



УДК 66.081.6

## Опτικο-микроскопические исследования сорбционной поверхности наночильтрационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К

Лазарев С.И., Ковалева О.А., Головин Ю.М., Рыжкин В.Ю.

*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов*

Поступила в редакцию 7.07.2017 г.

В работе представлен анализ литературных данных по исследованию морфологии поверхности пористых полупроницаемых мембран. Сформулирована цель работы, заключающаяся в оптико-микроскопическом исследовании микроструктурных неоднородностей поверхности наночильтрационных мембран. На основе литературного обзора изучаемой области и сформулированной цели проведен выбор исследуемых типов мембран ОПМН-П, ОФАМ-К, представлены их основные рабочие характеристики (давление, минимальная производительность, коэффициент задержания, рабочий диапазон рН, максимальная температура). Рассмотрена методика оптико-микроскопического исследования микроструктурных неоднородностей поверхности выбранных типов мембран, которая включала: оптическое исследование с фиксацией фотографий изображений, экспорт данных в САП AutoCad 2016 и выбор трех квадратных зон по 10000 мкм<sup>2</sup> каждая, описание диаметральными размерами затемненных микроструктурных неоднородностей на активном слое мембран, извлечение данных при использовании стандартной функции AutoCad 2016 и осуществление трехтабличной выборки, расчет площадей затемненной и чистой поверхности, коэффициента засоренности, анализ полученных данных при использовании пакета Microsoft Excel 2010, построение гистограмм (определение размаха, разбиение полученного диапазона выборки на несколько интервалов, определение ширины интервала), определение основных параметров (в анализе данных) Excel (среднего диаметра, микроструктурных неоднородностей, стандартной ошибки расчетов, стандартного отклонения и асимметричности), построение функции нормального распределения диаметров микроструктурных неоднородностей мембран. Проведено обсуждение результатов по характеристике основных параметров микроструктурных неоднородностей мембран, опирающихся на обработку эксперимента методами математической статистики и литературные данные, выявлена следующая закономерность, что образец мембраны ОФАМ-К имеет более гладкую структуру по сравнению с более рельефной ОПМН-П, что, вероятно, сказывается на обрастании поверхности мембран. По работе в целом представлено обобщающее заключение, показывающее, что метод оптической микроскопии в совокупности с применением системы автоматизированного проектирования AutoCad 2016 и стандартных средств Microsoft Excel 2010, позволяет исследовать с хорошей точностью микроструктурную неоднородность исходных образцов наночильтрационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К.

**Ключевые слова:** диаметр микроструктурных неоднородностей, оптико-микроскопическое исследование, функция нормального распределения, методика, гистограмма.

## Optical microscopy study of the sorption surface of nanofiltration membranes OPMN-P and OFAM-K

Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Golovin Yu.M., Ryzhkin V.Yu.

*Tambov state technical University, Tambov*

Literature review of research data of surface morphology of porous semipermeable membranes is presented in this article. The main goal of this work is optical and microscopy research of microstructural heterogeneities of nanofiltration membranes surface. Types of researched membranes (OFAM-K and OPMN-

P) are chosen and this choice is based on literature review and main goal of research. Also main parameters (pressure, minimal productivity, selectivity, work range of pH, maximal temperature) of this membranes are presented in this paper. Besides it, the method of optical microscopy research of microstructural heterogeneities of membranes surface, which were choosed, is reviewed. This method includes several stages: optical research with fixating of images, data export to AutoCAD 16 and choice of three square zones with size  $10000 \mu\text{m}^2$ , description of dark microstructural heterogeneities on the active layer of membranes by diameter sizes, data extract by using standard AutoCad 2016 functions and the implementation of a three-table sample, calculation of the square of dark and clear surfaces, contamination coefficient, analysis of received data by using Microsoft Excel 2010, histograms creating (scope determination, splitting the received range of the sample to several intervals, determination of the interval width), the definition of key parameters (in data analysis) Excel (average diameter, microstructural heterogeneities, the standard error calculation, standard deviation and skewness), creating of the function of normal diameters distribution of the microstructural heterogeneities of the membranes. In addition, a discussion of the results about the characterization of the main parameters of microstructural inhomogeneity of the membranes, based on the processing of the experiment, methods of mathematical statistics and literature data, has been carried out in this work. The regularity has been revealed, that sample membrane OFAM-K has a smoother texture compared to the more relief texture of OPMN-P, that probably affects the fouling of the membrane surface. In conclusion it is possible to say that the method of optical microscopy in conjunction with the using of AutoCAD 2016 and Microsoft Excel 2010 allows to explore with good accuracy the microstructural heterogeneity of the original samples of nanofiltration membranes OFAM-K and OPMN-P.

