



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12123

### Упруго-пластические свойства ионообменников на основе сшитых полиэлектролитов

**Екатерина Анатольевна Карпюк<sup>1</sup>, Александр Валерианович Пастухов<sup>2</sup>,  
Ольга Тихоновна Гавлина<sup>1</sup>, Сергей Игоревич Каргов<sup>1</sup>,  
Владимир Александрович Иванов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,  
minilana@mail.ru

<sup>2</sup>Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

**Аннотация.** В настоящей работе дилатометрически изучены упруго-пластические свойства сферических зерен промышленных слабокислотных и сильнокислотных ионитов в опытах с постоянным одноосным сжатием и последующей разгрузкой при комнатной температуре в зависимости от ионной формы и концентрации раствора электролита.

Показано, что ионная форма полиакрилата и полиметакрилата, сшитых, соответственно, диметакрилатом триэтиленгликоля и дивинилбензолом, и концентрация внешнего раствора влияют на их упруго-пластические свойства. В разбавленных растворах хлорида натрия и хлорида кальция гели проявляют упругие свойства с близкими относительными амплитудами деформирования. Амплитуда деформирования зерна полиметакрилата, сшитого дивинилбензолом, в Ni-форме в разбавленном растворе хлорида никеля оказалась значительно ниже, чем у Ca-формы, со значительным вкладом пластической деформации. С увеличением концентрации внешнего раствора хлоридов кальция и никеля под действием механической нагрузки на зерно полиметакрилата, сшитого дивинилбензолом, уменьшалась общая деформация гранулы, а также величина упругой деформации, а остаточные (пластические) деформации увеличивались. В концентрированных растворах CaCl<sub>2</sub> и NiCl<sub>2</sub> такой ионит становился неупругим жестким материалом, для которого даже при повышенных механических нагрузках величина упругих деформаций сжатия очень невелика.

Для набухшего в воде сильнокислотного полистирольного катионита с привитыми сульфогруппами, сшитого дивинилбензолом, в K-форме также характерны упругие деформации, т.е. полимер находится в высокоэластическом состоянии. Однако полистирольная матрица более жесткая по сравнению с полиакриловыми и полиметакриловыми катионитами в форме иона щелочного металла, поэтому амплитуда деформирования существенно меньше. Для такого катионита в Ca- и Ni-формах даже в концентрированных растворах преобладающими являются упругие деформации.

**Ключевые слова:** слабокислотные и сильнокислотные иониты, упруго-пластические свойства, дилатометрия.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках госзадания (тема № 121031300090-2)

**Для цитирования:** Карпюк Е.А., Пастухов А.В., Гавлина О.Т., Каргов С.И., Иванов В.А. Упруго-пластические свойства ионообменников на основе сшитых полиэлектролитов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 2. С. 170-179. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12123>

Original article

### Elastoplastic properties of ion exchangers based on cross-linked polyelectrolytes

**Ekaterina A. Karpyuk<sup>1</sup>, Alexander V. Pastukhov<sup>2</sup>, Olga T. Gavlina<sup>1</sup>,  
Sergey I. Kargov<sup>1</sup>, Vladimir A. Ivanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, minilana@mail.ru

<sup>2</sup>Nesmeyanov Institute of Organo-Element Compounds of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

