

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ МЕМБРАНЫ МГА-95
ПРИ ЕЕ РАЗЛИЧНОМ ФИЗИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ
РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**С. И. Лазарев¹, Ю. М. Головин², Э. Ю. Яновская²,
Д. С. Лазарев¹, К. В. Шестаков¹**

*Кафедры: «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1); «Физика» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; geometry@mail.nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: аморфность; дифрактограмма; кристалличность; мембрана; рентгенодифрактометрический метод.

Аннотация: Представлена методика неразрушающего контроля при рентгенодифрактометрических исследованиях образца полупроницаемой мембраны, не подвергающегося физическому разрушению. Проведены рентгенодифрактометрические исследования аморфных и кристаллических областей воздушно-сухого, водонасыщенного и рабочего образцов полупроницаемой мембраны МГА-95, и выполнена характеристика рентгеновских дифрактограмм в геометрии на отражение. Получены численные значения по размеру аморфных и кристаллических областей.

Современное представление о структуре полупроницаемых мембран характеризуется все большим подходом с позиций исследователей как двухфазной модели, состоящей из аморфных и кристаллических областей. Первой физической моделью, основанной на том, что мембрана состоит из кристаллических и аморфных областей, включающей в себя поровое пространство, через которое осуществляется перенос молекул и ионов в полупроницаемых мембранах, явилась капиллярно-пористая гипотеза. Причем вода и растворенные вещества проникают не через кристаллические области, а проходят через аморфные области [1, 2]. В зависимости от размера аморфных областей полупроницаемых мембран изменяется степень проникновения растворителя и растворенного вещества через мембрану. Дальнейшее развитие эта физическая модель, учитывающая кристалличность и аморфность мембраны, получила в работах [3, 4]. Растворенное вещество переносится в виде гидратированных ионов через поровое пространство аморфных областей мембраны. Однако наличие аморфных областей в мембране основано на теоретических предположениях, но не на экспериментально полученном материале по структурным характеристикам.

Исследование структурных характеристик полупроницаемых мембран с позиций кинетики процесса на основе целлюлозы и ее производных изучалось в работах [5, 6]. Однако проникновения растворителя или растворенного вещества, учитывая специфику строения ацетатцеллюлозных мембран, выполнялись по двум механизмам – молекулярной диффузии через монолитные слои и капиллярного

всасывания каналами или порами полупроницаемой мембраны. Вероятно течение внутрипоровой жидкости обусловлено структурными изменениями полимерной полупроницаемой мембраны.

Цель данной работы – исследования структурных характеристик ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 в воздушно-сухом, водонасыщенном и рабочем состояниях рентгенодифрактометрическим методом.

Объект исследования – ацетатцеллюлозная мембрана МГА-95 в воздушно-сухом и рабочем (водонасыщенном) состояниях (после проведения экспериментальных исследований при обратноосмотическом разделении сульфатосодержащих растворов), представляющая собой полупроницаемую, полупрозрачную белого цвета полимерную пленку на основе ацетатов целлюлозы на подложках, нетканый лавсан. Мембрана МГА-95, имея толщину от 100 до 150 мкм, состояла из активного слоя с толщиной 3 – 5 % толщины мембраны и крупнопористой подложки [7]. Численные величины основных рабочих показателей ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 приведены ниже:

Рабочее давление, МПа	5,0
Удельный поток растворителя (производительность по воде), м ³ /м ² ·с	1,11·10 ⁻⁵
Коэффициент задержания (селективность), по 0,15 % NaCl, не менее	0,95
Рабочий диапазон, рН	3 – 8
Максимальная рабочая температура, °С	50

Рентгенодифрактометрические исследования осуществляли в области углов 2θ от 2 до 40° на дифрактометре Дрон-3 с автоматической записью на ПК в геометрии на «отражение». Использовалось излучение CuK_α (λ = 1,54 Å). Монохроматизация обеспечивалась Ni-фильтром. Полученные дифрактограммы представлены на рис. 1.