**Keywords:** diameter microstructural in homogeneities, the optical-microscopic examination, the function of the normal distribution, methods, histogram.

## Введение

В течение последнего десятилетия для промышленных предприятий РФ и других государств, которые используют в различных отраслях промышленности мембранные процессы разделения растворов, существует актуальная задача, связанная с применением мембран, обладающих хорошими показателями по задерживающей способности, потоку, стабильной производительности во времени [1]. She Q. и соавторы [2] констатируют, что обрастание зависит от механизма и факторов его обуславливающих, например, на процессы обратного осмоса и нанофильтрации, влияют гидродинамические условия, состав разделяемой жидкости, мембранный материал и его свойства, а также механизм возникновения концентрационной поляризации. Jainesh H. Jhaveri. и Z.V.P. Murthy. указывают на то, что непосредственным ограничением для более широкого использования мембранных методов разделения является эффект обрастания. В работе [3] процесс обрастания мембран авторы связывают с явлением осаждения или адсорбции коллоидов, частиц, биомолекул и макромолекул (например, белков, полисахаридов), солей на поверхности и / или внутри пор и стенок пор в процессе разделения растворов. В работе [4] показано, влияние ионной имплантации на структуру и свойства полимерных материалов. Karolina Kotra-Konicka и соавторами отмечается, что для проведения данного процесса необходимо контролировать многие физические и химические процессы, происходящие при ионной бомбардировке мембран, которые вызывают химическую модификацию мембран, приводящих к снижению гидрофобности и появлению повышенной адсорбционной способности обрабатываемой поверхности. Проведенные Meitian Liu и соавторами исследования показали, что процесс образования отложений на мембране, при обработке суспензией содержащей  $\text{CaCO}_3$ , зависит от способности к регенерации материала путем обратной промывки. На основе проведенных Meitian Liu, Changfa Xiao, Xiaoyu Hu исследований была дополнена эмпирическая формула, оценивающая механизм обрастания мембран, которая улучшала точность описания процесса микрофильтрационного разделения раствора с применением полиуретановой мембраны [5]. Анализ работ [1-5] показывает, что получение приемлемых про-ницаемых и задерживаемых коэффициентов решается при использовании новых мо-

дификаций полимерных мембран, но при этом совершенно неизученным на основе литературы, остается исследование микроструктурных неоднородностей поверхности нанопористых мембран (при большой выборке экспериментальных данных).

### Теоретическая часть

Представленная актуальность находится в непосредственной связи со способностью пористых мембран обладать малым эффектом обрастания (то есть предотвращением нежелательных отложений коллоидных частиц и растворенных ионов на поверхности мембраны, в том числе, и из-за уменьшения количества микроструктурных неоднородностей). Поэтому целью работы явились оптико-микроскопические исследования микроструктурных неоднородностей поверхности нанопористых мембран ОПМН-П, ОФМН-К.

Изучение поверхностной структуры, как правило, проводится методами силовой микроскопии, что выявлено на основе проведенного литературного анализа. Использование методов силовой микроскопии позволяет анализировать пористую структуру и распределение пор по поверхности выбранных для изучения образцов мембран [6-21]. Но исследования морфологически размерных областей поверхностной структуры мембраны (микроструктурных неоднородностей) нами не были выявлены в литературе (при большой выборке экспериментальных данных).

Изучение этого параметра является неотъемлемой частью исследования процесса обрастания мембран при разделении растворов, содержащих белки, дрожжи, сахарозу и полисахариды.

Для объяснения разработанного оптико-микроскопического метода исследования морфологически размерных областей поверхностной структуры мембран (микроструктурных неоднородностей) и им занимаемой ниши предлагается следующая классификация (рис. 1), базирующаяся на имеющихся в литературе данных, при исследовании обрастания.

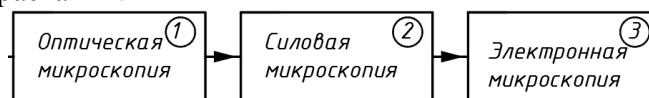


Рис. 1. Классификационная схема методов исследования морфологической поверхностной неоднородности мембран, при исследовании обрастания

Отмечается, что нулевым уровнем являются визуальные исследования, которые фиксируют образования отложений на поверхности мембран, что подтверждается работами [21, 22]. Этот уровень исследования не позволяет увидеть саму микроструктурную неоднородность пористого образца мембраны, что препятствует исследованию особенностей механизма обрастания мембран.

