

## РАВНОВЕСНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОТЕНЦИАЛ ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН В РАСТВОРАХ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

С. И. Лазарев<sup>1</sup>, И. В. Хорохорина<sup>2</sup>, А. А. Лавренченко<sup>3</sup>,  
А. А. Арзамасцев<sup>4</sup>, Д. А. Родионов<sup>1</sup>

*Кафедры: «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1),  
geometry@mail.nnn.tstu.ru; «Природопользование и защита окружающей среды» (2);  
«Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» (3),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
кафедра математического и компьютерного моделирования и информационных  
технологий, ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина» (4), г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** потенциал поля поверхностных сил; равновесный коэффициент распределения; раствор биохимического производства; ультрафильтрационные мембраны.

**Аннотация:** Получены значения величин для расчета равновесного коэффициента распределения веществ биохимического синтеза в мембранах УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100 и водной массе раствора в диапазоне изменения концентраций белка 0,065...0,2 кг/м<sup>3</sup> при температурах 311...331 К. В результате обработки экспериментальных данных найдены численные значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета равновесного коэффициента распределения. Рассчитан потенциал поля поверхностных сил полупроницаемых мембран и интерпретировано его изменение. Величины потенциала поля поверхностных сил, рассчитанные через постоянную Больцмана, позволяют найти значения безразмерного потенциала, который характеризует структурные отличия воды в тонких порах мембраны и растворов электролитов с электростатическим взаимодействием.

---

### Введение

Вопросы массопереноса веществ через мембраны в процессах ультрафильтрационного разделения растворов и, в особенности, растворов, содержащих вещества биохимического синтеза, до настоящего времени остаются весьма актуальными [1 – 5]. Массопереносные уравнения, описывающие перенос растворенных веществ через полупроницаемую мембрану, основанные на законе Фика, учитывают вклад диффузионных явлений, на которые существенно влияют сорбционные процессы, концентрационная поляризация и гелеобразование [6, 7]. Существенное влияние на проницаемые и селективные свойства ультрафильтрационных мембран оказывают физико-химические свойства веществ, содержащихся в промышленных растворах.

### Методика проведения исследований

Отмечено [1 – 8], что особое влияние на диффузионные и сорбционные процессы оказывают физико-химические свойства вещества, контактирующего с мембраной. В большинстве случаев, очевидно, что наиболее сильно изменяют

свойства мембран сорбирующие на них растворенные вещества, в особенности, вещества биохимического окисления и им подобные компоненты [8 – 13]. Величины концентрационной поляризации, гелеобразования, коэффициента диффузии и ряда других параметров в уравнениях массопереноса определяются через равновесный коэффициент распределения растворенного вещества между растворителем и мембраной. Равновесный коэффициент распределения в свою очередь находится по экспериментальным данным сорбционной емкости мембран или рассчитывается по значениям потенциала поля поверхностных сил – величины потенциала в пограничном слое, характеризующего диффузионные и сорбционные явления на границе раздела фаз и в поровом пространстве полупроницаемой мембраны [2 – 14]. По величине потенциала поля поверхностных сил через постоянную Больцмана определяется безразмерный потенциал по уравнению [15]

$$\Phi = U_n / (\sigma T), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Больцмана

Для водных растворов значения безразмерного потенциала главным образом связаны со структурными отличиями воды в тонких порах мембраны и, в случае растворов электролитов, электростатическим взаимодействием. Для обеспечения высоких значений по коэффициенту задержания безразмерный потенциал  $\Phi$  должен составлять от 3 до 5 единиц  $\sigma T$  [15]. Поэтому *цель работы* – исследование равновесного коэффициента распределения ультрафильтрационных мембран УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100 и потенциала поля поверхностных сил в промышленных растворах биохимических производств.

### Исследования сорбционной способности мембран

Экспериментальные исследования сорбционной активности мембран проводились методом переменных концентраций. В качестве мембран использовались ультрафильтрационные мембраны УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100, наиболее применяемые в промышленной практике, обладающие высокой задерживающей способностью и хорошей производительностью. Характеристики ультрафильтрационных мембран представлены в табл. 1 [16].

