



УДК 541.012.3, 541.183

## Условия разделения растворенных веществ на полимерах с недиссоциирующими полярными группами

Ферапонтов Н.Б., Струсовская Н.Л.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Поступила в редакцию 30.08.2013 г.

### Аннотация

Рассмотрена принципиальная возможность разделения растворенных веществ гидрофильными полимерами с недиссоциирующими полярными группами: сшитым поливиниловым спиртом и сшитым полиакриламидом. Показано, что на таких полимерах можно разделять как катионы, так и анионы. Однако полученные в работе разделительные эффекты невелики. Проанализированы пути повышения разделительного эффекта.

**Ключевые слова:** гели полимеров, разделение, сорбция

We consider the principal possibility of separation of solutes on hydrophilic polymers with non-dissociating polar groups: cross-linked polyvinyl alcohol and cross-linked polyacrylamide. It is shown that such polymers can separate both cations and anions. The effects of separation are found to be small, and the ways for their improvement are analyzed.

**Keywords:** polymer gels, separation, sorption

### Введение

Применение ионитов для выделения отдельных компонентов из концентрированных водных растворов электролитов долгое время считалось неэффективным из-за необходимости частого проведения стадии регенерации. Однако еще в 60-е годы прошлого века в работе Хэтча и Дилона [1] было показано, что в некоторых случаях разделение на ионитах в колоннах можно проводить и без изменения ионной формы ионита, а значит и без регенерации. Детальное изучение причин этого явления было проведено значительно позже [2]. Была установлена причина, по которой полимерные гели на основе ионитов могут быть использованы в качестве экстрагентов при экстракции растворенных веществ из водных растворов [3-7]. При экстракции растворенного вещества полимерным гелем ионная форма ионита остается неизменной, а значит, отпадает необходимость в регенерации. В результате дальнейших исследований было показано, что для экстракции полимерами могут быть использованы не только иониты, но и другие сшитые гидрофильные полимеры [8, 9].

В принципе, экстракция возможна для полимеров с любыми типами полярных групп, в том числе и с недиссоциирующими полярными группами. При

контакте полимера с раствором полярные группы гидрофильных полимеров так же, как и их мономерных аналогов, могут образовывать с растворенными веществами различного типа координационные связи чаще всего водородные. В результате образуются координационные соединения (комплексы) с различной степенью устойчивости. Очевидно, что на устойчивость таких комплексов влияют как природа полярных групп, так и природа растворенных веществ. Кроме того, в ПГ на свойства образующихся комплексов влияет и то, что они находятся в зоне действия электрического потенциала полимерной молекулы (т.е. в слое Гельмгольца-Штерна). Все это необходимо принимать во внимание при описании процесса экстракции полимерами.

При комплексообразовании полярные группы в полимерах образуют координационные связи с растворенным веществом. Однако как показано в [10, 11], в сверхсшитых полимерах экстракционное разделение происходит и без их участия. Достаточно присутствия воды между близко расположенными полимерными молекулами. В этом случае на свойства воды, находящейся между полимерными цепями, влияет их близкое расположение. Поверхностное натяжение, возникающее на границе гидрофобный полимер – вода, изменяет активность воды в этом объеме по сравнению с активностью во внешнем растворе. Это различие и влияет на составы растворов, находящихся между полимерными молекулами и вне полимерной сетки.

Так как количество задач, связанных с выделением растворенных веществ из растворов постоянно увеличивается, то очевиден интерес к расширению перечня полимерных объектов, пригодных для безреагентного разделения колоночным методом.

В предлагаемой работе, в продолжение проведенных ранее исследований [8,9], на основании модельных представлений рассмотрены причины и условия разделения растворенных веществ на гидрофильных полимерах с недиссоциирующими полярными группами. К таким группам относятся: различные типы ОН-групп, первичные, вторичные и третичные амины, акриламид и др.

## **Теоретическая часть**

Полимерные гели, обладая нулевой текучестью, удобны для отделения их от жидкой фазы. При растворении (точнее набухании) сшитых гидрофильных полимеров полимерные цепи удаляются друг от друга на некоторое расстояние, определяемое сшивкой. В результате из сшитых полимерных молекул, окруженных сорбированными молекулами воды, образуется объемная полимерная сетка, ячейки которой заполняет внешний раствор [2]. При таком строении ПГ все полярные группы одинаково доступны для контакта с внешней фазой.