Методы силовой и электронной микроскопии хотя и показывают хорошую разрешающую способность, но не дают возможности оценить большую выборку статистических данных по микроструктурным неоднородностям образца, зато хорошо оценивают пористую структуру на ограниченных участках нм диапазона.

Нами отмечается, что данный подход ни в коей мере не противоречит исследованиям морфологии поверхности образцов мембран методами силовой и электронной микроскопии, а скорее служит как альтернативный метод исследования поверхностной морфологической микроструктуры неоднородностей мембран, доступный более широкому кругу лабораторий.

Применение метода оптической микроскопии, на наш взгляд, связано со сложностью определения большой выборки статистических данных по размерам неоднородностей поверхности образца мембраны, которые для упрощения анализа были описаны диаметральными размерами. В реальных исследованиях, при обработке растворов, содержащих, например, белки и полисахариды, одним из главных факторов является сила трения этих компонентов о поверхность мембраны, их сцепление с мембраной за счет неоднородности поверхности (связанная с адгезией и адсорбцией частиц). Конечно, нами отмечается, что перенос растворителя в процессах микрофилтрования и нанофилтрования под действием давления, является лимитирующим фактором, который отражается на отложениях (обрастании) на мембранах.

## Эксперимент

Объектами оптико-микроскопического исследования поверхностной структуры являлись мембраны ОПМН-П и ОФАМ-К, рабочие характеристики которых представлены в таблице 1 [23].

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

Тип мембраны	Рабочие характеристики мембран				
	Рабочее давление, МПа	Минимальная производительность по воде, при T=298 К, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·с	Коэффициент задержания по 0.15 % NaCl, не менее	Рабочий диапазон pH	Максимальная температура, К
ОФАМ-К	3.0	$2.22 \cdot 10^{-5}$	0.95	2-12	323
ОПМН-П	1.6	$2.77 \cdot 10^{-5}$	0.55		

Мембрана серии ОФАМ-К - обратноосмотическая композитная мембрана среднего давления, состоящая из активного слоя, являющегося продуктом поликонденсации ароматического диамина (м-фенилендиамина) и производных ароматических дикарбоновых кислот (изофталевой кислоты) и пористой подложки из полипропилена или тканого лавсана; структура - капиллярно-пальчиковая. Мембрана ОПМН-П - нанофилтрационная композитная полимерная пористая пленка, состоящая из селективного слоя на полиамидной основе и пористой подложки из нетканого полипропилена; структура – вакуольная с губчатой прослойкой [22, 23]. Выбор в качестве объектов исследования пористых мембран обеспечен хорошими показателями удельного потока, задерживающей способности по различным ионам, белкам на этих перегородках при обработке биологических растворов (барда, бражка, сахарных растворов и др.), вызывающих их обрастание.

Методика оптико-микроскопического исследования. Заранее выбранные для исследования сухие образцы мембран ОПМН-П и ОФАМ-К подвергались оптическому исследованию (визуализации поверхности с помощью оптического микроскопа Axio Observer Z1 (Производитель Carl Zeiss)) с 200 кратным увеличением, проводилась процедура фиксации изображения с помощью программы анализа изображений Axiovision и протастовка масштаба, рис. 2.

Проводилась процедура экспорта данных оптико-микроскопических фотографий в систему автоматизированного проектирования AutoCad 2016. На полученных фотографиях поверхности мембран визуально выбирались три равномерные зоны (без существенных геометрических отклонений). На каждой мембране площадь выбранных равномерных зон (квадратных элементов) составляла по 10000 мкм<sup>2</sup> каждая, причем масштаб выбранных областей строго соответствовал масштабу фотографий, полученных на этапе ранее.

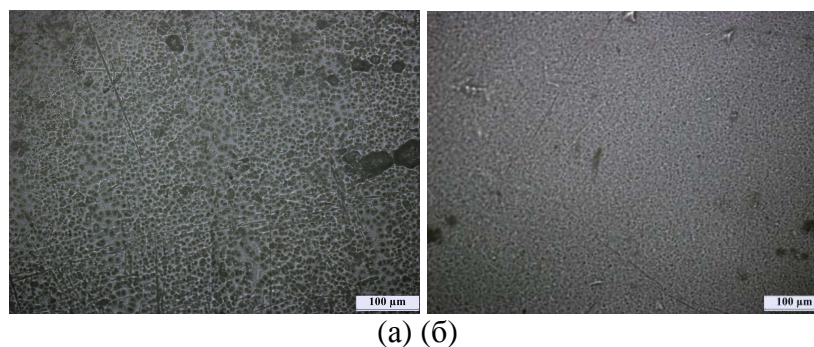


Рис. 2. Оптико-микроскопические фотографии образцов нанофильтрационных мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б)