© Карпюк Е. А., Пастухов А. В., Гавлина О. Т., Каргов С. И., Иванов В. А., 2024



**Abstract.** In this paper, we dilatometrically studied the elastoplastic properties of spherical grains of industrial weakly acidic and strongly acidic ion-exchanger in experiments with constant uniaxial compression and a subsequent unload at room temperature, depending on the ionic form and concentration of the electrolyte solution. It was found that the ionic form of polyacrylate and polymethacrylate cross-linked with triethylene glycol dimethacrylate and divinylbenzene, respectively, and the concentration of the external solution affects their elastoplastic properties. In dilute solutions of sodium chloride and calcium chloride, the gels exhibited elastic properties with close relative amplitudes of deformation. The amplitude of deformation of the grain of polymethacrylate crosslinked with divinylbenzene, in the Ni form, in a dilute nickel chloride solution was significantly lower than that of the Ca form, with significant plastic deformation. With an increasing concentration of the external solution of calcium and nickel chlorides under mechanical load on the grain of polymethacrylate cross-linked with divinylbenzene, the total deformation of the granule and the magnitude of elastic deformation decreased, while the residual (plastic) deformations increased. In concentrated solutions of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{NiCl}_2$ , such an ion-exchanger became an inelastic rigid material. Even under increased mechanical load, the magnitude of its elastic compressive deformation was very small.

The K-form of a swollen in water strongly acidic polystyrene cation-exchanger with grafted sulpho groups cross-linked with divinylbenzene is also characterized by elastic deformations, i.e. the polymer is in a highly elastic state. However, the polystyrene matrix is more rigid compared to polyacrylic and polymethacrylic cation-exchangers in the alkali metal ion form, so the amplitude of deformation is significantly smaller. For such a cation-exchanger in Ca- and Ni- forms, elastic deformations prevail even in concentrated solutions.

**Keywords:** weakly acidic and strongly acidic ion-exchangers, elastoplastic properties, dilatometry.

**Acknowledgements:** the work was completed within the framework of the state task (topic No. 121031300090-2)

**For citation:** Karpyuk E.A., Pastukhov A.V., Gavlina O.T., Kargov S.I., Ivanov V.A. Elastoplastic properties of ion exchangers based on cross-linked polyelectrolytes. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(2): 170-179. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12123>

## Введение

Механическая прочность и осмотическая стабильность являются очень важными характеристиками ионообменных смол, так как они определяют потери ионита при его длительной эксплуатации. Известно, что наибольшие проблемы создаются так называемой осмотической нестабильностью вследствие изменения объема зерен при изменении солесодержания, pH внешней среды и ионной формы. Зерна ионита способны выдерживать лишь определенное число циклов таких изменений, в результате чего происходит их раскалывание на мелкие осколки. В результате в промышленных ионообменных процессах очистки природных вод и конденсатов ежегодно приходится заменять значительное количество используемых ионообменников. В то же самое время считается, что ионообменные смолы являются весьма прочными с точки зрения прямого механического воздействия нагрузки на отдельные зерна, а также они не склонны к механи-

ческому истиранию. Поэтому исследованию их механических свойств уделялось значительно меньшее внимание, хотя с упруго-пластическими свойствами связаны и осмотическая нестабильность, и кинетическое поведение ионитов. Можно упомянуть лишь небольшое количество работ [1-4], в которых измерялись характеристики эластичности зерен ионита и ионообменных мембран при воздействии на них нагрузки.

В настоящей работе изучены упруго-пластические свойства ряда ионитов от ионной формы и концентрации раствора электролита. В отличие от всех предыдущих работ внимание уделено поведению зерен не только под действием нагрузки, но и после разгрузки.

## Экспериментальная часть

Упруго-пластические свойства зерен ионитов в растворах электролитов при постоянном одноосном сжатии изучали при комнатной температуре dilatометрическим методом на универсальном испытательном приборе УИП-70 (рис. 1), совмещенном с компьютером, в котором

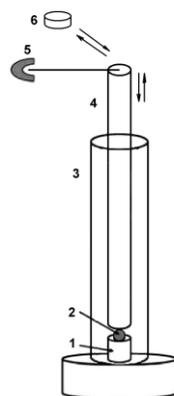


Рис. 1. Оборудование для регистрации изменения размеров набухшего полимерного зерна при нагружении: 1 – кварцевый держатель, 2 – набухшее полимерное зерно, 3 – стеклянная трубка, 4 – кварцевый скользящий стержень, 5 – датчик механического движения, 6 – нагрузка.

