

Л.В. БОРОНИНА

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения
Астраханский инженерно-строительный институт

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОБРАТНОГО ОСМОСА И АДСОРБЦИИ
ПРИ ОЧИСТКЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ**

*THEORETICAL MATTERS OF REVERSE OSMOSIS AND ADSORPTION AT PURIFICATING
MULTICOMPONENT SOLUTIONS*

Традиционные методы современной химической технологии по разделению компонентов растворов и жидких смесей основаны на различии физико-химических параметров разделяемых компонентов (температуры кипения, растворимостей) и используют явление фазовых превращений. Поэтому аппаратное оформление этих процессов довольно сложно и энергоемко.

С ростом народонаселения встали новые проблемы - обеспечение пресной водой населения. Для получения пресной воды используются дистилляция, вымораживание, при этом около половины опресняемой воды в мире приходится на дистилляцию. Решение комплекса возникших проблем традиционными методами химической технологии становится все более затруднительным. Весьма перспективными в этом отношении оказались методы мембранного разделения.

Ключевые слова: *опреснение, обессоливание, экологичность процессов, обратный осмос, мембраны, сорбционный механизм опреснения, скорость фильтрации, осмотический перенос, гидратированные ионы.*

Авторы различных установок опреснения и обессоливания воды предлагают многочисленные сравнения в пользу своих разработок.

Однако в настоящее время большую роль играет экологичность процессов, т.е. количество сбрасываемых в окружающую среду солей. Например, эксплуатационные расходы при обратном осмосе зависят от способа предотвращения выпадения осадков.

При обессоливании воды ионным методом пропорционально солесодержанию питающей воды растут объем ионитов и оборудования, а также расход реагентов, т.е. капитальные и эксплуатационные расходы. Выявлено, что для глубокого обессоливания воды эффективнее ионный метод, для опреснения слабоминерализованных вод – обратный осмос.

Traditional modern chemical technology methods for solution and liquid mixture component separation are based on the difference between physical and chemical parameters of components being separated (boiling point, solubility). The methods use the phenomenon of phase change. Thus to install the equipment for the processes is quite complicated and power-consuming.

As the world population grows we face new problems, i.e. the shortage of drinking water. Different methods are applied for getting drinking water such as distillation and freezing out. Half of all the desalinated water is got by distillation. To solve the arisen problems by using the traditional methods of chemical technology is becoming more and more complicated. Methods of membrane separation have turned out to be promising in this respect.

Keywords: *distillation, desalting, environmental friendly, reverse osmosis, membranes, sorption method of desalination, filtration rate, osmotic transfer, hydrated ions.*

Метод опреснения воды обратным осмосом основан на фильтровании соленой воды через полупроницаемые мембраны, пропускающие воду, но задерживающие гидратированные ионы растворенных в воде солей [2, 4].

Движущей силой осмотического переноса через полупроницаемую мембрану является разность концентраций воды в сосудах по обе стороны мембраны.

Кроме того, ионы, которые в силу больших размеров не могут проходить через отверстия мембраны, прижимаются к ним, закрывают отверстия и не дают молекулам воды проходить через мембрану из солевой воды в пресную. Наоборот, со стороны пресной воды, где ионов нет или их мало, отверстия в мембране открыты и молекулы воды проходят в соленую воду.

Эффективность обратноосмотического обессоливания воды зависит от удельной производительности мембран q , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, которая связана со скоростью фильтрования раствора V соотношением

$$v = 11,6 \cdot 10^{-6} q \quad (1)$$

и от способности мембран задерживать какое-либо вещество

$$R = 1 - C_\phi / C_o . \quad (2)$$

Скорость фильтрования раствора через обратноосмотическую мембрану связана с давлением фильтрования и величинами осмотического давления обессоливаемой воды и фильтрата зависимостью

$$R = 1 - C_\phi / C_o . \quad (3)$$

Показатель увеличения давления определяет величину осмотического давления, которое зависит от разности концентраций ионов в растворах, находящихся по обе стороны мембраны.

Таким образом, обратноосмотический процесс проходит по следующим закономерностям: опреснение воды начинается лишь при давлении, превышающем осмотическое; скорость фильтрации при определенном давлении находится в прямой зависимости от содержания опресняемой воды; при большом содержании воды степень опреснения уменьшается, поскольку уменьшается степень гидратации ионов (уменьшается размер гидратированных ионов).

Способностью сорбировать молекулы воды обладают мембраны из гидрофильных веществ.