В полученных квадратных областях исследуемой площади (рис. 3), описывались диаметральными размерами (окружностями) затемнения, характерные для микроструктурных неоднородностей. При помощи системы автоматизированного проектирования AutoCad 2016 с высокой точностью определялись микроструктурные диаметральные размеры на активном слое мембраны.

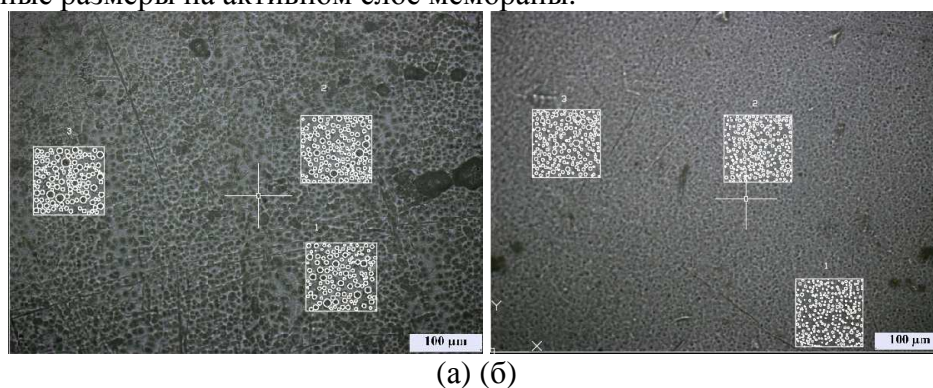


Рис. 3. Оптико-микроскопические фотографии образцов нанофильтрационных мембран с тремя равномерными зонами для ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б)

При использовании стандартной функции AutoCad 2016 «извлечение данных» извлекались основные параметры (диаметр, площадь каждого элемента) для всех трех квадратных областей выборок. Применение функции извлечения данных позволяло осуществлять тройную выборку данных для каждой мембраны, по которой составлялась трехтабличная выборка.

Для расчета площади чистой поверхности трех квадратных областей-выборок проводилось суммирование площадей каждой из трех выборок, а затем вычитание их из общей области выборки. Далее находился коэффициент засоренности по отношению:

$$K = S_3 / S_4, \quad (1)$$

Полученные результаты характеристик заносились в таблицу 2.

Таблица 2. Расчетные площади мембран ОПМН-П и ОФАМ-К.

Тип мембраны	Площадь затемненной поверхности - $S_3$ , мкм <sup>2</sup>	Площадь чистой поверхности $S_4$ , мкм <sup>2</sup>	Коэффициент засоренности
ОПМН-П	3065	6935	0.44
ОФАМ-К	1840	8159	0.22

Для анализа полученных данных использовался пакет Microsoft Excel 2010. При помощи функции описательной статистики программой рассчитывались пара-

метры среднеквадратичного отклонения и среднего диаметра. Полученные результаты заносились в таблицу 3.

Таблица 3. Средний диаметр микроструктурных неоднородностей и отклонение

Тип мембраны	Средний диаметр, $d_{cp}$ , мкм	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma$
ОПМН-П	5.08	1.73
ОФАМ-К	2.91	1.07

Для проведения дальнейших расчетов необходима проверка правильности анализа полученных данных, решаемая при построении гистограмм. Построение гистограмм проводится с применением стандартных настроек Microsoft Excel 2010. При переходе во вкладку «данные» производится вызов функции «анализ данных», с появлением диалогового окна с возможностью выбора различных функций, где выбирается гистограмма. Затем осуществляется автоматизированный выбор диапазона полученных в ходе расчета данных и производится построение гистограммы, рис. 4.