Fig. 1. Equipment to record changes in the size of swollen polymer grain under load:  
1 – quartz holder, 2 – swollen polymer grain, 3 – glass tube, 4 – quartz sliding rod,  
5 – mechanical motion sensor, 6 – load

накапливаются цифровые данные по изменению диаметра гранулы. Ранее в работах [5-8] было описано использование данного прибора для исследования процессов набухания зерен сверхсшитых полистирольных сорбентов и ионообменных смол.

В настоящей работе были исследованы образцы ионообменников на основе сшитых полиэлектролитов. Список исследованных полимеров включает следующее. КБ-4П2 – гелевый слабокислотный полиметакрилатный катионит, сшитый дивинилбензолом (около 1 моль сшивок на 60 моль метакриловых мономеров). КБ-2э3 – слабокислотный полиакрилатный гелевый катионит, сшитый диметакрилатом триэтиленгликоля (около 1 моль сшивок на 100 моль акриловых мономеров). КУ-2х8 – промышленный гелевый сульфокислотный полистирольный катионит, сшитый дивинилбензолом (6 вес.% или 1 моль сшивок на 14 моль стирольных мономеров).

Все образцы были промыты горячей водой и этанолом для удаления остатков адсорбированных поверхностно-активных веществ и экстракции других возможных выщелачиваемых веществ из по-

лимеров. Для измерений под микроскопом отбирались бездефектные сферические зерна диаметром (измеренным под микроскопом) 0.25-0.5 мм в случае КБ-4П2 и КБ-2э3 и 0.8-1.0 мм в случае КУ-2х8. Гранулу набухшего в определенном растворе полимера помещали в специально выточенное в кварцевой пластине сферическое углубление. На пластину с образцом наносили порцию равновесного с данным ионитом раствора электролита или воды объемом  $\sim 0.02-0.03$  см<sup>3</sup>. Далее осуществляли одноосное сжатие гранулы кварцевым штоком с торцевой плоской поверхностью при определенной нагрузке. Регистрировали кривую изменения вертикального диаметра набухшей гранулы во времени при данной нагрузке (с точностью 1 мкм). После того, как диаметр гранулы переставал изменяться, нагрузку снимали, продолжали регистрировать кривую изменения диаметра гранулы во времени. Для каждой гранулы кривые «нагрузка – разгрузка» снимали для последовательно увеличивающихся нагрузок (5, 10, 20, 50, 100 или 200 г). Также для каждого ионита, равновесного с определенным раствором, отбирали не

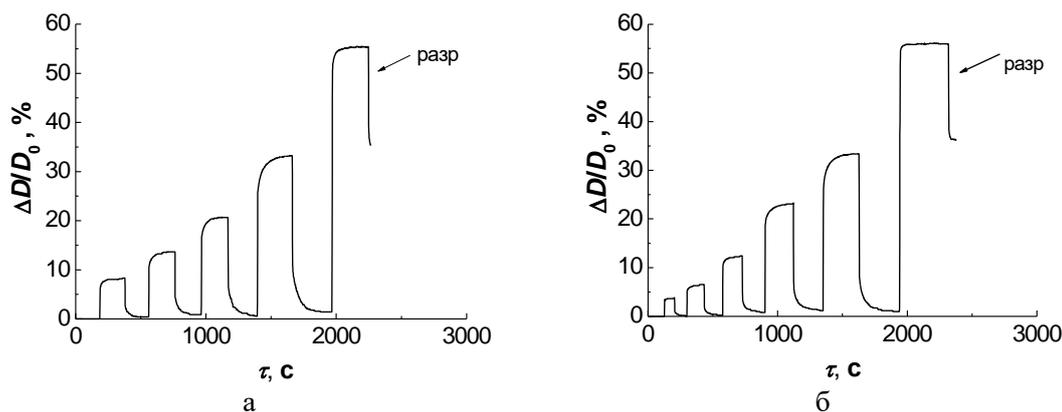


Рис. 2. Кривые изменения вертикального диаметра набухших сферических гранул ионитов КБ-2э3 (а) и КБ-4П2 (б) в Na-форме во времени при последовательной нагрузке (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Н (а) и 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 2.0 Н (б)) и последующем снятии нагрузки.