Существует ряд гипотез, объясняющих механизм процесса опреснения воды обратным осмосом [1-3].

Сурираджаном развита (впервые предложена Бретонем в 1958 г.) гипотеза сорбционного механизма опреснения воды, согласно которой на поверхности мембраны и в её порах адсорбируются молекулы воды. В результате этого на поверхности мембраны образуется слой пресной воды [4, 5].

Если толщина адсорбированного слоя молекул воды на мембране δ и диаметр пор мембраны не превышает 2δ , то при наличии давления на соленую воду, достаточного для вытеснения воды из пор, фильтроваться будет только пресная вода, причем вытесненные из поры молекулы воды будут заменяться другими, сорбируемыми из массы соленой воды.

В соответствии с механизмом, предложенным Сурираджаном, разделения растворов эффективность процесса (производительность и степень задержания растворенных веществ) зависит от химического состава раствора, природы поверхности мембраны, находящейся в контакте с раствором, диаметра пор в мембране и давления, под действием которого осуществляется фильтрование раствора.

Дальнейшее развитие сорбционная гипотеза получила в работах Ю.И. Дытнерского, который учел взаимодействие растворенного вещества с растворителем [4]. Считая диаметр гидратированных ионов электролита равным δ_e , Ю.И. Дытнерский приходит к выводу, что полупроницаемые свойства обратноосмотических мембран обусловлены наличием в ее поверхностном слое пор, диаметр которых $\delta \leq 2\delta + \delta_e$ [1, 4].

Согласно гипотезе Рейда с соавторами, в структуре таких мембран содержится как связанная, так и капиллярная вода. Связанная вода входит в состав материала мембраны, капиллярная вода заполняет поры в структуре мембраны. Предполагается, что в поверхностном слое мембраны содержится только связанная вода и не содержится капиллярной воды, которая находится в объеме между поверхностными слоями мембраны. Связанная вода утратила способность гидратировать ионы, израсходовав свою гидратационную способность материала на образование водородной связи со свободными гидроксильными группами, поэтому связанная вода не может растворить соли исходной соленой воды, т. е. не участвует в образовании гидратных оболочек ионов. В результате этого поверхностный слой мембраны не пропускает ионов [2].

При фильтровании пресной воды через наружный слой мембраны непрерывно разрываются водородные связи между молекулами связанной воды и гидроксильными группами и тут же замещаются связями с новыми поступающими из раствора молекулами. На это расходуется давление, необходимое для фильтрования. В основном же объеме мембраны вода свободно проходит по капиллярам. Наблюдаемый проскок некоторого количества ионов солей в фильтрат объясняется выходом части капиллярных пор на поверхность мембраны.

Позднее Кейлин с соавторами применили представления к асимметричным двухслойным

мембранам Лоеба-Сурираджана. В соответствии с их взглядами мембрана имеет поверхностный слой, содержащий связанную воду и практически не содержащий капиллярную воду, и основной объем, преимущественно содержащий капиллярную воду. Количество капиллярной воды в основном объеме мембраны так велико, что движение воды через него можно сравнивать с движением через очень крупные поры. Происходящий иногда проскок ионов солей через поверхностный слой мембраны можно объяснить двояко: либо в поверхностном слое содержится какое-то количество капиллярной воды, обладающей способностью к гидратации ионов и, следовательно, способствующей переносу соли, либо этот слой имеет какие-нибудь механические дефекты. В идеальном случае ни один ион соли не должен пройти через поверхностный барьер.

Подтверждением справедливости гипотезы связанной и капиллярной воды является, по мнению Мангана и Шахельфорда, гидролизация поверхностного слоя ацетилцеллюлозной мембраны. В результате гидролизации мембрана приобретает повышенную концентрацию гидроксильных групп на поверхности и обладает производительностью больше, чем исходная мембрана, примерно на 40 %.

В соответствии с ситовой гипотезой в мембране имеются поры, диаметр которых достаточен, чтобы пропускать молекулы воды, но мал для прохождения ионов и молекул растворенных веществ. Применение этих представлений к обратному осмосу основывалось на работе Траубе. Ученый рассматривал осмотические полупроницаемые мембраны как атомные сита, пропускающие молекулы растворителя, но задерживающие более крупные частицы.