Возможность использования ПГ в качестве экстрагентов обусловлена существованием вокруг полимерных цепей устойчивой гидратной оболочки [12,13], в которой на активности всех присутствующих в ней компонентов оказывает влияние электрический потенциал полимерной цепи [14]. По этой причине в результате сорбции воды вдоль каждой полимерной цепи образуется слой Гельмгольца-Штерна, в котором активности компонентов отличаются от активностей в остальном объеме набухшего в растворе полимера [15].

Так как сшивки ограничивают расстояния, на которые полимерные цепи могут удалиться друг от друга, то объем находящегося в ячейках внешнего раствора ограничен. В то же время несмотря на незначительную толщину слоя Гельмгольца-

Штерна, которая обычно составляет несколько ангстрем, общий объем этого слоя в ПГ достаточно велик. В полимерах этот объем часто превышает объем внешнего раствора, проникшего в гель при набухании (таблица 1).

Таблица 1. Доли «свободной» и «связанной» воды в полимерных гелях, полученные изопиестическим и оптическим методами.

Полимер	$V_{\text{своб.}}, \%$	$V_{\text{связ.}}, \%$
КУ-2x8, $H^+$ - форма	25	75
АВ-17x8, $Cl^-$ - форма	47	53
КБ-4, $K^+$ - форма	20	80
ПААм	60	40
ПВС	72	28

Вода, находящаяся в слое Гельмгольца-Штерна испытывает влияние полярных групп, т.е. является компонентом раствора и ее активность отличается от активности чистой воды. Зная удельную сорбцию воды, ее активность в слое Гельмгольца-Штерна можно определить, с помощью уравнения Гиббса-Дюгема (1)

$$n_w d \ln a_w + n_{el} d \ln a_{el} = 0 \quad (1)$$

В то же время вода, находящаяся за пределами слоя, сохраняет свойства чистой воды.

Таким образом, в результате действия электрического потенциала полимерной молекулы активность воды в слое Гельмгольца-Штерна отличается от активности воды в остальном объеме набухшего в растворе полимера. При этом природа полярных групп может быть самой разной.

Чтобы определить активность воды в слое Гельмгольца-Штерна, зная ее активность во внешнем растворе, в работе [4] предложено выразить связь между активностями в этом слое и внешнем растворе через константу распределения воды  $K$ .

$$K = \frac{\bar{a}_w}{a_w} \quad (2)$$

где:  $\bar{a}_w$  - активность воды в слое Гельмгольца-Штерна;  $a_w$  - активность воды во внешнем растворе.

В тех случаях, когда в слой Гельмгольца-Штерна проникают растворенные вещества из внешнего раствора, их активности предложено вычислять, учитывая активность воды в этом слое и используя решения для расчета активностей растворенных веществ в многокомпонентных системах, предложенные в [16].

Из сказанного выше следует, что, во-первых, для разделения растворенных веществ по экстракционному механизму могут быть использованы сшитые полимеры с недиссоциирующими полярными группами и, во-вторых, активности компонентов в слое Гельмгольца-Штерна могут быть вычислены.

## Эксперимент

Экспериментальная проверка возможности разделения растворенных веществ на сшитых гидрофильных полимерах с недиссоциирующими полярными группами.

Устойчивое гетерофазное равновесие между внешним раствором и слоем Гельмгольца-Штерна, который далее будем называть полимерным раствором (ПР), а

также возможность отделения фазы ПР от внешнего раствора с помощью фильтрации позволяют использовать сшитые гидрофильные полимеры для разделения в колоннах. В этом случае создается возможность разделять и выделять в концентрированном виде значительные количества растворенных в исходном растворе веществ.

### 1. Разделение растворенных веществ на сшитом поливиниловом спирте (ПВС)

В экспериментах по разделению на гидрофильных полимерах с недиссоциирующими полярными группами вначале был исследован линейный полимер ПВС 18/11 (поливиниловый спирт), который сшивали эпихлоргидрином (ЭХГ) по методике, описанной в [17], дополненной стадией гранулирования. Для изучения влияния сшивки в раствор, содержащий 20 г линейного ПВС, добавляли либо 10 мл ЭХГ (ПВС-10), либо 20 мл ЭХГ (ПВС-20).