Fig. 2. Curves of changes in the vertical diameter of swollen spherical granules of the KB-2e3 (a) and KB-4P2 (b) ion-exchangers in Na-form over time under successive load (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, and 1 N (a) and 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, and 2.0 N (b)) and subsequent unload

менее 3-х гранул и для них проводили однотипные измерения. В некоторых случаях эксперименты завершались разрушением гранул при максимальной нагрузке.

### Обсуждение результатов

При испытаниях на одноосное сжатие гранул сферической формы проявилось различие в механическом поведении ионитов в зависимости от ионной формы и концентрации внешнего раствора.

Для полиакрилового и полиметакрилового ионитов в Na-форме, набухших в воде, характерно упругое деформационное поведение. При нагрузке диаметр гранулы по оси сжатия уменьшается во времени, пока не установится постоянное для данной нагрузки значение. Это хорошо видно на графике зависимости деформации сферы по оси сжатия ( $\Delta D_\tau/D_0 = (D_0 - D_\tau)/D_0$ , где  $D_0$  – исходный диаметр гранулы,  $D_\tau$  – размер гранулы в момент времени  $\tau$  по оси сжатия) от времени при периодическом нагружении и снятии нагрузки (рис. 2). С увеличением величины сжимающего усилия деформации пропорционально увеличиваются, но при этом остаются обратимыми после разгрузки. Остаточные (пластические или необратимые)

деформации не превышают 1 %, т. е. точности измерений линейных деформаций в используемом экспериментальном методе. Таким образом, набухшие в воде катиониты КБ-4П2 и КБ-2э3 в Na-форме являются типичными эластомерами с характерными упругими деформациями, т. е. полимерами в высокоэластическом состоянии.

Для таких набухших ионитов в широком диапазоне нагрузок зависимости установившихся деформаций  $\varepsilon_\infty = (D_0 - D_\infty)/D_0$  ( $D_\infty$  – установившийся постоянный для данной нагрузки диаметр по оси сжатия) от величины усилия сжатия  $F$  нелинейны, но в области высоких нагрузок просматриваются линейные участки (рис. 3). Такая форма зависимости определяется сферической геометрией деформируемой частицы. Особенность деформирования сферической частицы при воздействии на нее груза с плоской поверхностью заключается в том, что площадь контакта в процессе деформирования изменяется и деформация сферы неоднородная [9]. Наиболее сильно деформируются участки сферы на периферии гранулы и в меньшей степени ближе к центру. При относительно малых нагрузках, когда площадь контакта невелика, деформация сильнее

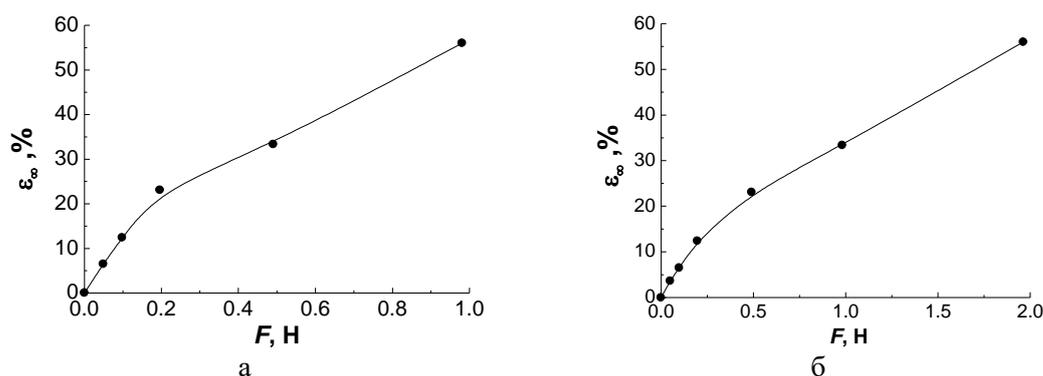


Рис. 3. Изохронные кривые деформаций сжатия ионитов КБ-2э3 (а) и КБ-4П2 (б) в Na-форме, построенные по результатам испытаний периодического деформирования.  
Fig. 3. Isochronous compression curves of KB-2e3 (a) and KB-4P2 (b) ion-exchangers in Na-form, based on the results of periodic deformation tests