В качестве раствора применялись промышленные водные растворы биохимических производств, получаемые при биохимическом синтезе дрожжей и спирта из мелассы. Из ультрафильтрационных мембран вырезали образцы размером 60 × 150 мм. Микрометром измеряли их толщину. Образцы подготавливались обжатием под рабочим давлением в ультрафильтрационной установке тупи-

Таблица 1

### Характеристики ультрафильтрационных мембран

Марка полупроницаемых мембран	Вид полупроницаемой мембраны	Материал, из которого изготовлен активный слой	Удельный поток растворителя $J$ , $\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$ , при $P = 0,5 \text{ МПа}$	Коэффициент задержания для 0,15%-го раствора NaCl
УАМ-100	Однородная	Ацетатцеллюлоза	$0,90 \cdot 10^{-5}$	0,95
УАМ-150			$0,69 \cdot 10^{-5}$	0,97
УПМ-К	Композиционная	Полиамид	$1,16 \cdot 10^{-5}$	0,98
УФМ-100		Фторопласт	$1,50 \cdot 10^{-5}$	0,92

кового типа до получения постоянных значений производительности по дистиллированной воде. После подготовки толщина мембраны вновь измерялась микрометром. В стеклянных бюксах объемом  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  готовили растворы биохимического производства различной известной концентрации. В бюксы с растворами помещали подготовленные мембраны, после удаления с их поверхности излишков дистиллированной воды их плотно закрывали. Бюксы с образцами мембран помещали в термостат, выведенный на необходимый температурный режим, и выдерживали в нем в течение суток. После извлечения образцов мембран осуществляли повторный контроль их линейных размеров: длины, ширины и толщины. Затем измеряли концентрацию белковых растворов в бюксах и определяли разницу исходной и конечной концентраций. Далее рассчитывали равновесный коэффициент распределения как отношение концентраций вещества в мембране и исходном растворе

$$k_p = C_m / C_1 . \quad (2)$$

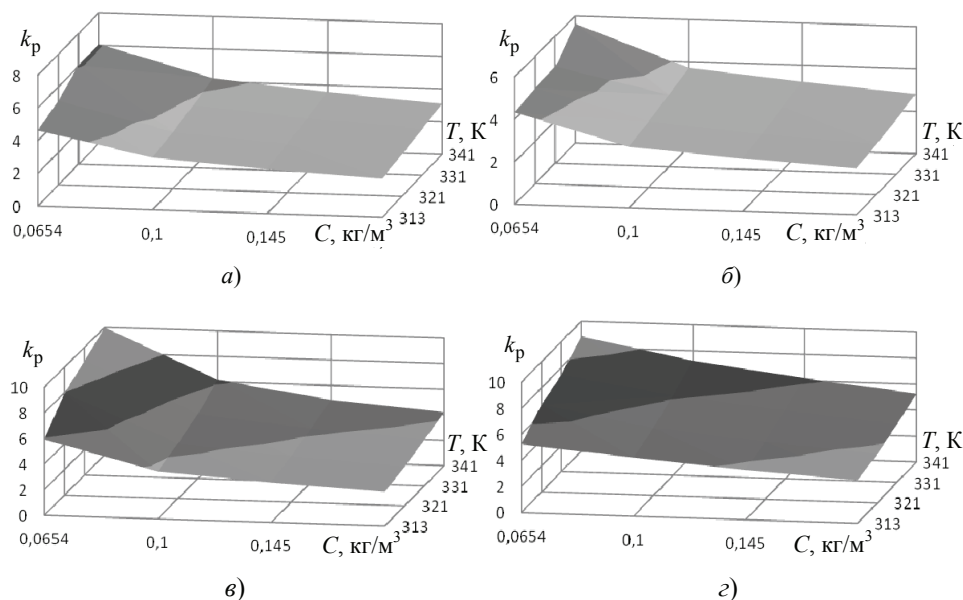
По значениям равновесного коэффициента распределения  $k_p$  рассчитывали значения потенциала поля поверхностных сил

$$U = -RT \ln(k_p) , \quad (3)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура в термостате с бюксами.

### Обсуждение результатов

Основными факторами, влияющими на сорбцию веществ мембранами из растворов, являются исходная концентрация в растворе и температура данного раствора. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 1 при различных температурах для растворов различной концентрации веществ биохимического производства.



**Рис. 1. Зависимость равновесного коэффициента распределения от концентрации и температуры раствора биохимического производства для мембран:**  
*а* – УАМ-100; *б* – УАМ-150; *в* – УПМ-К; *з* – УФМ-100

Для аналитического расчета равновесного коэффициента распределения в ультрафильтрационных мембранах использовали модифицированное уравнение Фрейндлиха следующего вида:

$$k_p = \frac{b C_1^n (293/T)^m}{C_1}, \quad (4)$$

где  $b$ ,  $n$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов для аналитического расчета равновесного коэффициента распределения белка в мембранах приведены в табл. 2. Расхождение экспериментальных и расчетных значений не превышает 10 %.

