная в результате обработки изображений средняя площадь микроструктурных неоднородностей,  $\text{мкм}^2$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Видно, что коэффициент засоренности, средние площадь и диаметр микроструктурных неоднородностей

Таблица 2. Результаты расчетов для нанофильтрационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К

Тип мембраны	ОПМН-П	ОФАМ-К
Количество объектов	$149 \pm 12$	$177 \pm 15$
$S_{\text{ср}}, \text{мкм}^2$	$73,76 \pm 3,2$	$25,9 \pm 2,8$
$D_{\text{ср}}, \text{мкм}$	$9,7 \pm 1,3$	$5,7 \pm 0,8$
Коэффициент засоренности	$0,269 \pm 0,018$	$0,112 \pm 0,013$



**Рис. 5.** Морфологически обработанные изображения и гистограммы распределения площадей неоднородностей для мембран ОПМН-П (*а, б*) и ОФАМ-К (*в, г*)

родностей выше для мембранны ОПМН-П. Это может свидетельствовать о том, что она в отличие от ОФАМ-К (относительно гладкой) более рельефна, хотя имеет меньшее количество идентифицированных объектов при определении морфологии поверхности (149 против 177).

Удовлетворительные показатели по задерживающей способности (ОФАМ-К) при обработке растворов биохимических производств, возможно, связаны с силой сцепления растворенных веществ, белков, полисахаридов с поверхностью мембранны (с микроструктурными неоднородностями), так как поток раствора, подаваемый на разделение, циркулирует в межмембранных каналах аппарата в тангенциальном (параллельно поверхности мембранны) режиме.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет автоматизированно рассчитывать количест-