Размер аморфных и кристаллических областей рассчитывали по формуле Шеррера [8]

$$L_{\text{кр.ам}} = \lambda \left(\beta \cos \frac{2\theta}{2} \right)^{-1}. \quad (1)$$

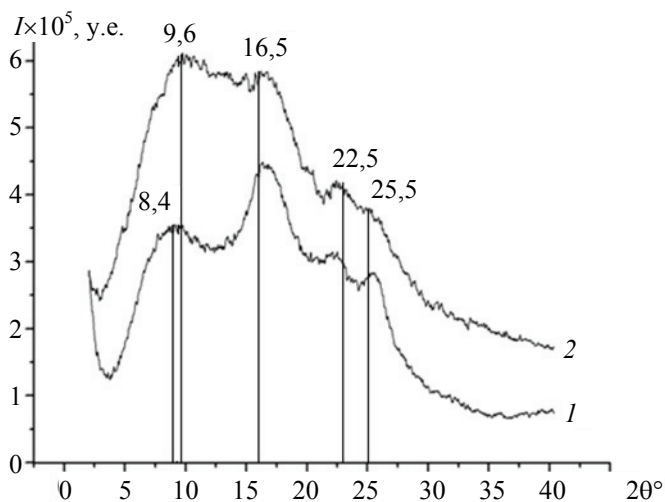


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образцов полимерной мембраны МГА-95 в геометрии на отражение при воздушно-сухом (1) и водонасыщенном (2) состояниях мембраны

Кристаллографические расчеты для рефлексов при углах 2θ : 16,5; 22,5; 25,5° проводились по уравнению Брэгга

$$d = \lambda(2 \sin \theta)^{-1}. \quad (2)$$

Для расчета рентгеновской степени кристалличности (СК) применялась методика Аггарвала–Тилля [9]. На дифрактограмме полимерного материала разделяют отражения, связанные с кристаллической и аморфной фазами, а расчет производится по соотношению

$$СК = \frac{I_k}{I_k + I_a} 100\%, \quad (3)$$

где I_k – интегральная интенсивность кристаллической фазы; I_a – интегральная интенсивность аморфной фазы.

Экспериментальные данные по рентгенодифрактометрическим исследованиям представлены в виде дифрактограмм с рефлексами и максимумами при углах 2θ : 8,4; 9,6; 16,5; 22,5; 25,5° для воздушно-сухого и водонасыщенного образцов (см. рис. 1). Из дифрактограмм видно, что происходит перераспределение интенсивности и увеличение диффузной составляющей рассеяния в образце мембраны.

При сопоставлении рентгеновских дифрактограмм (рис. 2) образцов воздушно-сухой и рабочей (бывшей в эксплуатации) мембран отметим, что положение рефлексов для обоих образцов не меняется, однако при этом наблюдается исчезновение резкой структуры рефлексов при углах 16,5; 22,5; 25,5° в образце мембраны, бывшей в эксплуатации (рис. 3). Обнаруженное совпадение углов дифракции указывает на малую чувствительность макромолекул к механической и термодинамической нагрузкам при циклических условиях эксплуатации. Размытость дифракционных рефлексов обусловлена влиянием различных факторов, в частности, наличием в порах либо на поверхности мембраны остатков растворителя или раствора. Чтобы получить объяснение экспериментальным данным в мембранах на основе аморфно-кристаллических полимеров, необходимы знания величины соотношения кристаллической и аморфной фаз в них. Влияние показателей эксперимента, то есть рабочего давления, на структурные характеристики представлено сопоставлением дифрактограмм, приведенных на рис. 1, при разделении сульфатсодержащих растворов.