Основные удельные характеристики синтезированных образцов ПВС представлены в табл. 2. Среднюю молекулярную массу звена полимера определяли как молекулярную массу фрагмента ПВС, содержащего одну ОН-группу. Полученные при этом значения удельных величин  $e_v$  и  $e_m$  – количества ОН-групп в 1 мл и 1 г полимера приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные удельные характеристики сшитых ПВС-10 и ПВС-20

Название полимера	Ср.мол.масса, г	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$e_v$ , мг-экв/мл	$e_m$ , мг-экв/г
ПВС-10	54	1.251	23.2	18.5
ПВС-20	65	1.274	19.6	15.4

Оптическим методом и методом динамической десорбционной порометрии (ДДП) были определены удельные количества «свободной» и «связанной» воды в паре и воде. Было установлено, что в отличие от полимеров на основе стирола, сшитого дивинилбензолом, процент ЭХГ в сшитом ПВС не оказывает влияния на количество «связанной» воды. При этом общее количество воды в полимере, помещенном в воду, несколько различается. То есть сшивка влияет на количество «свободной» воды в геле. В таблице 3 приведены характеристики гелей ПВС-10 и ПВС-20, находящихся в равновесии с водой.

Таблица 3. Удельные количества воды в гелях ПВС, находящихся в равновесии с водой.

Название полимера	Объем сухого полимера, $V_g^o$ , мл	Объем ПР, $V_R^o$ , мл	Объем ПГ в воде, $V_g^o$ , мл
ПВС-10	43	240±5	843±5
ПВС-20	51	249±5	771±5

#### 1.1. Определение константы распределения воды в ПВС

Химические свойства ОН-групп в сшитом ПВС не должны отличаться от аналогичных свойств ОН-групп в растворе этанола, который является мономерным аналогом ПВС [18]. На основании справочных данных об активности воды в водно-

этанольных растворах и, зная удельную сорбцию воды поливиниловым спиртом, была определена константа распределения воды для данного полимера, которую вычисляли по уравнению (4). Ее величина оказалась равна:  $K_d^w = 0,91 \pm 0,01$ . Она показывает влияние природы полимерной молекулы на свойства окружающей ее воды.

### 1.2. Расчет объемов и составов фаз в геле ПВС колоночным методом.

Для установления причин индивидуального влияния природы растворенного низкомолекулярного соединения (НМС) на набухание геля необходимо знать количество растворенного вещества в геле и, как оно распределяется в его объеме. Эти данные получали колоночным методом. Он позволяет определить количество НМС в геле при равновесии с раствором известного состава. Далее, используя данные оптического метода, можно вычислить, какой объем занимает при этом гель. Объем геля в растворе заданного состава  $V_g^i$  рассчитывали отдельно для каждой концентрации.

$$V_g^i = \frac{V}{V_o} \cdot V_g^o \cdot E \quad (3)$$

где:  $V_g^o$  – объем 1 моля геля в воде;  $\frac{V}{V_o}$  – относительный объем геля в анализируемом растворе;  $E$  – количество  $\text{РОН}$ -групп (моль) в навеске полимера.

Величину  $V_g^i$  использовали для вычисления количества НМС в геле  $Q_g^i$ :

$$Q_g^i = Q_i - c_i(V_k - V_g^i) \quad (4)$$

где:  $Q_i$  – количество НМС в колонке (мг-экв);  $V_k$  – объем колонки, (мл).

Используя полученную величину  $Q_g^i$ , вычисляли концентрацию раствора электролита, находящего в геле:

$$c_i' = \frac{Q_g^i}{V_g^i - V_R^i} \quad (5)$$

где:  $V_R^i$  – объем фазы ПР в геле.

Было установлено, что, также как и в ионитах, концентрация НМС в геле  $c_i'$  часто превосходит концентрацию НМС, во внешнем равновесном растворе  $c_i$ . Этот результат подтвердил, что при равновесии с растворами НМС в сшитом ПВС присутствует фаза ПР, состоящая из полимера, сорбированной воды и растворенных НМС.

Далее вычисляли количество НМС в фазе ПР  $Q_j$ . Этот расчет проводили с учетом константы распределения воды  $K_d^w$

$$q_j = \frac{V_g^i - V_r - 0,018 \cdot E \cdot n_w - \frac{Q_g^i}{c_i}}{\frac{1}{c_j} - 0,018 \cdot n_w - \frac{1}{c_i}} \quad (6)$$

где:  $V_r$  – объем сухого полимера (мл);  $c_j = f(\bar{a}_w)$  – концентрация бинарного

раствора электролита в фазе ПР;  $\bar{a}_w = K_d^w \cdot a_w$ ;  $n_w$  – удельное количество воды, полученное из изотермы сорбции паров воды ПВС-20.