во микроструктурных неоднородностей поверхности, их средние площадь и диаметр и коэффициент засоренности мембранны. Метод сочетает оптико-микроскопические исследования и программную обработку изображений, которая дает возможность получать достоверные и воспроизводимые данные по анализу морфологии поверхности нанофильтрационных мембранны типа ОПМН-П и ОФАМ-К. Сравнение разработанного метода автоматизированного определения морфологии селективно-проницаемой поверхности с перспективными системами автоматизированной идентификации поверхностной структуры ионообменных мембранны, металлических электродов, других поверхностей показало, что использование последних не учитывает специфику пористой поверхности и не все они имеют эталоны сравнения для ОПМН-П и ОФАМ-К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sazanova T. S., Vorotyntseva I. V., Kulikova V. B., Davletbaeva I. M. An atomic force microscopy study of hybrid polymeric membranes: surface topographical analysis and estimation of pore size distribution / Petroleum Chem. 2016. Vol. 56. N 5. P. 427 – 435.
2. Hiesgen R., Helmly S., Galm I., Morawietz T., Handl M., Friedrich K. Microscopic analysis of current and mechanical properties of nafion studied by atomic force microscopy / Membranes. 2012. Vol. 2. N 4. P. 783 – 803.
3. Киселев Д. А., Силибин М. В., Солнышкин А. В., Сыса А. В., Бдикин И. К. Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства композита сополимера поли(винилиденфторид-трифтоэтилена) с углеродными нанотрубками / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 2. С. 34 – 37.
4. Васильева В. И., Заболоцкий В. И., Зайченко Н. А., Гречкина М. В., Ботова Т. С., Агапов Б. Л. Микроскопический анализ морфологии поверхности ионообменных мембран / Вестник Воронежского государственного университета. 2007. № 2. С. 7 – 16.
5. Vasileva V. I., Kranina N. A., Malykhin M. D., Akberova E. M., Zhiltsova A. V. The surface inhomogeneity of ion-exchange membranes by SEM and AFM data / J. Surface Invest. X-ray Synchrotron Neutron Techn. 2013. Vol. 7. N 1. P. 144 – 153.
6. Fang Y., Duranceau S. Article study of the effect of nanoparticles and surface morphology on reverse osmosis and nanofiltration membrane productivity / Membranes. 2013. Vol. 3. P. 196 – 225.
7. Kumar S., Nandi B., Guria C., Mandal A. Oil removal from produced water by ultrafiltration using polysulfone membrane / Braz. J. Chem. Eng. 2017. Vol. 34. N 2. P. 583 – 596.
8. Karagündüz A., Dizge N. Investigation of membrane biofouling in cross-flow ultrafiltration of biological suspension / J. Membr. Sci. Technol. 2013. Vol. 3. N 1. P. 1 – 5.
9. Agboola O., Maree J., Mbaya R. Characterization and performance of nanofiltration membranes / Environmental chemistry letters. 2014. Vol. 12. N 2. P. 241 – 255.
10. Venkata Z., Murthy P., Choudhary A. Separation and estimation of nanofiltration membrane transport parameters for cerium and neodymium / Rare metals. 2012. Vol. 31. N 5. P. 500 – 506.
11. Sanaei P., Cummings L. Flow and fouling in membrane filters: effects of membrane morphology / J. Fluid Mech. 2017. Vol. 818. N 10. P. 744 – 771.
12. Ситникова В. Е. Спектроскопическое изучение структуры полимерных дисперсных систем: автореф. дис. ... канд. хим. наук. — Тверь, 2015. — 24 с.
13. Калинин В. В., Филиппов А. Н., Ханукаева Д. Ю. Исследование морфологии мембран методами атомно-силовой микроскопии при математическом моделировании диффузионных процессов / Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. Автоматизация, моделирование и энергообеспечение. 2012. № 1(266). С. 129 – 136.
14. Котов В. В., Гречкина М. В., Перегончая О. В., Зяблов А. Н. Состояние поверхности анионообменных мембран МА-40 и МА-41, сорбировавших пектин / Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 1. С. 118 – 122.