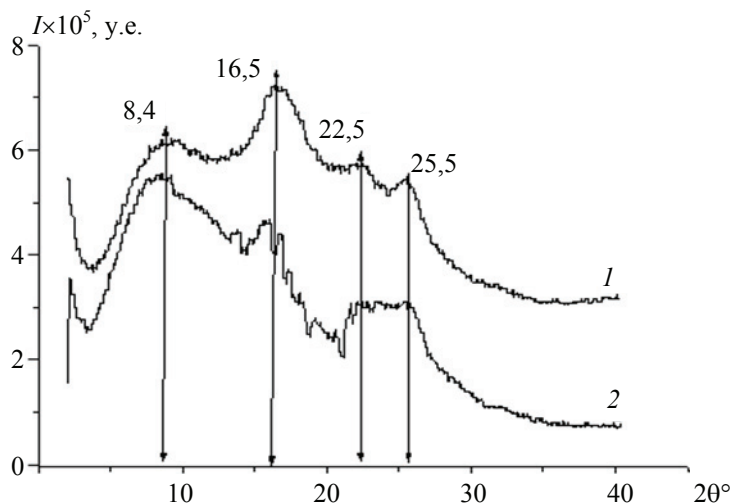


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов полимерной мембраны МГА-95, полученных в геометрии на отражение, воздушно-сухой (1) и рабочей (2) мембран

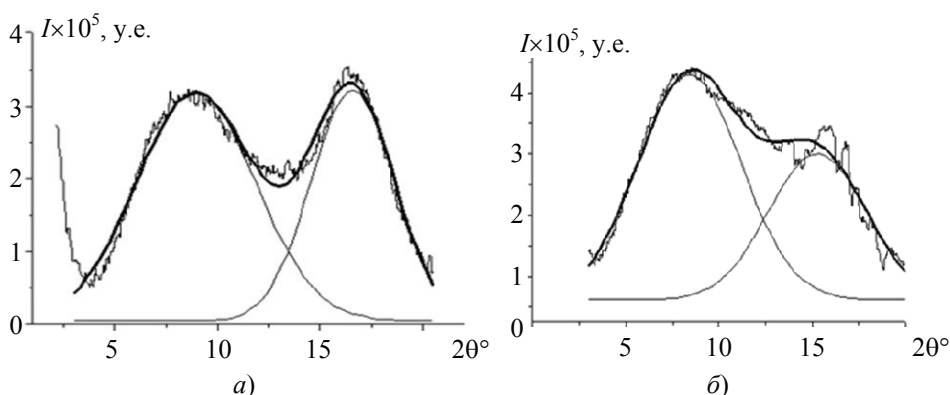


Рис. 3. Дифракционные максимумы при углах рассеяния 2θ равных $8,4$ и $16,5^\circ$, для водонасыщенного (а) и рабочего (б) образцов мембран

Из сопоставления дифрактограмм (см. рис. 1) образцов воздушно-сухой и водонасыщенной (бывшей в эксплуатации) мембраны при разделении сульфат-содержащих растворов видно, что положение рефлексов для обоих образцов не меняется, однако при этом наблюдается исчезновение резкой структуры рефлексов при углах $16,5^\circ$; $22,5^\circ$; $25,5^\circ$ в образце мембраны, бывшей в эксплуатации. Однако более детальный сравнительный анализ дифрактограмм новой и бывшей в эксплуатации мембраны МГА-95 показал, что фактор наложения внешнего воздействия (градиента давления), вероятно, играет лишь стимулирующую роль на перенос вещества, но не на внутримолекулярные структурные изменения основы мембраны [10 – 12].

При рассмотрении структурных характеристик применительно к ацетатцеллюлозной мембране МГА-95 принимались во внимание классические представления конформационных моделей цепочек: 1) изогнутой (Герднер и Блеквел); 2) изогнутой центральной (Колпак и Блеквел); 3) изогнутой и скрученной (твистующей) цепочки модели целлюлозы (Ватанабе и Хаяши); 4) простейшей модели аморфной целлюлозы (одноцепочечной модели с правильными целлюлозными цепочками, изотропно разориентированными в образце) [13].