Вычисленная величина  $q_j$  необходима для расчета эффективности разделения веществ описываемым методом. По уравнению (11) вычисляли объем фазы ПР -  $V_R$  и на основании полученных результатов делали выводы о распределении компонентов между фазами.

$$V_R^i = V_k - \frac{Q_i - q_j^i}{c_i} \quad (7)$$

Расчеты показали, что зависимость количества растворенного вещества от его природы и концентрации в фазе ПР носит индивидуальный характер. Кроме того, было установлено, что проникновение НМС в фазу ПР приводит к увеличению объема геля ПВС. Вычисленные величины  $q_j$  были выборочно проверены по методике безреагентного разделения веществ.

### 1.3. Разделение электролитов гелем поливинилового спирта

В качестве примера приводится разделение смеси KCl-CaCl<sub>2</sub> (рис. 1). Через колонку, данные о которой приведены в таблице 4, снизу вверх пропускали раствор смеси KCl-CaCl<sub>2</sub> со скоростью 2 мл/мин. Фильтрат собирали в пробирки объемом 20 мл. В каждой пробирке определяли концентрации компонентов и по результатам анализов строили выходные кривые для каждого компонента. Полученные результаты показали, во-первых, то, что на геле ПВС можно осуществлять разделение, однако высокая степень набухания полимера, синтезированного по методике [17], и связанные с этим значительная деформируемость гранул и низкая обменная емкость повлияли на то, что эффективность разделения оказалась невелика. Все это привело к тому, что сорбционные фронты оказались сильно размыты.

Таблица 4. Параметры используемой ионообменной колонки и концентрации разделяемых веществ

Объем колонки ( $V_k$ ), мл	Объем полимера ( $V_r$ ), мл	Объем геля, ( $V_g$ ), мл	Диаметр колонки, см	Исх. концентрации KCl, н	Исх. концентрации CaCl <sub>2</sub> , н
240	12.5	190	3	0.69	2.95

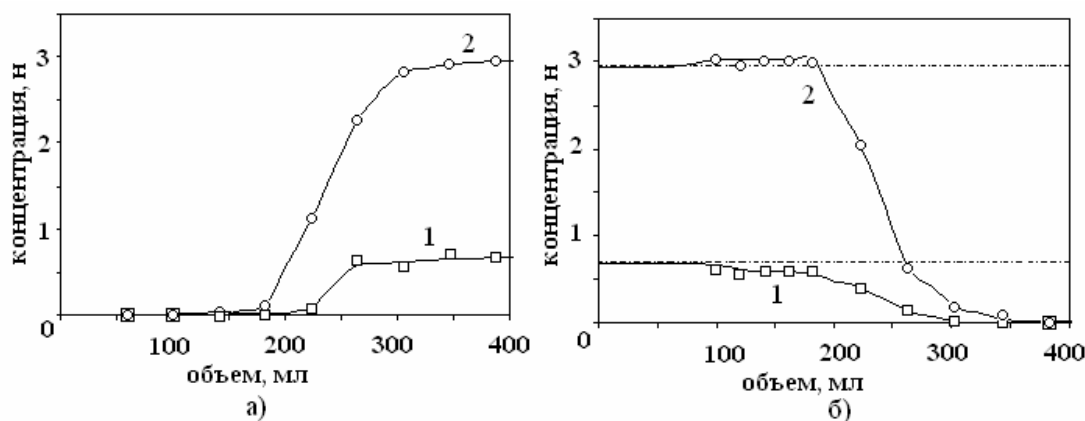


Рис. 1. Разделение смеси KCl (1) и CaCl<sub>2</sub> (2):  
а) прямой опыт; б) обратный опыт

В работе [8] приведены данные по сорбции гелем ПВС некоторых электролитов (рис. 2). Видно, что вычисленные по (8) объемы растворов электролитов, вытесненных из колонки, всегда больше объема колонки, приходящегося на жидкую фазу.

$$V = \frac{Q_i}{c_i} \quad (8)$$

Этот, на первый взгляд, парадокс означает, что концентрации электролитов в геле выше, чем во внешнем равновесном растворе. То есть гелем ПВС сорбируются все из приведенных в работе НМС. В этой же работе было проведено разделение смесей KCl-HCl и NaCl-KCl. По полученным результатам также был сделан вывод о нецелесообразности использования для разделения ПВС, синтезированного по данной методике. В этой работе также было предложено изменить методику синтеза с целью уменьшения степени набухания ПВС и повышения жесткости геля. Достичь этого можно, например, уменьшив длину молекулы сшивающего агента.