15. Зайченко Н. А., Васильева В. И., Григорчук О. В., Зяблов А. Н., Гречкина М. В. Оценка поверхностной пористости катионообменных мембран методом атомно-силовой микроскопии / Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 5. С. 745 – 749.
16. Powell L., Hilal N., Wright C. Atomic force microscopy study of the biofouling and mechanical properties of virgin and industrially fouled reverse osmosis membranes / Desalination. 2017. Vol. 404. P. 313 – 321.
17. Johnson D., Hilal N. Characterisation and quantification of membrane surface properties using atomic force microscopy: a comprehensive review / Desalination. 2015. Vol. 356. P. 149 – 164.
18. Elhadidy A., Peldszus S., Van Dyke M. Development of a pore construction data analysis technique for investigating pore size distribution of ultrafiltration membranes by atomic force microscopy / J. Membrane Sci. 2013. Vol. 429. P. 373 – 383.
19. Stawikowska J., Livingston A. Assessment of atomic force microscopy for characterisation of nanofiltration membranes / J. Membrane Sci. 2013. Vol. 425 – 426. P. 58 – 70.
20. Чернякова К. В., Брублевский И. А., Аль-Камали М. Ф. С. Х. Цифровая обработка и анализ 2D изображений пленок нанотрубчатого оксида титана с использованием ImageJ / Телекоммуникации: сети и технологии, алгоритмическое кодирование и безопасность данных: материалы международного научно-технического семинара. — Минск: БГУ ИР, 2015. С. 86 – 90.
21. Копачев Е. С., Ноздрачев С. А., Петрушин В. Н., Рудяк Ю. В., Рытков Г. О., Назаров В. Г. Комплексный метод характеризации изображений поверхностей полимерных композиционных материалов / Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 6. С. 98 – 110.
22. Jurjo D., Magluta C., Roitman N., Gonçalves P. Analysis of the structural behavior of a membrane using digital image processing / Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 54 – 55. P. 394 – 404.
23. <http://www.modifier.ru/ad/nexsys.html> (дата обращения: 04.05.2018).
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610185. Оценка площади ионопроводящих участков поверхности гетерогенных ионообменных мембран / Сирота Е. А., Кранина Н. А., Васильева В. И.; правообладатель ВГУ; зарегистрировано в ФИПС 10.01.2012. Бюл. № 1.
25. Сирота Е. А., Кранина Н. А., Васильева В. И., Малыхин М. Д., Селеменев В. Ф. Разработка и экспериментальная апробация программного комплекса для определения доли ионопроводящей поверхности мембран по данным растровой электронной микроскопии / Вестник ВГУ. 2011. № 2. С. 53 – 59.
26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611402. Расчет параметров морфологии поверхности нанофильтрационных мембран / Лазарев С. И., Рыжкин В. Ю., Ковалева О. А., Головин Ю. М., Холодилин В. Н.; правообладатель ТГТУ; зарегистрировано в ФИПС 01.02.2018. Бюл. № 2.
27. Мембранные, фильтрующие элементы, мембранные технологии. Каталог. — Владимир: НТЦ «Владипор», 2004. — 22 с.
28. Бонн А. И., Дзюбенко В. Г., Шишова И. И. О некоторых процессах создания асимметричных и композитных обратносмотических мембран / Высокомолекулярные соединения. 1993. Т. 35. № 7. С. 922 – 932.
29. Васильева В. И., Акберова Э. М., Жильцова А. В., Черных Е. И., Сирота Е. А., Агапов Б. Л. РЭМ-диагностика поверхности гетерогенных ионообменных мембран МК-40 и МА-40 в набухшем состоянии после температурного воздействия / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 9. С. 27 – 34.
30. Kovaleva O. A., Kovalev S. V. Separation of molasses distillery slop on UFM-50, UPM-50M, OPMN-P, and OFAM-K porous membranes / Petroleum Chemistry. 2017. Vol. 57. N 6. P. 542 – 551.