В работах Ф.Н. Карелина ситовая гипотеза была дополнена учетом взаимодействий растворенное вещество - матрица мембраны, растворитель - матрица мембраны, растворенное вещество - растворитель. Это позволило обосновать преимущественный перенос через обратноосмотические мембраны воды при обессоливании растворов электролитов, а также объяснить явление прямого осмоса и отрицательное задерживание некоторых органических веществ.

Электростатическая (энергетическая) гипотеза избирательной проницаемости мембран была впервые высказана Глюкауфом в 1965 г. Она заклю-

чается в следующем. В мембране имеются сквозные поры радиуса r . Для введения иона в пору требуется затратить энергию, определяемую по формуле

$$\Delta W = W - W_o, \quad (4)$$

где W, W_o — электростатическая энергия иона соответственно в пору и в объеме раствора.

Электростатическую энергию иона валентности z и радиуса b в объеме раствора Глюкауф выразил уравнением

$$W_o = \frac{z^2 e^2}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon b}, \quad (5)$$

где e — заряд электрона; ϵ — диэлектрическая проницаемость раствора.

Упрощая модель мембраны, Глюкауф записал значение электростатической энергии иона в сферической поре в виде зависимости

$$W = \frac{z^2 e^2}{2} \left(\frac{1}{\epsilon' r} - \frac{1}{\epsilon r} + \frac{1}{\epsilon b} \right), \quad (6)$$

где ϵ' — диэлектрическая проницаемость мембраны.

Отсюда следует, что для переноса иона из объема раствора в пору, заполненную раствором, необходимо затратить энергию

$$\Delta W = \frac{z^2 e^2}{2r\epsilon} \cdot \frac{\epsilon - \epsilon'}{\epsilon'}. \quad (7)$$

Вероятность нахождения иона на таком энергетическом уровне есть функции от $\Delta W / kT$. Концентрация солей в растворе, проникающем через поры мембраны, будет определяться этой вероятностью, т.е.

$$C_\phi = C_o \exp(-\Delta W / kT). \quad (8)$$

Из последнего уравнения имеем зависимость

$$\lg(C_o / C_\phi) = \Delta W / 2.3kT. \quad (9)$$

Анализируя эту формулу, Глюкауф приходит к выводу, что его модель находится в качественном согласии с опытами Сурираджана, показывающими, что отношение концентраций солей в исходном растворе и фильтрате уменьшается при увеличении радиуса негидратированного иона и радиуса пор и увеличивается с ростом отношения ϵ / ϵ' и заряда иона ez . Развивая и несколько усложняя модель, Глюкауф показывает, что электростатическая гипотеза обосновывает экспериментальный факт уменьшения селективности мембран с ростом концентрации соли в фильтруемом растворе.

В дальнейшем Глюкауф приходит к выводу, что в плотном слое полупроницаемых мембран имеются поры двух размеров: молекулярной величины и очень малое количество больших пор (от 2 до 10 нм). Вода проходит через все поры, а ионы хлорида натрия могут двигаться только через поры диаметром не меньше 1,1 нм.

Позднее Дрезнер дополнил исследования Глюкауфа, рассмотрев экранирующее влияние ионной атмосферы, что расширило область применения гипотезы для пор с радиусом более 1 нм, но принципиальных отличий не дало.

Дальнейшее развитие электростатическая гипотеза получила в работе С.С. Духина с соавторами, которые, в отличие от Глюкауфа, считают, что в основном затраты энергии на перенос иона из раствора в поры мембраны обусловлены разностью диэлектрических проницаемостей воды в свободном объеме и в объеме пор.

Зависимость адсорбции катионов от концентрации подчиняется в большинстве случаев уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха. Уравнение Ленгмюра выполняется в случае локализованной адсорбции на однородной поверхности в отсутствие сил притяжения между молекулами сорбата.

Адсорбция, как и любой гетерогенный процесс, состоит из ряда последовательных стадий, таких как подвод вещества к поверхности сорбента (внешняя диффузия), проникновение адсорбирующегося вещества в поры сорбента (внутренняя диффузия) и непосредственно сам процесс адсорбции. Лимитирующей стадией может стать любая из вышечисленных.

Экспериментальные данные по адсорбции двух веществ, полученные в растворах с постоянной ионной силой, были рассмотрены с позиций формальной термодинамики, используемой для описания адсорбции на ионообменниках.

Из полученных данных была рассчитана константа избирательности по формуле

$$K_u = \frac{\Gamma_1 c_2}{\Gamma_2 c_1}, \quad (10)$$

где Γ_1 и Γ_2 - величины адсорбции 1-го и 2-го видов ионов; c_1 и c_2 - их концентрации смеси.