По результатам экспериментов прослеживается, что с увеличением концентрации растворенного вещества в исходном растворе равновесный коэффициент распределения снижается. Это связано с насыщением мембран молекулами белков, после которого дальнейшее увеличение концентрации раствора не приводит к значительному увеличению концентрации в мембране. Высокая сорбционная активность мембраны УПМ-К по сравнению с мембраной УАМ-100 обусловлена характером и величиной пор и аморфных областей в полимерных мембранах. Известно [7, 8], что соотношение величины пор мембран с размером молекул растворенного вещества оказывает значительное влияние на сорбционную активность мембран. Неоднозначно и влияние температуры на сорбционную активность полупроницаемых мембран. В исследуемом случае с увеличением температуры белкового раствора сорбционная активность мембран УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100 повышается.

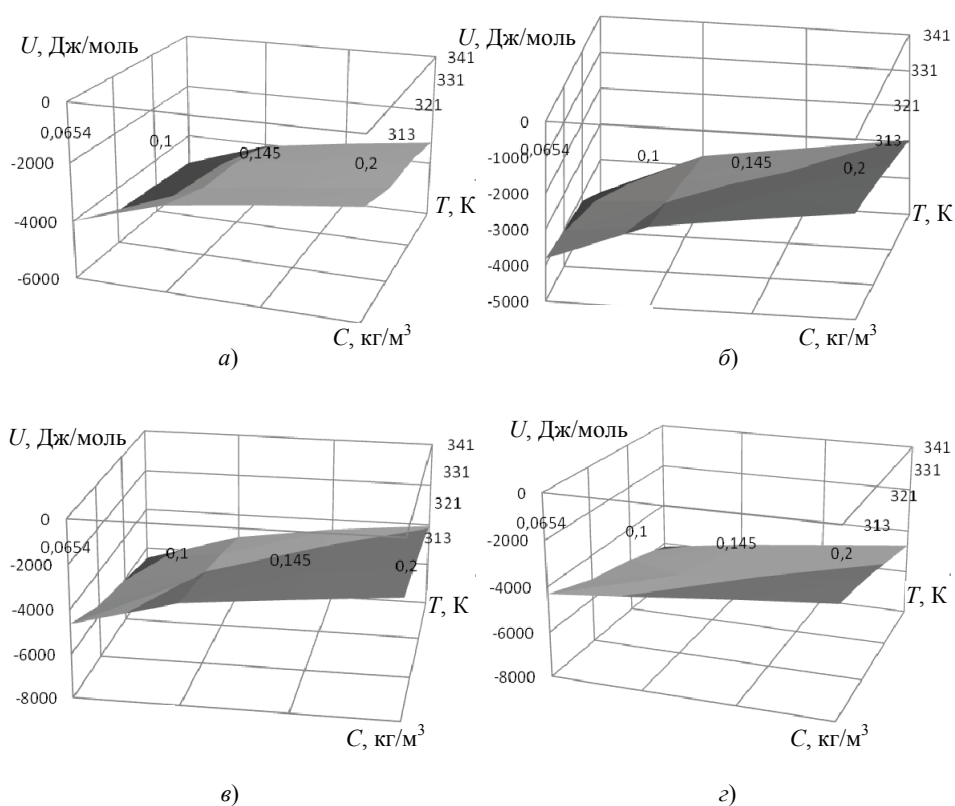
Изменение концентрации растворенного вещества у поверхности мембраны по сравнению с его концентрацией в объеме раствора обусловлено влиянием поля поверхностных сил. Потенциал этого поля для полимерных мембран рассчитывается по уравнению (3) и, как и равновесный коэффициент распределения, зависит от концентрации растворенного вещества в растворе и температуры данного раствора. Зависимости расчетных значений потенциала поля поверхностных сил мембран УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100 от концентрации и температуры водного раствора биохимического производства представлены на рис. 2.