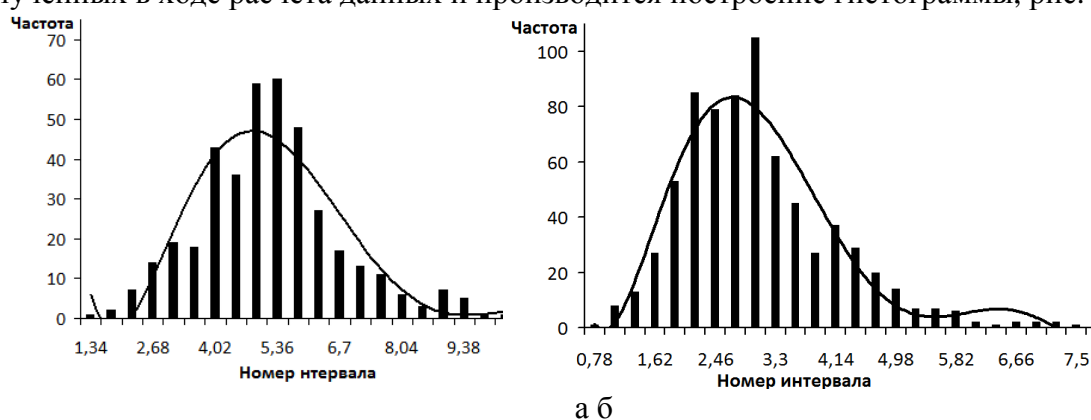


Рис. 4. Гистограммы частоты попадания размера диаметров микроструктурных неоднородностей от номера интервала размеров диаметров микроструктурных неоднородностей мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б).

При автоматизированном расчете ЭВМ самостоятельно выбирается размах (параметр, определяющий ширину гистограммы (определенный разброс полученных величин)), который рассчитывается по формуле (2):

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (2)$$

где  $X_{\max}$  – максимальное значение выборки,  $X_{\min}$  – минимальное значение выборки.

При помощи ЭВМ разбивается полученный диапазон на несколько интервалов, количество которых рассчитывается по зависимости (3):

$$k = \sqrt{n} \pm 2 \quad (3)$$

где  $n$  принимается в зависимости от количества полученных значений диаметров выборки.

При помощи ЭВМ определяется ширина интервала  $h$ , которая находится из выражения (4):

$$h = R/k \quad (4)$$

Для определения значений среднего диаметра микроструктурных неоднородностей мембран, стандартной ошибки расчетов, стандартного отклонения и асимметричности в Excel (в анализе данных) применяется функция «описательная статистика», которая позволяет автоматизированным способом посчитать основные исследуемые параметры, таблица 4.

Далее производится построение функции нормального распределения диаметров микроструктурных неоднородностей мембран при использовании в Excel

функции «НОРМ.РАСП», при подстановке значений среднего диаметра микроструктурных неоднородностей мембран и среднеквадратичного отклонения.

Таблица 4. Основные исследуемые параметры.

Тип мембраны	ОПМН-П	ОФАМ-К
Средний диаметр, мкм	5.08	2.91
Стандартная ошибка	0.09	0.04
Стандартное отклонение	1.73	1.07
Дисперсия выборки	2.98	1.15
Асимметричность	1.13	1.03
Интервал	11.6	7.28

Для мембран ОПМН-П и ОФАМ-К график функции нормального распределения от распределения диаметров микроструктурных неоднородностей мембран выглядит следующим образом, рис. 5 (а и б).

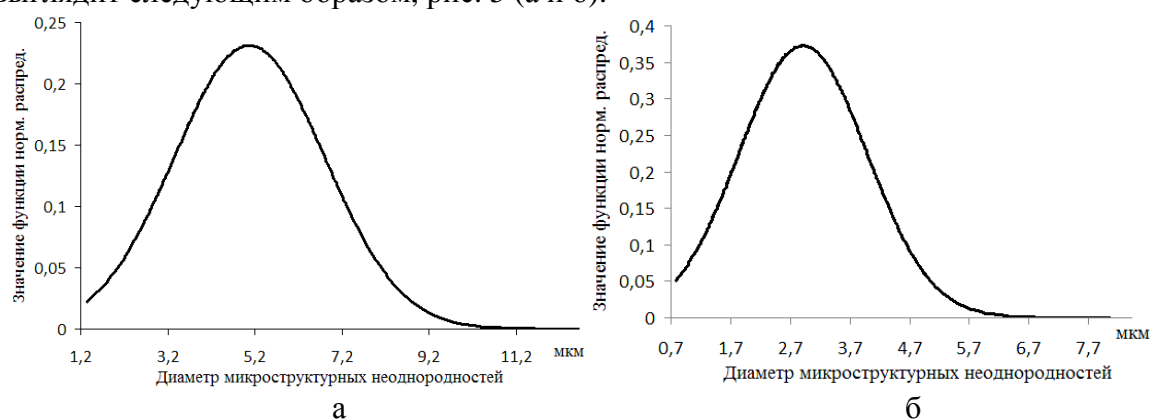


Рис. 5. Функция нормального распределения мембраны ОПМН-П (а), ОФАМ-К (б) от распределения диаметров микроструктурных неоднородностей мембран

### Обсуждение результатов

Анализируя гистограммы частот попадания размеров диаметров микроструктурных неоднородностей от номера интервала его размеров для мембран ОПМН-П (а) и ОФАМ-К (б) (рис. 4), можно отметить, что эти гистограммы можно ошибочно отнести к мультимодальному типу.