Термодинамическая константа обмена K может быть рассчитана по уравнению

$$\ln K = \int_0^1 \ln K_u d\tilde{\Gamma}_1, \quad (11)$$

$$\text{где } \tilde{\Gamma}_1 = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_1 + \Gamma_2}. \quad (12)$$

Зная зависимость $\lg K_u$ от $\tilde{\Gamma}_1$, можно по уравнению (10) рассчитать $\ln K$ и найти стандартную свободную энергию обмена $\Delta G = -RT \ln K$, т.е. выигрыш энергии при замене одного моля адсорбированных компонентов 2-го вида на один моль адсорбированных компонентов 1-го вида.

Совместная адсорбция катионов CS^+ и Na^+ и анионов Cl^- и SO_4^{2-} , и J^- и Br^- была описана с помощью изотерм с вириальными коэффициентами. Система уравнений для двух адсорбирующихся веществ 1 и 2 может быть записана в виде

$$\left. \begin{aligned} b_1 c_1 &= \frac{\theta_1}{n_1(1-\theta_1-\theta_2)^{n_1}} \exp(-2a_{11}n_1\theta_1 - 2a_{12}n_1\theta_2) \\ b_2 c_2 &= \frac{\theta_2}{n_2(1-\theta_1-\theta_2)^{n_2}} \exp(-2a_{22}n_2\theta_2 - 2a_{12}n_2\theta_1) \end{aligned} \right\} (13)$$

где b_1 и b_2 - константы адсорбционного равновесия; c_1 и c_2 - концентрации; θ_1 и θ_2 - степени заполнения; n_1 и n_2 - отношение площадей, занимаемых частицами 1 и 2, к площади вытесняемых ими молекул растворителя; параметры a_{11} характеризуют взаимодействие адсорбированных частиц: $1-1 \approx a_{11}$, $2-2 \approx a_{22}$ и $1-2 \approx a_{12}$.

При относительно малых заполнениях, когда $\ln(1-\theta_1-\theta_2) \approx -(\theta_1+\theta_2)$, из системы уравнений следуют соотношения

$$\begin{aligned} \ln \beta_1 c_1 &= \ln \Gamma_1 + 2B_{11} \Gamma_1 + 2B_{12} \Gamma_2, \\ \ln \beta_2 c_2 &= \ln \Gamma_2 + 2B_{22} \Gamma_2 + 2B_{21} \Gamma_1, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\beta_2 = b_2 \Gamma_m$; $\beta_1 = b_1 \Gamma_m$;

$$\Gamma_m = n_1 \Gamma_{1m} = n_2 \Gamma_{2m};$$

$$B_{11} = \frac{n_1^2(1-2a_{11})}{2\Gamma_m}; \quad B_{22} = \frac{n_2^2(1-2a_{22})}{2\Gamma_m};$$

$$B_{12} = \frac{n_1 n_2(1-2a_{12})}{2\Gamma_m}; \quad (15)$$

Γ_{1m} и Γ_{2m} - максимальные адсорбированные количества частиц 1 и 2 соответственно.

При достаточно больших энергиях отталкивания и не слишком малых значениях Γ_1 и Γ_2 величинами $\ln \Gamma_1$ и $\ln \Gamma_2$ можно пренебречь и получить выражения, соответствующие изотерме Темкина для совместной адсорбции веществ в области средних заполнений:

$$\ln \beta_1 c_1 = 2B_{11} \Gamma_1 + 2B_{12} \Gamma_2, \quad (16)$$

$$\ln \beta_2 c_2 = 2B_{22} \Gamma_2 + 2B_{12} \Gamma_1. \quad (17)$$

Из зависимости Γ_1 от c_1 при $c_2 = const$ можно выразить Γ_2 из (17) и подставить в (16), тогда:

$$2,31 \lg \beta_1^{(2)} c_1 = 2B_{11}^{(2)} \Gamma_1. \quad (18)$$

Кажущаяся константа адсорбционного равновесия $\beta_1^{(2)}$ и кажущийся вириальный коэффициент $B_{11}^{(2)}$ в присутствии второго вещества выражаются формулами

$$\lg \beta_1^{(2)} = \lg \beta_1 - (B_{12} / B_{22}) \lg \beta_2 c_2, \quad (19)$$

$$\lg \beta_2^{(1)} = \lg \beta_2 - \left(\frac{B_{12}}{B_{11}} \right) \lg \beta_1 c_1, \quad (20)$$

$$B_{11}^{(2)} = B_{11} - B_{12}^2 / B_{22}. \quad (21)$$

Следовательно, при $c_2 = const$ должна наблюдаться линейная зависимость $\Gamma_1 - \lg c_1$, по наклону которой можно определить $B_{11}^{(2)}$, а экстраполяцией до пересечения с осью абсцисс - величину $\beta_1^{(2)}$.