зависит от величины нагрузки и зависимость  $\varepsilon_{\infty}$  от  $F$  круче, чем в области больших нагрузок. В то же время в области больших нагрузок, когда сферическая частица деформирована («сплющена») достаточно сильно, площадь контакта изменяется с нагрузкой относительно слабо и поэтому участок зависимости  $\varepsilon$  от  $F$  становится близким к линейному.

Для Ca-формы ионита КБ-4П2 в разбавленном 0.005 н растворе  $\text{CaCl}_2$  амплитуда деформирования оказалась достаточно большой, как и для Na-формы, но значительно больше, чем для Ni-формы (осевые деформации не превышают 10%), что говорит о значительно более жесткой структуре полимера в Ni-форме (рис. 4 а, б). Вероятно, это связано с тем, что по сравнению с  $\text{Ca}^{2+}$  у иона  $\text{Ni}^{2+}$  более ярко проявляется способность к образованию комплексных и хелатных соединений, свойственная всем переходным металлам. Ионный радиус  $\text{Ni}^{2+}$  (0.7 Å) меньше радиуса  $\text{Ca}^{2+}$  (0.94 Å) (помимо дефектности  $d$ -оболочки ионов никеля), поэтому увеличивается его поляризующее влияние и соответственно повышается прочность связи комплексообразующего иона никеля с функциональными группами катионита, в частности с карбоксилсодержащими ионитами [10].

В области небольших нагрузок, до 0.2 Н ионит КБ-4П2 в Ca-форме ведет себя как эластомер с преобладанием упругих

деформаций, но при повышенных нагрузках становится заметным развитие деформаций, характерных для вязкоупругих материалов. Наблюдается плавное увеличение во времени общей деформации (рис. 5 а) и нелинейный характер изохронных кривых (рис. 5 а). Ионит КБ-4П2 в Ni-форме в разбавленных солевых растворах отличается невысоким уровнем упругих деформаций (не более 7%) даже при значительных усилиях сжатия (рис. 5 б), поэтому физическое состояние ионита, по-видимому, следует считать подобным стеклообразному состоянию ненабухших полимеров.

С увеличением концентрации внешнего раствора ( $\text{CaCl}_2$  в одном случае и  $\text{NiCl}_2$  в другом случае) под действием механической нагрузки на образец уменьшалась общая деформация гранулы КБ-4П2 в конце периода нагружения (рис. 4 в, г и 5 а, б), а также величина упругой деформации. При этом более ярко проявлялось вязкоупругое деформационное поведение таких набухших полимеров, когда мгновенно-упругие деформации уменьшаются, а остаточные (пластические) деформации увеличиваются.

Видно, что упруго-пластические свойства зависят от вида противоиона и концентрации раствора, которые оказывают влияние на влагосодержание ионита и на объем зерна ионита. Поглощение воды