В работе [14] приведены современные взгляды о роли конформации боковых ротамеров, содержащих ацетильные группы преимущественно у C_2 и C_3 атомов пиранозного цикла ацетатцеллюлозы в системе конформационных превращений ее макромолекул в аморфном состоянии. То есть происходит слом (скручивание) макромолекул и образование «клубков» аморфной области. Гипотеза структурного распределения ротамеров в термопластах представлена в работе [15]. Локализация функциональных групп в термопластах и их распределение вдоль полимерной цепочки показывает хорошую термопластичность без внешних пластификаторов, что позволяет молекулам ацетатцеллюлозы скользить при деформации, сохраняя некоторые механические свойства.

Взаимодействия молекул воды с функциональными группами ацетатцеллюлозы приводит к разрыву слабых межмолекулярных $-OH$ -связей, что приводит к ориентационному процессу молекул ацетатцеллюлозы, характерному для жидкокристаллической фазы, директор которой ориентирован вдоль макромолекул, вследствие чего в ней возникает анизотропное электрическое поле с более низкой симметрией C_{2v} или C_2 , находясь в котором фрагмент $-CH_3$ ацетатной группы с симметрией C_{3v} [16, 17]. Данное обстоятельство можно трактовать как прямое подтверждение жидкокристаллического порядка нетематического типа.

Эффективной информацией для понимания и объяснения экспериментальных данных являются сведения об изменении в процессе эксплуатации аморфной фазы мембраны. Проведены детальные измерения дифракционных максимумов

Таблица 1

**Параметры надмолекулярной структуры образца мембраны МГА-95
при анализе кристалличности и аморфности**

Образцы мембраны МГА-95	Дифракционные максимумы					
	кристаллические			аморфные		
	положение максимума 2θ , °	полуширина пика β , °	L_k , нм	положение максимума 2θ , °	полуширина пика β , °	L_a , нм
Воздушно- сухая	16,5	3,7	2,4	8,4	6,9	1,7
Рабочая		5,8	1,5		7,0	1,6

при 2θ , равных 8,4 и 16,5° (см. рис. 3). Полнопрофильный анализ формы дифракционных максимумов осуществлен в программе Origin 6.0. Наилучшую аппроксимацию пиков дает бимодальная функция Гаусса. Определены количественные значения полуширины рефлексов и размеры L_a аморфной фазы [12] (табл. 1). Наблюдается уширение дифракционного максимума и уменьшение размера аморфной фазы, вызванное нарушением надмолекулярной структуры основы мембраны.

Проведенные экспериментальные исследования по сравнительному анализу структурных характеристик ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95 при различном физическом состоянии рентгенодифрактометрическим методом позволяют сделать следующие выводы.

Предложена методика неразрушающего контроля для проведения рентгенодифрактометрических исследований. Выполнены рентгенодифрактометрические исследования аморфных и кристаллических областей воздушно-сухого, водонасыщенного и рабочего образцов полупроницаемой мембраны МГА-95 в геометрии на отражение. Проведен сравнительный анализ классических представлений конформационных моделей цепочек Герднера, Колпака, Блеквела, Ватанаба и Хаяши. Установлено, что фактор наложения внешнего воздействия (градиента давления) играет лишь стимулирующую роль на перенос вещества, но не на внутримолекулярные структурные изменения основы ацетатцеллюлозной мембраны МГА-95.

Рассчитаны размеры аморфных и кристаллических областей по формуле Шеррера. На основании данных можно с уверенностью констатировать, что в процессе набухания происходит изменение надмолекулярной структуры материала мембраны за счет деформации как кристаллической, так и аморфной составляющих фаз образца. Молекулы воды, обладая сильной тенденцией к донорно-акцепторным взаимодействиям с потенциалобразующими ионами свободных поверхностей капиллярно-пористой среды, осуществляют, как бы, расклинивающее анизотропное действие на межмолекулярную гетероструктуру мембраны, сжимая кристаллиты области когерентного рассеяния, перпендикулярно оси с кристаллической решеткой.