С ростом концентрации растворенного белка в исходном растворе потенциал поля увеличивается, что объясняется ростом потенциальной энергии взаимодействия растворенного вещества со стенками пор мембраны. Увеличение температуры раствора приводит к снижению поверхностного потенциала. Вероятно, в случае растворов биохимического синтеза, которые склонны к термолабильности, повышение температуры в системе «мембрана – раствор» изменяет кислотность и снижает вязкость раствора как в порах мембраны, так и на пограничном слое, что в свою очередь снижает энергию взаимодействия белка с мембраной и приводит к уменьшению потенциала поля поверхностных сил. На изменение

Таблица 2

**Значения эмпирических коэффициентов уравнения (4) для расчета равновесного коэффициента распределения**

Мембрана	$b$	$n$	$m$
УАМ-100	1,159192	0,559151	3,213020
УАМ-150	1,149823	0,599850	3,002901
УПМ-К	1,188833	0,504138	5,219517
УФМ-100	1,625120	0,564890	5,581300



**Рис. 2. Зависимость потенциала поля поверхностных сил от концентрации и температуры раствора биохимического производства для мембран:**  
*a* – УАМ-100; *б* – УАМ-150; *в* – УПМ-К; *г* – УФМ-100

потенциала поля поверхностных сил влияет число функциональных групп, которые изменяют заряд мембраны и позволяют ей проявлять слабые ионные свойства. Для различных мембран данные явления проявляются в разной степени [14, 15]. Из расчетных кривых очевидно, что потенциал поля поверхностных сил для ацетатцеллюлозных мембран УАМ-150 выше, чем для полиамидных мембран УПМ-К.

### Заключение

Выполнены исследования сорбции и получены данные по равновесному коэффициенту распределения веществ биохимического синтеза в мембранах УАМ-100, УАМ-150, УПМ-К и УФМ-100 в зависимости от концентрации и температуры раствора. При интерпретации и обработке данных найдены численные значения коэффициентов в уравнении Фрейндлиха, что позволяет теоретически рассчитывать значения концентрации компонентов в ультрафильтрационной мембране. Рассчитан потенциал поля поверхностных сил, характеризующий сорбционные и диффузионные явления на границе раздела фаз и в поровом пространстве ультрафильтрационных мембран. Потенциал поля поверхностных сил, рассчитанный через постоянную Больцмана, позволяет найти значения безразмерного потенциала, с помощью которого можно охарактеризовать структурные отличия воды в тонких порах мембраны и растворов электролитов с электростатическим взаимодействием.

### *Список литературы*

1. Котов, В. В. Электродиализ водных растворов, содержащих органические электролиты / В. В. Котов, О. В. Перегончая, И. М. Бодякина. – Саарбрюккен : LAP, 2014. – 97 с.
2. Заболоцкий, В. И. Перенос ионов в мембранах / В. И. Заболоцкий, В. В. Никоненко. – М. : Наука, 1996. – 392 с.
3. Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюард, Е. Лайтфут ; пер. с англ. Н. Н. Кулова и В. С. Крылова ; под ред. Н. М. Жаворонкова и В. А. Малюсова. – М. : Химия, 1974. – 688 с.
4. Кестинг, Р. Е. Синтетические полимерные мембраны / Р. Е. Кестинг ; пер. с англ. А. И. Мудрагеля, А. И. Костина ; под ред. В. К. Ежова. – М. : Химия, 1991. – 336 с.
5. Николаев, Н. И. Диффузия в мембранах / Н. И. Николаев. – М. : Химия, 1980. – 232 с.
6. Абоносимов, О. А. О некоторых особенностях диффузии солей гальваностоксов через обратноосмотические мембраны / О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, Д. О. Абоносимов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2013. – Т. 13, вып. 2. – С. 207 – 212.
7. Чалых, А. Е. Диффузия в полимерных системах / А. Е. Чалых. – М. : Химия, 1987. – 312 с.
8. Технологические процессы с применением мембран / Р. Е. Лейси [и др.] ; пер. с англ. Л. А. Мазитова и Т. М. Мнацаканян ; под ред. Ю. А. Мазитова. – М. : Мир, 1976. – 370 с.
9. Электронанофильтрационная очистка сточных вод машиностроительных производств от некоторых ионов / Р. В. Попов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 288 – 294.
10. Характеристики сетчатой прокладки как промотора переноса массы при электродиализе / ВЦП. М., 1984. – 20 с. ; пер. ст. О. Курода, Х. Мацудзакис, С. Такахаши из журн. : Кагаку когаку ромбунсю. – 1983. – Т. 9, № 2. – С. 142 – 147.
11. Чхеидзе, Н. В. Анализ массообменных процессов в ячейках электроионитового опреснительного аппарата методами теории пограничного слоя / Н. В. Чхеидзе // Электрохимия ионитов : сб. науч. тр. – Краснодар, 1979. – С. 128 – 134.
12. Головашин, В. Л. Исследование кинетических коэффициентов электроультрафильтрационного разделения промышленных растворов биохимических производств / В. Л. Головашин, С. И. Лазарев, А. А. Лавренченко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 86 – 94.
13. Хорохорина, И. В. Сорбционная емкость ультрафильтрационных мембран УАМ-150 и УПМ-К в водных растворах лаурилсульфата натрия / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2016. – Т. 16, вып. 3. – С. 361 – 367.
14. Сорбционные характеристики обратноосмотических мембран / В. Л. Головашин [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10, вып. 2. – С. 201 – 207.
15. Чураев, Н. В. Физико-химические механизмы обратноосмотического разделения растворов / Н. В. Чураев, Б. В. Дерягин // Журн. Всесоюз. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева. – 1987. – Т. 32, вып. 6. – С. 614 – 619 .
16. Мембраны, фильтрующие элементы, мембранные технологии: каталог. – Владимир: ЗАО НТЦ «Владипор», 2007. – 22 с.