## 2. Сорбционные и разделительные свойства сшитого полиакриламида (ПААм)

Сшитый ПААм представляет собой полимер, состоящий из мономерных звеньев акриламида, сшитых N,N-метиленбисакриламидом. В растворах амидная группа проявляет слабоосновные свойства за счет неподеленной пары электронов на атоме азота. Набухший в воде или водном растворе сшитый ПААм представляет собой полимерный гель. Образование геля происходит за счет взаимодействия полярной амидной группы с растворителем. В концентрированных растворах сильных кислот и гидроксидов щелочных металлов амидные группы могут гидролизироваться [19], однако в растворах других соединений они достаточно устойчивы и не вступают в обменные реакции с растворенными веществами.

Степень набухания сшитого ПААм в растворах солей и других соединений может заметно различаться. В некоторых случаях степень набухания геля полимера увеличивается с ростом концентрации растворенных веществ. Это говорит о нехимическом взаимодействии их с полярными группами полимера. Данный результат представляет как практический, так и теоретический интерес, так как необменная сорбция растворенных веществ предоставляет возможность использования ПААм для разделения.

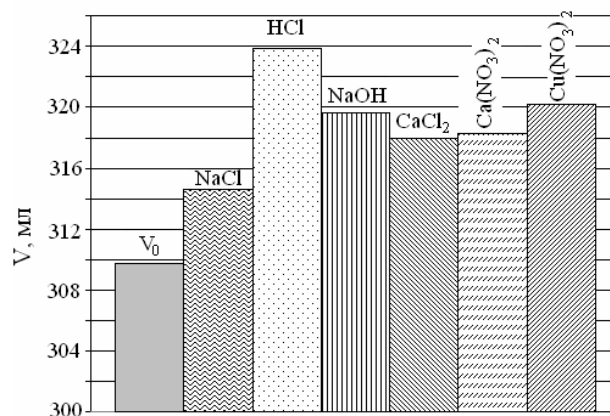


Рис. 2. Значения объемов, занимаемых растворами соответствующих электролитов по сравнению с объемом  $V_0$  – общим объемом воды в колонке при равновесии сорбента с водой

### 2.1. Разделительные свойства ПААМ

Сшитый гранулированный ПААМ получали радикальной сополимеризацией в дисперсионной среде (толуол). Методика получения гранулированного сшитого ПААМ описана в [20]. На рис. 3 представлены измеренные оптическим методом зависимости степени набухания гранул сшитого ПААМ в растворах низкомолекулярных электролитов от концентрации во внешнем растворе (KCl, LiCl, HCl, CH<sub>3</sub>COOH), соответственно. Хорошо видно, что в этих растворах степень набухания геля сшитого ПААМ больше, чем в воде, причем степень набухания зависит как от природы растворенного вещества, так и от его концентрации (см. рис. 3). Колоночный эксперимент проводили в цилиндрической колонке объемом 204 мл. Объем набухшего полимера составил 140 мл, масса и объем сухого полимера, содержащего 0,299 моля звена полимера ( $M_{\text{звена}}=71$  г/моль), равны соответственно 21 г и 16,3 мл. Были исследованы растворы KCl ( $c=0,24 - 3,40$  н), LiCl ( $c=0,259-4,890$  н), HCl ( $c=0,095 - 3,400$  н), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> ( $c=0,66 - 4,96$  н). Вычисленные значения объемов, занимаемых растворами в колонке для разных концентраций одного и того же вещества, представлены на графике. Увеличение степени набухания геля в растворе по сравнению с водой, говорит о том, что растворенное вещество проникает в фазу ПР.