Сопоставлены дифрактограммы образцов воздушно-сухой и рабочей мембран при разделении сульфатсодержащих растворов видно, что положение рефлексов не меняется, однако, при этом наблюдается исчезновение резкой структуры рефлексов при углах 16,5; 22,5; 25,5° в образце мембраны, бывшей в эксплуатации. Выполненный анализ дифрактограмм воздушно-сухой (новой) и бывшей в эксплуатации мембран МГА-95 показал, что фактор наложения внешнего воз-

действия (градиента давления) играет лишь стимулирующую роль в переносе вещества, но не во внутримолекулярных структурных изменениях основы мембраны.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/219.

Список литературы

1. Sourirajan, S. The Science of Reverse Osmosis-Mechanisms, Membranes, Transport and Applications / S. Sourirajan // Pure and Applied Chemistry. – 1978. – Vol. 50, No. 7. – P. 593 – 615.
2. Ивара, М. Механизм разделения растворенных веществ методом обратного осмоса / ВЦП. – № Г-16892. – М., 1981. – 38 с. – Пер. ст. из журн. : Хемзи. – 1978. – Vol. 16, No. 7. – P. 399 – 412.
3. Дытнерский, Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1978. – 352 с.
4. Дытнерский, Ю. И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1986. – 272 с.
5. Структура и свойства полупроницаемых мембран на основе модифицированных диацетатов целлюлозы / В. Н. Седелкин [и др.] // Мембраны и мембр. технологии. – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 114 – 128. doi: 10.1134/S2218117214020096
6. Фенько, Л. А. Кинетические закономерности формирования пористой структуры мембран методом инверсии фаз / Л. А. Фенько, Н. Г. Семенкевич, А. В. Бильдюкевич // Мембраны и мембр. технологии. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 66 – 76.
7. Мембраны, фильтрующие элементы, мембранные технологии : каталог. – Владимир : Владипор, 2004. – 22 с.
8. Арисова, В. Н. Структура и свойства КМ : учеб. пособие / В. Н. Арисова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2008. – 94 с.
9. Ковалев, Г. В. Пластифицирующее действие воды на γ -облученную целлюлозу / Г. В. Ковалев, Л. Т. Бугаенко // Вестн. Моск. университета. Сер. 2 : Химия. – 2002. – Т. 43, № 1. – С. 67 – 70.
10. Kovalev, S. V. Coefficients of Hydrodynamic Permeability of Porous Membranes Depending on Pressure Gradient / S. V. Kovalev // J. Water Chem. and Technology. – 2014. – Vol. 36, No. 1. – P. 31 – 38. doi: 10.3103/S1063455X14010056
11. Ковалев, С. В. Методика исследования гидродинамической проницаемости мембран от градиента давления и температуры / С. В. Ковалев // Мембраны и мембр. технологии. – 2013. – Т. 3, № 3. – С. 191 – 198. doi: 10.1134/S2218117213030061
12. Ковалев, С. В. Экспериментальные исследования и математическое описание процесса баромембранного разделения сульфатсодержащих растворов // Вестн. Тамб. университета. Сер. : Естеств. и техн. науки. – 2013. – Т. 18, Вып. 1. – С. 195 – 198.
13. Современные представления о строении целлюлоз / Л. А. Алешина [и др.] // Химия раст. сырья. – 2001. – № 1. – С. 5 – 36.
14. Conformational Analysis of Cellulose Acetate in the Dense Amorphous State / A. Vocahut [et al.] // Cellulose. – 2014. – Vol. 21, No. 6. – P. 3897 – 3912.
15. Masatoshi, I. Mechanical and Other Characteristics of Cellulose Ester Bonded With Modified Cardanol From Cashew Nut Shells and Additional Aliphatic and Aromatic Components / I. Masatoshi, T. Kiyohiko, T. Shukichi // Cellulose. – 2013. – Vol. 20, No. 1. – P. 559 – 569.