Индивидуальные изотермы могут быть представлены в виде

$$2,3 \lg \beta_1 c_1 = 2B_{11} \Gamma_1, \quad (22)$$

$$2,3 \lg \beta_2 c_2 = 2B_{22} \Gamma_2. \quad (23)$$

Вириальные коэффициенты B_{11} и B_{22} определяются по наклону индивидуальных координат $\Gamma - \lg c$, а константы адсорбционного равновесия экстраполяции этих изотерм до пересечения с осью абсцисс.

Зависимости $\Gamma_1 - \lg c_2^2$ при $c_1 = const$ и $\Gamma_2 - \lg c_1$ могут быть представлены в виде

$$2,3 \lg \beta_2^* c_2 = -2B_{12}^* \Gamma_1, \quad (24)$$

$$2,3 \lg \beta_1^* c_1 = -2B_{12}^* \Gamma_2, \quad (25)$$

$$\lg \beta_2^* = \lg \beta_2 - (B_{22} / B_{12}) \lg(\beta_1 c_1), \quad (26)$$

$$\lg \beta_1^* = \lg \beta_1 - (B_{11} / B_{12}) \lg(\beta_2 c_2), \quad (27)$$

$$B_{12}^* = B_{11} B_{22} / B_{12} - B_{12}. \quad (28)$$

Из соотношений (24)-(28) можно получить зависимости $\Gamma_1 - c_2$ и $\Gamma_2 - c_1$, при постоянной суммарной концентрации $c_1 + c_2 = const$.

После необходимых преобразований, имеем

$$\Gamma_1 = \frac{2,3 [\lg \beta_1 - (B_{12} / B_{22}) \lg \beta_2 c_2 + \lg c_1]}{2B_{11}^{(2)}}, \quad (29)$$

$$\Gamma_2 = \frac{2,3 [\lg \beta_2 - (B_{12} / B_{11}) \lg \beta_1 c_1 + \lg c_2]}{2B_{22}^{(1)}} \quad (30)$$

В данном случае рассмотрена только лишь модель адсорбции двух компонентов на поверхности сорбента. Вместе с тем, когда используется какой-то сорбент для решения экологического направления, то сорбируется не один и не два, а гораздо большее количество компонентов.

Нами сделана попытка решить задачу математического описания сорбции нескольких ионов металлов одним сорбентом. Модель сводится к следующему: так как ионы металлов имеют определенные отличительные признаки, связанные с их зарядом и ионным радиусом, то мы попытались использовать характеристику, которая носит название поляризационный потенциал, т.е. отношение заряда к квадрату ионного радиуса: $p = \frac{z}{r^2}$,

где r - радиус иона $\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ A \end{smallmatrix} \right)$, z - заряд иона.

Если это так, то энергия притяжения ионов сорбентом может быть в каждом случае оценена именно через эти характеристики. Суммарная константа сорбции многих ионов, записанная нами как K , может быть оценена через индивидуальные константы сорбции, которые записываются нами как общая константа сорбции, умноженная на коэффициента a_j , где $a_j = \frac{p_i}{\sum p_i}$.

Сложная задача моделирования сорбции i -компонентов может быть решена с использованием хорошо известных относительных поляризационных потенциалов.