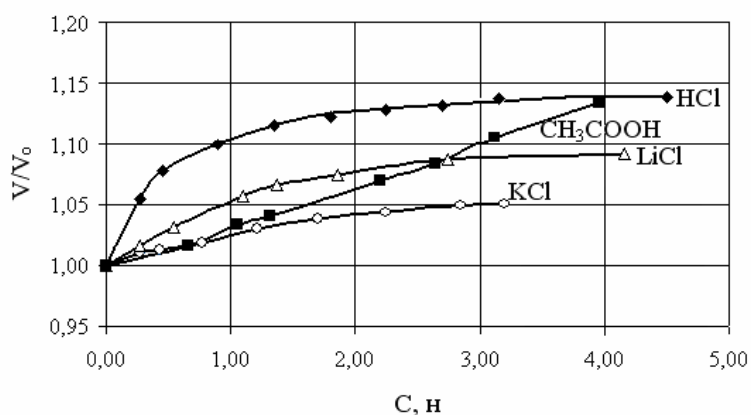


Рис. 3. Зависимость степени набухания сшитого ПААМ от концентрации растворов



По результатам анализов для каждой концентрации вычисляли количество исследуемого вещества в колонке и в геле. На основании данных, полученных оптическим, колоночным и ДДП методами, были построены изотермы сорбции электролитов фазой ПР (рис. 4).

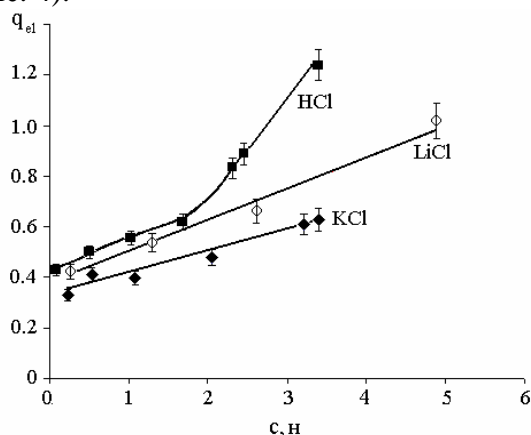


Рис. 4. Изотермы сорбции электролитов шитым ПААМ

С использованием приведенных изотерм для смешанного раствора HCl и KCl ( $c_{\text{HCl}}=0,55$  н и  $c_{\text{KCl}}=0,70$  н) был оценен разделительный эффект на шитом ПААМ. С учетом количества полимера в колонке по (9) и (10) определяли количества электролитов в фазе ПР. Затем по (11) определяли количество электролита, поглощенное полимером, и далее по (12) определяли объем кислоты, который может быть выделен в данном случае. По результатам вычислений  $\Delta V = 12,7$  мл.

$$q_{\text{HCl}} = n_{\text{HCl}} E \quad (9)$$

$$q_{\text{KCl}} = n_{\text{KCl}} E \quad (10)$$

$$\Delta q = q_{\text{HCl}} - q_{\text{KCl}} \quad (11)$$

$$\Delta V = \Delta q / c \quad (12)$$

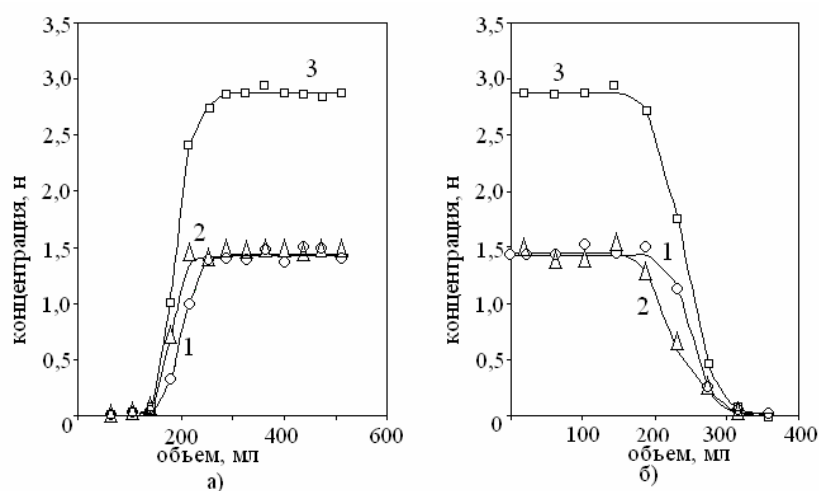


Рис. 5. Результаты по разделению растворенных веществ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и  $(\text{NH}_2)_2\text{SO}_4$  на ПААМ колоночным методом: прямой опыт (а), обратный опыт (б). 1 – концентрация  $\text{Cl}^-$ ; 2 – концентрация  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 3 – концентрация  $\text{NH}_4^+$

Для проверки адекватности расчетов и применимости модели был проведен эксперимент по разделению раствора соляной кислоты и хлорида калия шитым

ПААм на колонке. Разница между серединами фронтов соляной кислоты и хлорида калия составила  $13 \pm 3$  мл. Таким образом, полученные результаты подтвердили адекватность описания строения сшитого ПААм.