При сглаживании (осреднении) пиковых значений частот попадания диаметров микроструктурных неоднородностей линией тренда полиномиального типа 6 порядка отмечается схожесть ее с гистограммой обычного (колоколообразного) типа.

Стоит сразу оговориться, что сглаживание гистограмм, представленных на рис. 4 (а и б) для исследуемых образцов мембран ОПМН-П, ОФАМ-К произведено из-за допущения о том, что микроструктурные неоднородности описываются диаметральными размерами. Это в некоторой степени объясняет наличие пиковых значений частот исследуемых значений, представленных на гистограмме (так называемое наличие доминирующей погрешности (специальной причины)) [24]. Чтобы удостовериться в том, что распределение подчиняется закону Гаусса, необходимо провести проверку гипотезы нормальности распределения. При подтверждении гипотезы о соответствии эмпирического распределения нормальному закону (5), становится возможным исследование воспроизводимости методики, т.е.

определении неизменности основных параметров процесса: среднего арифметического значения и среднего квадратичного отклонения [24, 25].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

где  $\mu$  - центр распределения (среднее значение);  $\sigma$  - разброс распределения (стандартное отклонение)

Функция нормального распределения в аналитической форме для мембраны ОПМН-П (рис. 5 а) и ОФАМ-К (рис. 5 б) рассчитывается по формулам (6), (7):

$$y = \frac{1}{1,73\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-5,08)^2}{2 \cdot 1,73^2}} \quad (6)$$

$$y = \frac{1}{1,07\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-2,91)^2}{2 \cdot 1,07^2}} \quad (7)$$

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что микроструктурные неоднородности наночистратационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К имеют различные диаметры, отличающиеся практически в два раза при сравнении этих мембран, что по нашему мнению, непосредственно сказывается на разделяющей способности исследуемых пористых мембран и, соответственно, на эффекте обрастания.

Результаты, полученные при описании микроструктурных неоднородностей наночистратационных мембран используемых нами методов, и данные, представленные в работе [22], хорошо коррелируются между собой по степени задерживания некоторых ионов (ион аммония, сульфат-ион, фосфат-ион, нитрат-ион, ХПК), например, при разделении биохимических растворов с трансмембранным давлением  $P = 4$  МПа. По нашему мнению, это связано с тем, что образец мембраны ОФАМ-К имеет более гладкую структуру по сравнению с более рельефной ОПМН-П, но это не отменяет и фактор перестройки структуры этих мембран и другие сопутствующие явления (гелеобразование, образование динамической мембраны).

Таким образом, обрастание мембран связано не только с потоком растворителя, пропускаемым через наночистратационные мембраны, но и с влиянием на данное явление также микроструктурной неоднородности поверхности наночистратационных мембран, так как разделяемый раствор подается в тангенциальном (транзитном) режиме, что связано с силой трения жидкости о поверхность микроструктурных неоднородностей с наличием влияния адсорбции белков, обрывков белков, полисахаридов, сахаров и т.д., что частично отмечено в работе [3, 21].

## Заключение

Анализ полученных данных по методике исследования микроструктурных неоднородностей поверхности показывает, что метод оптической микроскопии в совокупности с применением системы автоматизированного проектирования AutoCad 2016 и стандартных средств Microsoft Excel 2010, позволяет исследовать с хорошей точностью микроструктурную неоднородность исходных образцов наночистратационных мембран ОПМН-П и ОФАМ-К. Отмечается, что размерный ряд микроструктурных неоднородностей поверхности мембран ОПМН-П и ОФАМ-К подчиняется закону нормального распределения, для которого найдены аналитические уравнения, которые показывают, что образец мембраны ОФАМ-К имеет более гладкую структуру по сравнению с более рельефной ОПМН-П. Таким образом, обрастание мембран связано не только с потоком, пропускаемым через мембраны, но на данное яв-



ление влияет микроструктурная неоднородность поверхности наночистотационных мембран.