## REFERENCES

1. Sazanova T. S., Vorotyntseva I. V., Kulikova V. B., Davletbaeva I. M. An atomic force microscopy study of hybrid polymeric membranes: surface topographical analysis and estimation of pore size distribution / Petroleum Chem. 2016. Vol. 56. N 5. P. 427 – 435.
2. Hiesgen R., Helmly S., Galm I., Morawietz T., Handl M., Friedrich K. Microscopic analysis of current and mechanical properties of nafion studied by atomic force microscopy / Membranes. 2012. Vol. 2. N 4. P. 783 – 803.
3. Kiselev D. A., Silibin M. V., Solnyshkin A. V., Sysa A. V., Bdikin I. K. Dielectric and piezoelectric properties of composite copolymer poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) with carbon nanotubes / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 2. P. 34 – 37 [in Russian].

4. Vasilieva V. I., Zabolotsky V. I., Zaichenko N. A., Grechkina M. V., Botovo T. S., Agapov B. L. Microscopic analysis of the surface morphology of ion-exchange membranes / Vestn. VGU. 2007. N 2. P. 7 – 16 [in Russian].
5. Vasileva V. I., Kranina N. A., Malykhin M. D., Akberova E. M., Zhiltsova A. V. The surface inhomogeneity of ion-exchange membranes by SEM and AFM data / J. Surface Invest. X-ray Synchrotron Neutron Techn. 2013. Vol. 7. N 1. P. 144 – 153.
6. Fang Y., Duranceau S. Article study of the effect of nanoparticles and surface morphology on reverse osmosis and nanofiltration membrane productivity / Membranes. 2013. Vol. 3. P. 196 – 225.
7. Kumar S., Nandi B., Guria C., Mandal A. Oil removal from produced water by ultrafiltration using polysulfone membrane / Braz. J. Chem. Eng. 2017. Vol. 34. N 2. P. 583 – 596.
8. Karagündüz A., Dizge N. Investigation of membrane biofouling in cross-flow ultrafiltration of biological suspension / J. Membr. Sci. Technol. 2013. Vol. 3. N 1. P. 1 – 5.
9. Agboola O., Maree J., Mbaya R. Characterization and performance of nanofiltration membranes / Environmental chemistry letters. 2014. Vol. 12. N 2. P. 241 – 255.
10. Venkata Z., Murthy P., Choudhary A. Separation and estimation of nanofiltration membrane transport parameters for cerium and neodymium / Rare metals. 2012. Vol. 31. N 5. P. 500 – 506.
11. Sanaei P., Cummings L. Flow and fouling in membrane filters: effects of membrane morphology / J. Fluid Mech. 2017. Vol. 818. N 10. P. 744 – 771.
12. Sitnikova V. E. Spectroscopic study of the structure of polymer dispersed systems: author's abstract of Candidate's thesis. — Tver, 2015. — 24 p. [in Russian].
13. Kalinin V. V., Filippov A. N., Khanukaeva D. Yu. Investigation of the morphology of membranes using atomic force microscopy in mathematical modeling of diffusion processes / Trudu RDU Nefti Gaza (NIU) im. I. M. Gubkina. Avtomatiz. Modelir. Énergoobesp. 2012. N 1(266). P. 129 – 136 [in Russian].
14. Kotov V. V., Grechkina M. V., Peregonchaya O. V., Zyablov A. N. State of the surface of anion-exchange membranes MA-40 and MA-41 sorbed pectin / Sorbts. Khromatogr. Prots. 2016. Vol. 16. N 1. P. 118 – 122 [in Russian].
15. Zaichenko N. A., Vasilyeva V. I., Grigorchuk O. V., Zyablov A. N., Grechkina M. V. Estimation of the surface porosity of cation-exchange membranes by atomic force microscopy / Sorbts. Khromatogr. Prots. 2010. Vol. 10. N 5. P. 745 – 749 [in Russian].
16. Powell L., Hilal N., Wright C. Atomic force microscopy study of the biofouling and mechanical properties of virgin and industrially fouled reverse osmosis membranes / Desalination. 2017. Vol. 404. P. 313 – 321.
17. Johnson D., Hilal N. Characterisation and quantification of membrane surface properties using atomic force microscopy: à comprehensive review / Desalination. 2015. Vol. 356. P. 149 – 164.
18. Elhadidy A., Peldszus S., Van Dyke M. Development of a pore construction data analysis technique for investigating pore size distribution of ultrafiltration membranes by atomic force microscopy / J. Membrane Sci. 2013. Vol. 429. P. 373 – 383.
19. Stawikowska J., Livingston A. Assessment of atomic force microscopy for characterisation of nanofiltration membranes / J. Membrane Sci. 2013. Vol. 425 – 426. P. 58 – 70.
20. Chernyakova K. V., Vrublevskiy I. A., Al-Kamali M. F. S. Kh. Digital processing and analysis of 2D images of nanotubular titanium oxide films using ImageJ / Telecommunications: networks and technologies, algebraic coding and data security: materials of an international scientific and technical seminar. — Minsk: BSUIR, 2015. P. 86 – 90 [in Russian].
21. Kopachev E. S., Nozdrachev S. A., Petrushin V. N., Rudyak Yu. V., Rytikov G. O., Nazarov V. G. A complex technique of surface image characterization for polymer composites / Fiz. Mezomekh. 2015. Vol. 18. N 6. P. 98 – 110 [in Russian].
22. Jurjo D., Magluta C., Roitman N., Gonçalves P. Analysis of the structural behavior of a membrane using digital image processing / Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 54 – 55. P. 394 – 404.
23. <http://www.modicator.ru/ad/nexsys.html> (accessed 04.05.2018) [in Russian].
24. Computer Program State Registration Certificate 2012610185. Estimation of the area of ion-conducting surface sections of heterogeneous ion-exchange membranes / Sirota E. A., Kranina N. A., Vasilyeva V. I.; owner VGU; registered with FIPS 10.01.2012. Byull. N 1 [in Russian].
25. Sirota E. A., Kranina N. A., Vasilyeva V. I., Malykhin M. D., Selemenev V. F. Development and experimental approbation of software for determining the fraction of the ion-conducting surface of membranes from scanning electron microscopy / Vestnik VGU. 2011. N 2. P. 53 – 59 [in Russian].
26. Computer Program State Registration Certificate 2018611402. Calculation of surface morphology parameters of nanofiltration membranes. / Lazarev S. I., Ryzhkin V. Yu., Kovaleva O. A., Golovin Yu. M., Kholodilin V. N.; owner TSTU; registered with FIPS 01.02.2018. Byull. N 2 [in Russian].
27. Membranes, filter elements, membrane technologies. Catalog. — Vladimir: NTTs "Vladipor", 2004. — 22 p. [in Russian]
28. Bon A. I., Dzyubenko V. G., Shishova I. I. Asymmetric composite reverse osmosis membranes / Vysokomol. Soed. 1993. Vol. 35. N 7. P. 922 – 932 [in Russian].
29. Vasileva V. I., Akberova E. M., Zhiltsova A. V., Chernykh E. I., Sirota E. A., Agapov B. L. SEM diagnostics of the surface of MK-40 and MA-40 heterogeneous ion-exchange membranes in the swollen state after thermal treatment / Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7. N 5. P. 833 – 840.
30. Kovaleva O. A., Kovalev S. V. Separation of molasses distillery slop on UFM-50, UPM-50M, OPMN-P, and OFAM-K porous membranes / Petroleum Chemistry. 2017. Vol. 57. N 6. P. 542 – 551.