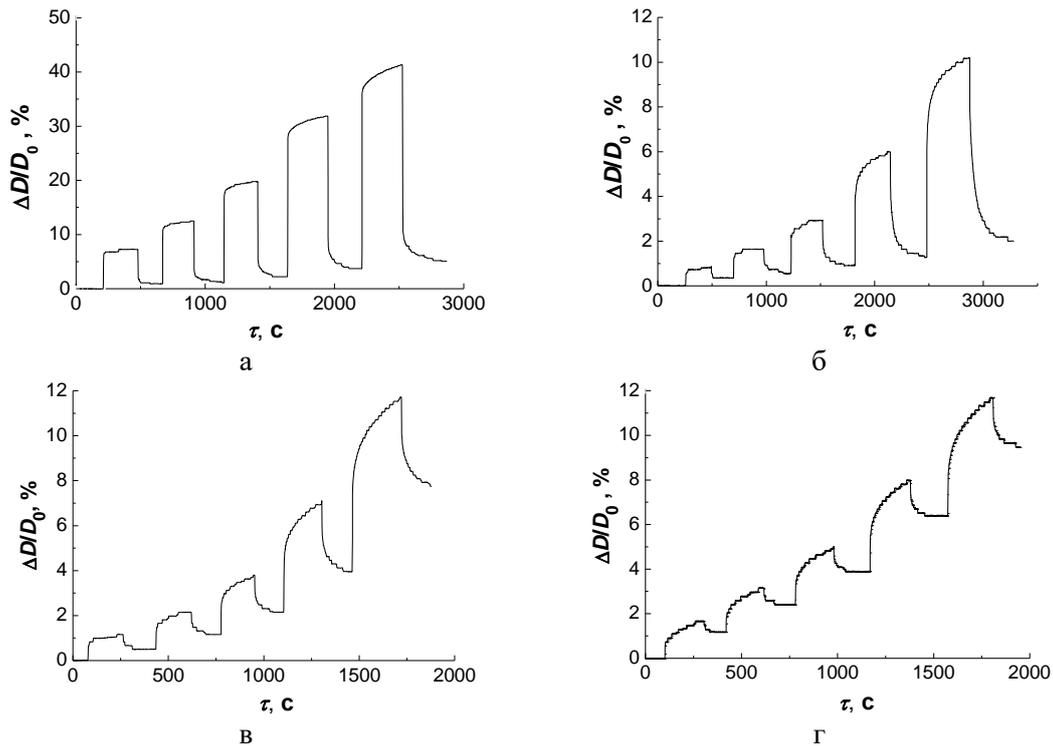


Рис. 4. Кривые изменения вертикального диаметра набухших сферических гранул ионитов и КБ-4П2 в Са-форме (а и в) и в Ni-форме (б, г) набухших в 0.005 н (а, б) и в 3.8 н (в, г) растворах хлоридов кальция и никеля соответственно, во времени при нагрузке (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Н) и последующем снятии нагрузки.

Fig. 4. Curves of changes in the vertical diameter of spherical ion-exchanger granules of the KB-4P2 ionite in Ca-form (a and c) and in Ni-form (b, d) swollen in 0.005 n (a, b) and in 3.8 n (c, d) calcium and nickel chloride solutions, respectively, over time under load (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, and 1 N) and subsequent unload

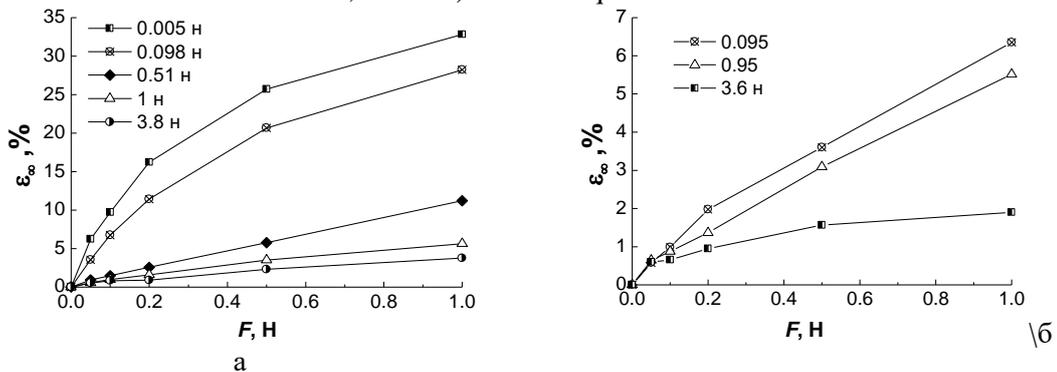


Рис. 5. Изохронные кривые деформаций сжатия ионита КБ-4П2 в Са- (а) и Ni-формах (б) для разных концентраций раствора