### Список литературы

1. Ulbricht M. // *Polymer*. Vol. 47. I. 7. 2006. pp. 2217-2262.
2. She Q., Wang R., Fane A.G., Tang C.Y. // *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 499. pp. 201-233.
3. Jhaveri J. H., Murthy Z.V.P. // *Desalination*. 2016. Vol. 379. pp. 137-154.
4. Kotra-Konicka K., Kalbarczyk J., Gac J.M. // *Chemical and Process Engineering*. 2016. Vol. 37. I. 3. pp. 331-339.
5. Liu M., Xiao C., Hu X. // *Desalination*. 2012. Vol. 298. pp. 59-66
6. Васильева В.И., Битюцкая Л.А., Зайченко Н.А., Гречкина М.В. и др. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т.8. № 2. С. 260-271.
7. Дьяконова О.В., Соколова С.А., Зяблов А.Н., Жиброва Ю.А. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т. 8. № 5. С. 863-868.
8. Wyart Y., Georges G., Deumie C., Amra C., et al. // *Journal of Membrane Science*. 2008. Vol. 315. pp. 82-92.
9. Калинин В.В., Филиппов А.Н., Ханукаева Д.Ю. // *Труды РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина. Автоматизация, моделирование и энергообеспечение*. 2012. № 1(266). С. 129-136.
10. Котов В.В., Гречкина М.В., Перегончая О.В., Зяблов А.Н. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2016. Т. 16. № 1. С. 118-122.
11. Зайченко Н.А., Васильева В.И., Григорчук О.В., Зяблов А.Н. и др. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2010. Т. 10. № 5. С. 745-749
12. Powell L.C., Hilal N., Wright C.J. // *Desalination*. 2017. Vol. 404. pp. 313-321.
13. Johnson D., Hilal N. // *Desalination*. 2015. Vol. 356. pp. 149-164.
14. Boussu K., Van der Bruggen B., Volodin A., Van Haesendonck C. et al. // *Desalination*. 2006. Vol. 191. pp. 245-253.
15. Vrijenhoek E.M., Hong S., Elimelech M. // *Journal of Membrane Science*. 2001. Vol. 188. pp. 115-128.
16. Boussu K., Van der Bruggen B., Volodin A. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005. Vol. 286. pp. 632-638.
17. Lee H.S., Im S.J., Kim J.H. // *Desalination*. 2008. Vol. 219. pp. 48-56.
18. Xindong L., Lei W., Wanfu H., Juan L., Xiaofeng W. // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2016. Vol. 9 (3) pp. 74-79.
19. Quanfu A. Yanli J., Huanlin C. // *Journal of Membrane Science*. 2011. Vol. 367. No 1-2. pp. 158-165.
20. Gizli N. // *Chemistry & Chemical Technology*. 2011. Vol. 5. No 3. pp. 327-331.
21. Demir I., Koyuncu I., Guclu S., Yildiz S. et al. // *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2015. Article ID 850530. 8 p.
22. Kovaleva O.A., Kovalev S. V. // *Petroleum Chemistry*. 2017. Vol. 57. No 6. pp. 542-551.
23. Бонн А.И., Дзюбенко В.Г., Шишова И.И. // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 1993. Т. 35. № 7. С. 922-932.
24. Солонин И.С. Применение математической статистики в технологии машиностроения / И. С. Солонин. – Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство. 1966. 200 с.
25. Гистограмма и ее использование для анализа технологических процессов [Электронный ресурс]: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: «Квалиметрия и управление качеством» для студентов специальности 200503.65; «Управление качеством» для студентов направлений 221700.62, 222000.62 и специальности 220601.65 / Министерство образования и науки РФ, [сост.: В.Н. Орлов]. - Электрон. текстовые дан. (тип файла: pdf ; размер: 862 Kb). - Курган: Издательство Курганского государственного университета. 2013. 27 с.

### References

1. Ulbricht M., *Polymer*, 2006, Vol. 47, I. 7, pp. 2217-2262.
2. She Q., Wang R., Fane A.G., Tang C.Y., *Journal of Membrane Science*, 2016, Vol. 499, pp. 201-233.
3. Jhaveri J.H., Murthy Z.V.P., *Desalination*, 2016, Vol. 379, pp. 137-154.
4. Kotra-Konicka K., Kalbarczyk J., Gac J.M., *Chemical and Process Engineering*, 2016, Vol. 37, I. 3, pp. 331-339.