Далее для изучения возможности разделения анионов в этой же колонке был проведен эксперимент по разделению хлорида и сульфата аммония. Смешанный раствор состава:  $c_{\text{NH}_4\text{Cl}} = 1,4 \text{ н}$  и  $c_{(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4} = 1,4 \text{ н}$  пропускали через колонку со скоростью (2 мл/мин). Как видно на рис. 5, в этом случае также было получено небольшое разделение пропускаемой смеси.

### Заключение

Представленные в работе результаты подтверждают возможность использования гидрофильных полимеров с недиссоциирующими полярными группами в качестве экстрагентов при выделении растворенных веществ из смешанных растворов. Показано, что на таких полимерах можно разделять как катионы, так и анионы. Принимая во внимание большое количество как синтетических, так и природных полимеров, содержащих недиссоциирующие полярные группы разной природы, данное направление исследований можно считать перспективным. В то же время из этих результатов следует, что полученные в работе разделительные эффекты невелики.

Основной причиной, снижающей эффективность разделения, является высокая степень набухания гелей исследованных полимеров. В результате заметно снижается количество полярных групп в единице объема, что вызывает необходимость увеличивать объем колонны. Кроме того, гранулы с высокой степенью набухания легко деформируются. Это приводит к увеличению гидродинамического сопротивления слоя и увеличению размеров сорбционных фронтов. Все это затрудняет использование таких полимеров в колоннах. Замена природы и (или) увеличение количества сшивающего вещества, а также изменение условий синтеза должны устранить указанные недостатки. Не исключено, что эти изменения повлияют и на величину константы распределения и, соответственно, на величину разделительного эффекта.

Как видно на рис. 2 и 4, сорбция всех исследованных электролитов гелями ПВС и ПААм достаточно велика. Нехорошо то, что влияние природы растворенного вещества мало различимо. Повышения селективности можно добиться, например, путем прививки к полимеру полярных групп другой природы. Это усложнит расположение координационных связей и тем самым повысит избирательность сорбции.

Еще одной причиной, влияющей на сорбцию растворенных веществ, является природа полимерной цепи. В качестве примера можно привести полисахариды. Полимеры на их основе достаточно широко используются в хроматографии, но результатов, говорящих о возможности их применения в данном способе разделения пока нет, возможно, в связи с недостаточной изученностью в целях рассматриваемого разделения.