16. Накамото, К. Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений / К. Накамото ; пер. с англ. Л. В. Христенко, под ред. Ю. А. Пентина. – М. : Мир, 1991. – 536 с.

17. Исследования порового пространства композиционных мембран ESPA и МГА-95 методом рентгеновского рассеивания / С. И. Лазарев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 75 – 83. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.075-083

The Analysis of Structural Characteristics of MGA-95 Membrane in Different Physical Conditions by X-Ray Scattering Method

S. I. Lazarev¹, Yu. M. Golovin², E. Yu. Yanovskaya²,
D. S. Lazarev¹, K. V. Shestakov¹

Departments: “Applied Geometry and Computer Graphics” (1); “Physics” (2),
TSTU, Tambov, Russia; geometry@mail.nnn.tstu.ru

Keywords: amorphous; crystallinity; diffraction pattern; membrane, X-ray diffraction.

Abstract: In this article, we describe a method for non-destructive testing, when the sample of semipermeable membrane is not subject to physical destruction during the research time. We conducted a study of amorphous and crystalline area of air-dry, water-saturated and working samples of the MGA-95 semipermeable membrane by method of X-ray scattering and characterized the diffraction pattern in the geometry of reflection. By comparing the diffraction patterns of samples it can be seen that the position of reflections for both samples does not change, but at the same time the disappearance of a sharp structure reflections is observed at angles of 16.5, 22.5, 25.5° in the sample membranes, which were used in the work. However, the analysis of the diffraction patterns of air-dried (new) and used samples of MGA-95 membrane showed that the application of an external factor impacts (pressure gradient) plays only a catalytic role in the transport of material, but does not cause the intramolecular structural changes in the base of the membrane. The numerical values of the size of amorphous and crystalline regions were calculated and shown in this study.

References

1. Sourirajan S. The Science of Reverse Osmosis-Mechanisms, Membranes, Transport and Applications, *Pure and Applied Chemistry*, 1978, vol. 50, no. 7, pp. 593-615.
2. Ivara M. *Mekhanizm razdeleniya rastvorenykh veshchestv metodom obratnogo osmosa* [The mechanism of solute separation by reverse osmosis], M., 1981, 38 p. (In Russ.)
3. Dytnerskii Yu.I. *Obratnyi osmos i ul'trafil'tratsiya* [Reverse osmosis and ultrafiltration], Moscow: Khimiya, 1978, 352 p. (In Russ.)
4. Dytnerskii Yu.I. *Baromembrannye protsessy. Teoriya i raschet* [Baromembrane processes. Theory and calculation], Moscow: Khimiya, 1986, 272 p. (In Russ.)
5. Sedelkin V.N., Potekhina L.N., Chirkova O.A., Mashkova D.A., Oleinikova E.V. Structure and properties of semipermeable membranes based on modified cellulose diacetates, *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 7, pp. 526-538, doi: 10.1134/S0965544114070123 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Fen'ko L.A., Semenkevich N.G., Bil'dyukevich A.V. The kinetics of membrane pore structure formation by phase inversion, *Petroleum Chemistry*, 2011, vol. 51, no. 7, pp. 527-535, doi: 10.1134/S0965544111070073 (In Russ., abstract in Eng.)