5. Liu M., Xiao C., Hu X., *Desalination*, 2012, Vol. 298, pp. 59-66.
6. Vasil'eva V.I., Bitjuckaja L.A., Zajchenko N.A., Grechkina M.V. et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2008, Vol. 8, No. 2, pp. 260-271.
7. D'jakonova O.V., Sokolova S.A., Zjablov A.N., Zhibrova Ju.A., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2008, Vol. 8, No 5, pp. 863-868.
8. Wyart Y., Georges G., Deumie C., Amra C. et al., *Journal of Membrane Science*, 2008, Vol. 315, pp. 82-92.
9. Kalinin V.V., Filippov A.N., Hanukaeva D.Ju., Trudy RGU Nefti i gaza im. I.M. Gubkina. Avtomatizacija, modelirovanie i jenergoobespechenie. 2012. № 1(266). pp. 129-136.
10. Kotov V.V., Grechkina M.V., Peregonchaja O.V., Zjablov A.N., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016, Vol. 16, No1, pp. 118-122.
11. Zajchenko N.A., Vasil'eva V.I., Grigorchuk O.V., Zjablov A.N. et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2010, Vol. 10, No 5, pp. 745-749.
12. Powell L.C., Hilal N., Wright C.J., *Desalination*, 2017, Vol. 404, pp. 313-321.
13. Johnson D., Hilal N., *Desalination*, 2015, Vol. 356, pp. 149-164.
14. Boussu K., Van der Bruggen B., Volodin A., Van Haesendonck C. et al., *Desalination*, 2006, Vol. 191, pp. 245-253.
15. Vrijenhoek E.M., Hong S., Elimelech M., *Journal of Membrane Science*, 2001, Vol. 188, pp. 115-128.
16. Boussu K., Van der Bruggen B., Volodin A., *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, Vol. 286, pp. 632-638.
17. Lee H.S., Im S.J., Kim J.H., *Desalination*, 2008, Vol. 219, pp. 48-56.
18. Xindong L., Lei W., Wanfu H., Juan L. et al., *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2016, Vol. 9 (3), pp. 74-79.
19. Quanfu A. Yanli J., Huanlin C., *Journal of Membrane Science*, 2011, Vol. 367, No 1-2, pp. 158-165.
20. Gizli N., *Chemistry & Chemical Technology*, 2011, Vol. 5, No 3, pp. 327-331.
21. Demir I., Koyuncu I., Guclu S., Yildiz S. et al., *The Scientific World Journal*, 2014, Vol. Article ID 850530. 8 p.
22. Kovaleva O.A., Kovalev S.V., *Petroleum Chemistry*, 2017, Vol. 57, No 6, pp. 542-551.
23. Bonn A.I., Dzjubenko V.G., Shishova I.I., *Vysokomolekuljarnye soedinenija. Serija B*, 1993, Vol. 35, No 7, pp. 922-932.
24. Solonin I.S. Primenenie matematicheskoj statistiki v tehnologii mashinostroenija, Sverdlovsk, Sredne-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo, 1966, 200 p.
25. Gistogramma i ee ispol'zovanie dlja analiza tehnologicheskikh processov [Jelektronnyj resurs]: metodicheskie ukazanija k prakticheskim zanjatijam i samostojatel'noj rabote po disciplinam: «Kvalimetrija i upravlenie kachestvom» dlja studentov special'nosti 200503.65; «Upravlenie kachestvom» dlja studentov napravlenij 221700.62, 222000.62 i special'nosti 220601.65 / Ministerstvo obrazovanija i nauki RF, [sost.: V.N. Orlov]. - Jelektron. tekstovye dan. (tip fajla: pdf ; razmer: 862 Kb). - Kurgan: Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013. 27 p.

**Ковалева Ольга Александровна** – доцент кафедры прикладная геометрия и компьютерная графика, к.т.н., Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

**Лазарев Сергей Иванович** – профессор кафедры прикладная геометрия и компьютерная графика, д.т.н., Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

**Головин Юрий Михайлович** – доцент кафедры физика, к.х.н., Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

**Рыжкин Владимир Юрьевич** - студент, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

**Kovaleva Olga A.** – Associate professor of applied geometry and computer graphics, Ph.D., Tambov State Technical University, Tambov

**Lazarev Sergey I.** – professor of applied geometry and computer graphics, grand Ph.D, Tambov State Technical University, Tambov

**Golovin Yuri M.** – Associate professor of Physics, Ph.D., Tambov State Technical University, Tambov

**Ryzhkin Vladimir Yu.** - Student, Tambov State Technical University, Tambov