## The Sorption Capacity of Ultrafiltration Membranes and the Potential Field of the Surface Forces in Aqueous Solutions of Milk Proteins

S. I. Lazarev<sup>1</sup>, I. V. Khorokhorina<sup>2</sup>, A. A. Lavrenchenko<sup>3</sup>,  
A. A. Arzamastsev<sup>4</sup>, D. A. Rodionov<sup>1</sup>

*Department of Applied Geometry and Computer Graphics (1),  
geometry@mail.nnn.tstu.ru; Environmental Management and Protection (2);  
Operation of Road Transport and Car Service (3), TSTU, Tambov, Russia;  
Department of Mathematical and Computer Modeling and Information Technologies,  
G. R. Derzhavin TSU (4), Tambov, Russia*

**Keywords:** ultrafiltration membrane; equilibrium distribution coefficient; solution of biochemical production; field potential of surface forces.

**Abstract:** The values to calculate the equilibrium coefficient of distribution of substances in the biochemical synthesis of UAM-100 UAM-150, UPM-K and UFM-100 membranes and in the aqueous solution mass in the range of protein concentrations ranging from 0.065 to 0.2 kg/m<sup>3</sup> at temperatures from 311 to 331 K are obtained. The processing of the experimental data resulted in finding numerical values of the empirical coefficients for the theoretical calculation of the equilibrium distribution coefficient. The potential of the surface forces field for semipermeable membranes was calculated and its variation was interpreted depending on the temperature and concentration of dissolved substances. The values of the potential of the surface force field were calculated through the Boltzmann constant to find the values of a dimensionless potential. It allowed characterizing the structural differences of water in thin pores of a membrane and solutions of electrolytes with electrostatic interaction.

### References

1. Kotov V.V., Peregonchaya O.V., Bodyakina I.M. *Elektrodializ vodnykh rastvorov, soderzhashchikh organicheskie elektrolity* [Electrodialysis of aqueous solutions containing organic electrolytes], Saarbrücken: LAP, 2014, 97 p. (In Russ.)
2. Zabolotskii V.I., Nikonenko V.V. *Perenos ionov v membranakh* [Transfer of ions in membranes], Moscow: Nauka, 1996, 392 p. (In Russ.)
3. Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N. *Transport Phenomena* (Revised Second ed.), John Wiley & Sons, 2007, 780 p.
4. Kesting R.E. *Sinteticheskie polimernye membrany* [Synthetic polymer membranes], Moscow: Khimiya, 1991, 336 p. (In Russ.)
5. Nikolaev H.I. *Diffuziya v membranakh* [Diffusion in membranes], Moscow: Khimiya, 1980, 232 p. (In Russ.)
6. Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Abonosimov D.O. [On some features of diffusion of galvanic salts through reverse osmosis membranes], *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2013, vol. 13, Is. 2, pp. 207-212. (In Russ.)
7. Chalykh A.E. *Diffuziya v polimernykh sistemakh* [Diffusion in polymer systems], Moscow: Khimiya, 1987, 312 p. (In Russ.)
8. Leisi R. E. *Tekhnologicheskie protsessy s primeneniem membran* [Technological processes with the use of membranes], Moscow: Mir, 1976, 370 p. (In Russ.)
9. Popov R.V., Lazarev S.I., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A., Dmitriev V.M. [Electron-nanofiltration purification of sewage from machine-building industries from certain ions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 288-294. (In Russ., abstract in Eng.)