7. *Membrany, fil'truyushchie elementy, membrannye tekhnologii : catalog* [The membranes filter cartridges, membrane technology: catalog], Vladimir: Vladipor, 2004, 22 p. (In Russ.)
8. Arisova V.N. *Struktura i svoystva KM : ucheb. posobie* [Structure and properties of the CM: Textbook], Volgograd: VolgGTU, 2008, 94 p. (In Russ.)
9. Kovalev G.V., Bugaenko L.T. [The plasticizing effect of water on γ -irradiated cellulose], *Vestn. mosk. universiteta. Ser. 2: Khimiya* [Moscow University Bulletin. Series 2: Chemistry], 2002, vol. 43, no. 1, pp. 67-70. (In Russ.)
10. Kovalev S.V. Coefficients of Hydrodynamic Permeability of Porous Membranes Depending on Pressure Gradient, *J. Water Chem. and Technology*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 31-38, doi: 10.3103/S1063455X14010056
11. Kovalev S.V. Coefficients of hydrodynamic permeability of porous membranes depending on pressure gradient, *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 31-38, doi: 10.3103/S1063455X14010056 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Kovalev S.V. [Experimental Studies and Mathematical Description of Sulfate-Baromembranes Separation Solutions], *Vestn. Tamb. universiteta. Ser.: Estestv. i tekhn. nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical sciences], 2013, vol. 18, issue 1, pp. 195-198. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Aleshina L.A., Glazkova S.V., Lugovskaya L.A., Podoinikova M.V., Fofanov A.D., Silina E.V. [Modern ideas about the structure of cellulose], *Khimiya rast. syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2001, no. 1, pp. 5-36. (In Russ.)
14. Bocahut A., Delannoy J-Y, Vergelati C, Mazeau K. Conformational Analysis of Cellulose Acetate in the Dense Amorphous State, *Cellulose*, 2014, vol. 21, no. 6, pp. 3897-3912.
15. Masatoshi I., Kiyohiko T., Shukichi T. Mechanical and Other Characteristics of Cellulose Ester Bonded With Modified Cardanol From Cashew Nut Shells and Additional Aliphatic and Aromatic Components, *Cellulose*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 559-569.
16. Nakamoto K., Khristenko L.V., Pentina Yu.A. *Infrakrasnye spektry neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedinenii* [Infrared Spectra of Inorganic and Coordination Compounds], Moscow: Mir, 1991, 536 p. (In Russ.)
17. Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Lazarev D.S., Kazakov V.G., Khorokhorina I.V. X-ray Scattering for the Study of Pore Space of MGA-95 and ESPA Composite Membranes, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 75-83, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.075-083 (In Russ., abstract in Eng.)

Analyse der strukturellen Charakteristiken der Azetatzellulosenmembran MGA-95 bei ihrem verschiedenen physischen Zustand von der röntgendiffraktometrischen Methode

Zusammenfassung: Es ist die Methodik der nicht zerstörenden Kontrolle bei den röntgendiffraktometrischen Forschungen des der physischen Zerstörung nicht unterziehenden Musters der halbdurchdringbaren Membran dargelegt. Es sind die röntgendiffraktometrischen Forschungen der amorphen und kristallinen Gebiete der luftgetrockneten, wassergesättigten Muster und der Arbeitsmuster der halbdurchdringbaren Membran MGA-95 durchgeführt und es ist die Charakteristik der Röntgendiffraktogramme in der Geometrie auf die Widerspiegelung erfüllt. Es sind die numerischen Bedeutungen nach dem Umfang der amorphen und kristallinen Gebiete erhalten.

**Analyse des caractéristiques structurelles de la membrane
MGA-95 acétatecellulose lors de son état physique différent
par une méthode roentgendiffractionométrique**

Résumé: Est exposée une méthode du contrôle non destructif lors des recherches roentgendiffractionométriques d'un échantillon de la membrane semi-perméable non susceptible à la destruction physique. Sont effectuées les études roentgendiffractionométriques des domaines amorphes et cristallins des échantillons de la membrane semi-perméable MGA-95; est réalisée une caractéristique des diffractogrammes de roentgen dans la géométrie de réflexion. Sont obtenues les valeurs numériques sur la taille des domaines amorphes et cristallins.

Авторы: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Головин Юрий Михайлович* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика»; *Яновская Элина Юрьевна* – кандидат медицинских наук, доцент кафедры «Физика»; *Лазарев Дмитрий Сергеевич* – студент; *Шестаков Константин Валерьевич* – аспирант кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