## Список литературы

1. Hatch M.J., Dillon J.A. Acid retardation. A simple physical method for separation of strong acids from their salts// I&EC Process Design and Development. 1963. V.2. №4. P. 253-263.
2. Ферапонтов Н.Б. Модель для описания параметров растворов сшитых полиэлектролитов, их экспериментальная проверка и применение// Дисс... докт. хим. наук. М., МГУ. 2001.
3. Ферапонтов Н.Б., Горшков В.И., Тробов Х.Т., Парбузина Л.Р., Гавлина О.Т., Струсовская Н.Л. Безреагентное разделение электролитов на ионитах// Журн. физ. химии. 1996. Т.70. № 5. С. 904-907.
4. Ferapontov N. B., Gorshkov V. I., Parbuzina L. R., Trobov H. T., Strusovskaya N. L. Heterophase model of swollen cross-linked polyelectrolyte// React. Funct. Polym. 1999. V.41. P. 213-225.
5. Ферапонтов Н.Б., Горшков В.И., Парбузина Л.Р., Гавлина О.Т., Струсовская Н.Л., Тробов Х.Т. Ионитно – экстракционный способ разделения электролитов. Теория и эксперимент// Теория и практика сорбционных процессов: Сб. статей/ Под ред. Г. А. Чикина. Воронеж. 1998. Вып. 23. С.10-24.
6. Парбузина Л.Р., Ферапонтов Н.Б., Горшков В.И., Тробов Х.Т., Струсовская Н.Л., Гавлина О.Т., Гагарин А.Н. Ионитно-экстракционный способ разделения. Описание и расчет производительности// Сорбционные и хроматографические процессы. 2001. Т.1. Вып. 3. С. 518-520.
7. Подгорная Е.Б., Крачак А.Н., Хамизов Р.Х. Использование сорбционного способа разделения растворов кислот и их солей в системах с двумя жидкими фазами для решения проблем пробоподготовки в анализе. // Сорбц. хроматогр. процессы. 2011. Т. 1. Вып. 1. С. 99-110.
8. Груздева А.Н., Горшков В.И., Гагарин А.Н., Ферапонтов Н.Б. Сорбционное разделение электролитов на поперечно сшитом поливиниловом спирте.// Журн. физ. химии. 2005. Т.79. №7. С.1325-1327.
9. Кавалерская Н.Е., Струсовская Н.Л., Ферапонтов Н.Б. Кинетика набухания и сорбционные свойства геля сшитого полиакриламида// Сорбционн. и хроматогр. процессы. 2009. Т.9. Вып.6. С. 796-804.
10. Ферапонтов Н.Б., Струсовская Н.Л. Применение сверхсшитых полимерных сорбентов для выделения веществ из водных растворов.// Сорбционные и хроматографические процессы. 2001. Т.1. Вып. 3. С. 536-538.
11. Tsyurupa M.P., Davankov V.A., Ferapontov N.B., Gruzdeva A.N., Strusovskaya N.L. Sorption of water and electrolytes by ion exchange resins and neutral sorbents with hypercrosslinked polystyrene matrix// Ion exchange technology for today and tomorrow (Proceedings of IEX2004) / Ed. By M. Cox. SCI. 2004. P. 339-346.
12. Березина Н.П., Карпенко Л.В. Перколяционные эффекты в ионообменных материалах.// Коллоидн. журн. 2000. Т.62. №6. С.1-9.
13. Mauritz K.A., Hopfinger A.J. Structural Properties of Membrane Ionomers/ in Modern Aspects in Electrochemistry/Eds.: J.OM. Bockris and B. E. Conway.- 1982. V.14., Plenum, N.-Y., 425 p.
14. Корыта И. «Ионы, электроны, мембраны» М. Мир, 1983. 270с.
15. В.И. Ролдугин «Физикохимия поверхности». Долгопрудный.»Интеллект».2008. 565с.
16. Микулин Г.И., Вознесенская И.Е. Теория смешанных растворов электролитов, подчиняющихся правилу Здановского. Часть I. Растворы двух солей с общим

ионом// Вопросы физической химии растворов электролитов: Сб. статей/ Под ред. Г.И. Микулина. Л.: Химия 1968. С. 304-329.

17. Ямсков И.А., Буданов М.В., Даванков В.А. Гидрофильные носители на основе поливинилового спирта для иммобилизации ферментов//Биоорг. химия. 1979. Т. 5. №11. С. 1728-1734.

18. Днепровский А.С., Темникова Т.И. Теоретические основы органической химии. 2-е издание. - Л.: Химия, 1991. 560 с.

19. Travas-Sejdic J., Eastal A.J. Equilibrium swelling of poly(AAM-co-AMPS) gels in surfactant solutions// Polymer. 2000. V.41. P. 7451-7458.

20. Кавалерская Н.Е., Ферапонтов Н.Б. Поведение сшитого полиакриламида в растворах низкомолекулярных электролитов// Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9. Вып. 3. С. 433-440.

---

**Ферапонтов Николай Борисович** - д.х.н., вед. научн. сотр., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра физической химии, Москва, тел. (495) 939 40 19

**Струсовская Надежда Львовна** - к.х.н., ст. научн. сотр., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра физической химии, Москва

**Ferapontov Nikolay B.** - Doctor of Sciences, Senior Researcher, Moscow M.V. Lomonosov State University, Chemistry Department, Division of Physical Chemistry. Postal address: Chemistry Department, Moscow State University, Moscow, e-mail: [n.ferapontov@phys.chem.msu.ru](mailto:n.ferapontov@phys.chem.msu.ru)

**Strusovskaya Nadezhda L.** - PHD, Senior Researcher, Moscow M.V. Lomonosov State University, Chemistry Department, Division of Physical Chemistry. Postal address: Chemistry Department, Moscow State University, Moscow