Таблица 1

Шкала относительных поляризационных потенциалов некоторых ионов металлов

Ион	Потенциал	Ион	Потенциал	Ион	Потенциал	Ион	Потенциал
Li ⁺	0,40	Be ²⁺	1,01	B ³⁺	1,75	Ge ⁴⁺	1,91
Na ⁺	0,38	Mg ²⁺	0,83	Al ³⁺	1,31	Sn ⁴⁺	1,71
K ⁺	0,32	Ca ²⁺	0,66	Sc ³⁺	1,08	Pb ⁴⁺	1,78
Rb ⁺	0,31	Sr ²⁺	0,61	Y ³⁺	0,96	Mo ⁶⁺	2,77
Cs ⁺	0,29	Ba ²⁺	0,56	La ³⁺	0,84		
Ag ⁺	0,56	Pt ²⁺	1,01	Tl ³⁺	1,38		
Au ⁺	0,68	Ge ²⁺	0,88	As ³⁺	1,39		
		Sn ²⁺	0,181	Sb ³⁺	1,23		
		Pb ²⁺	0,83	Bi ³⁺	1,21		
		Zn ²⁺	1,01	Ga ³⁺	1,40		
		Cd ²⁺	0,95	Zn ³⁺	1,31		
		Hg ²⁺	1,07	Cr ³⁺	1,33		
		Mn ²⁺	0,55	Mn ³⁺	1,39		
		Fe ²⁺	0,59	Fe ³⁺	1,34		
		Co ²⁺	0,92	Co ³⁺	1,43		
		Ni ²⁺	0,95	Rh ³⁺	1,39		
		Si ²⁺	1,03				
		Pd ²⁺	1,02				

Сам подход такого типа получил экспериментальную проверку при изучении адсорбции ионов Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Fe^{2+} на сорбенте СВ-1.

Была изучена адсорбция ионов Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Fe^{2+} при температуре 25 °С. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

По полученным экспериментальным данным с использованием формулы
$$\Gamma = \frac{(C_0 - C) \cdot V \cdot A}{1000m}$$

находили сорбцию Γ . В данной формуле C_0 - исходная концентрация раствора металла в отдельном случае, C - его равновесная концентрация, A - атомная масса элемента, V - объем исследуемого раствора.

Таблица 2

Константы сорбции отдельных ионов, экспериментально найденные и рассчитанные с использованием предлагаемого приема

Экспериментальная суммарная константа $K \cdot 10^{-4}$	Индивидуальные константы, найденные экспериментальным путем $K \cdot 10^{-4}$	Индивидуальные константы, рассчитанные с использованием потенциалов $K \cdot 10^{-4}$	Относительная ошибка, % $\beta = \frac{K_{теор} - K_{эсп}}{K_{теор}} \cdot 100\%$
2,00	Pb^{2+} 0,35	Pb^{2+} 0,37	5,4
	Zn^{2+} 0,43	Zn^{2+} 0,45	4,4
	Cd^{2+} 0,41	Cd^{2+} 0,43	4,7
	Hg^{2+} 0,47	Hg^{2+} 0,48	2,1
	Fe^{2+} 0,27	Fe^{2+} 0,27	0

ра (10 см³). Затем были рассчитаны индивидуальные константы сорбции с использованием относительных поляризационных потенциалов, которые были сравнены с константами сорбции, найденными из экспериментальных данных для каждого отдельного случая. Значение относительной ошибки составило от 0 до 5,4, что доказывает достоверность теоретических и экспериментальных исследований. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Выводы.

1. Созданный математический аппарат на основе поляризационных представлений позволяет рассчитать константы при адсорбции как одного, так и нескольких веществ.

2. Сумма полярностей всех компонентов смеси позволяет рассчитать суммарную константу сорбции. Индивидуальная константа сорбции рассчитывается в зависимости от доли вещества и отношения полярности иона к сумме полярностей всех ионов.

3. Предложенные приемы расчета позволяют оценить долю проскока тех или других ионов металлов через пористые мембраны при опреснении воды обратным осмосом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айткулиев, Курбанкули. Влияние поверхностного заряда и структурных изменений воды в тонких порах мембран на обратнo-осмотическое разделение растворов электролитов: автореф. дис. ... канд. хим. наук [Текст] / Курбанкули, Айткулиев. - М., 1984.

2. Апельцин, И.Э. Опреснение воды [Текст] / И.Э. Апельцин, В.А. Клячко. - М.: Стройиздат, 1968. - 222 с.

3. Дерягин, Б.В. Теория обратного и капиллярного осмоса в тонкопористых мембранах [Текст] / Б.В. Дерягин, Г.А. Мартынов, В.М. Старов // Поверхностные силы и граничные слои жидкостей. - М.: Наука, 1983. - С. 138-162.

4. Дытнерский, Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация [Текст] / Ю.И. Дытнерский. - М.: Химия, 1978. - 352 с.

5. Зман, М.И. Разделение водных растворов обратным осмосом [Текст] / М.И. Зман // Химия и технология воды. - 1980. - Т. 2, вып. 2. - С. 107.

© **Боронина Л.В., 2013**