10. [Characteristics of the mesh pad as a mass transfer promoter in electro dialysis], All-Union Translation Center, Moscow, 1984, 20 p. (In Russ.), Per. st. O. Kuroda, Kh. Matsudzaki, S. Takahasi, *Kagaku kogaku rombunshu*, 1983, vol. 9, no. 2, pp. 142-147.

11. Chkheidze N.V. [Analysis of mass-exchange processes in cells of the electroionic desalination apparatus by the methods of boundary-layer theory], *Elektrokhimiya ionitov* [Electrochemistry of ion exchangers], Krasnodar, 1979, pp. 128-134. (In Russ.)

12. Golovashin V.L., Lazarev S.I., Lavrenchenko A.A. [Study of the kinetic coefficients of the electro-ultrafiltration separation of industrial solutions of biochemical plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 86-94. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I. [Sorption capacity of ultrafiltration membranes UAM-150 and UPM-K in aqueous solutions of sodium lauryl sulfate], *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2016, vol. 16, Is. 3, pp. 361-367. (In Russ.)

14. Golovashin V.L., Kovalev S.V., Lazarev K.S., Chepenyak P.A. [Sorption characteristics of reverse osmosis membranes], *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2010, vol. 10, Is. 2, pp. 201-207. (In Russ.)

15. Churaev N.V., Deryagin B.V. [Physico-chemical mechanisms of reverse-osmotic separation of solutions], *Zhurn. Vsesoyuz. khim. ob-va im. D. I. Mendeleeva* [J. All-Union. chem. Society them. D. I. Mendeleev], 1987, vol. 32, Is. 6, pp. 614-619. (In Russ.)

16. *Membrany, fil'tryushchie elementy, membrannye tekhnologii* [Membranes, filter elements, membrane technologies], Vladimir: ZAO NTTs "Vladipor", 2007, 22 p. (In Russ.)

---

### **Gleichgewichtskoeffizient der Verteilung und Oberflächenkraftfeldpotential von Ultrafiltrationsmembranen in Lösungen der biochemischen Produktion**

**Zusammenfassung:** Es sind Versuchswerte der Größen zur Berechnung des Gleichgewichtskoeffizienten der Verteilung von biochemischen Synthesubstanzen in den Membranen UAM-100, UAM-150, UPM-K und UFM-100 und in der Masse der Wasserlösung im Bereich der Proteinkonzentrationen von 0,065 bis 0,2 kg/m<sup>3</sup> bei Temperaturen von 311 bis 331 K erhalten. Als Ergebnis der Verarbeitung von experimentellen Daten sind numerische Werte von empirischen Koeffizienten für die theoretische Berechnung des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten gefunden. Das Potential des Oberflächenkraftfeldes semipermeabler Membranen ist berechnet und dessen Veränderung ist interpretiert. Die Werte des Potentials des Oberflächenkraftfeldes, berechnet durch die Boltzmann-Konstante, erlauben es, die Werte des dimensionslosen Potentials zu finden, die es ermöglichen, die strukturellen Unterschiede von Wasser in dünnen Poren einer Membran und Lösungen von Elektrolyten mit elektrostatischer Wechselwirkung zu charakterisieren.

---

### **Coefficient equilibre de la distribution et potentiel du champ des forces de surface des membranes ultrafiltrantes dans les solutions des productions biochimiques**

**Résumé:** Sont obtenues les valeurs pour le calcul de l'équilibre du coefficient de la distribution des substances de la synthèse biochimique dans les membranes UAM-100, UAM-150, UPM-K et UFM-100 dans la masse d'eau de la solution dans la



gamme de concentrations des protéines de 0,065 à 0,2 kg/m<sup>3</sup>, avec des températures de 311 à 331 K. A l'issue du traitement des données expérimentales sont trouvées des valeurs numériques des coefficients empiriques pour le calcul théorique du coefficient d'équilibre de la distribution. Est calculé le potentiel du champ des forces de surface des membranes semi-perméables, est interprété son changement. L'ampleur de la capacité du champ de forces de surface calculée par la constante de Boltzmann permet de trouver les valeurs du potentiel sans dimensions qui permet de caractériser les différences structurelles de l'eau dans les minces pores de la membrane et des solutions d'électrolytes à l'interaction électrostatique.

---

**Авторы:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Хорохорина Ирина Владимировна* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Лавренченко Анатолий Александрович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Арзамасцев Александр Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического и компьютерного моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия; *Родионов Дмитрий Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;

**Рецензент:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---