Fig. 5. Isochronous compression curves of the KB-4P2 ion-exchanger in Ca- (a) and Ni-forms (b) at different solution concentrations

ионитами исследовались во многих работах. Например, в книге [11] приведены данные, которые показывают, что катионит КБ-4П2 в Н-, Na- и Са- поглощает, соответственно, 6.93, 14.7 и 8.8 г-моль воды/г-экв ионита. В таблице приведены

наши результаты измерения относительных объемов зерен ионита КБ-4П2 в различных условиях.

Эти данные еще раз подтверждают известный факт, что перевод полиметакрилового катионита из натриевой формы в форму двухзарядного иона приводит к

Таблица 1. Относительные объёмы зерна ионита КВ-4П2 в различных условиях  
 Table 1. Relative grain volumes of the KB-4P2 ion-exchanger under different conditions

R-Na		R-Ca		R-Ni		
сухое	в воде	0.005 н CaCl <sub>2</sub>	3.6 н CaCl <sub>2</sub>	0.005 н NiCl <sub>2</sub>	1.0 н NiCl <sub>2</sub>	3.6 н NiCl <sub>2</sub>
0.49	1.0	0.70	0.68	0.78	0.72	0.69

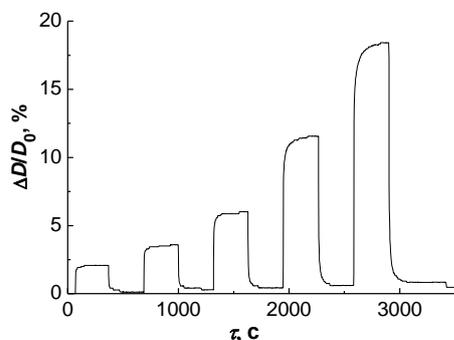


Рис. 6. Кривые изменения вертикального диаметра набухших в воде сферических гранул ионита КУ-2х8 в К-форме во времени при последовательной нагрузке (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Н) и последующем снятии нагрузки

Fig. 6. Curves of changes in the vertical diameter of spherical granules of the KU-2x8 ionite swollen in water in K-form over time under successive load (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, and 1 N) and subsequent unload

значительному сжатию зерна. Увеличение концентрации раствора также снижает объем зерна, но уже слабее. Различие объема зерна в Са- и Ni-формах незначительное. Таким образом, в форме двухзарядных ионов жесткость полимера выше. При этом снижается величина деформации и медленнее происходят конформационные перестройки полимерной сетки под влиянием изменяющейся нагрузки (растет доля остаточных деформаций). Также наглядно проявляется и более высокая жесткость системы, существенно упрочненной более стабильными мостиками комплексов никеля: их способность к деформированию ниже, а доля остаточных деформаций выше, чем у ионитов в Са-форме.

Таким образом, в концентрированных растворах СаCl<sub>2</sub> и NiCl<sub>2</sub> ионит КВ-4П2 становится неупругим жестким материалом, для которого даже при повышенных

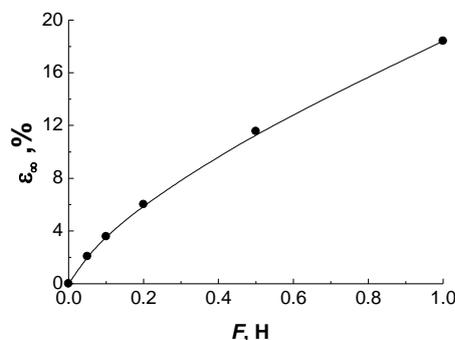


Рис. 7. Изохронная кривая деформаций сжатия ионита КУ-2х8 в К-форме в воде, построенная по результатам испытаний периодического деформирования.

Fig. 7. Isochronous compression curves of the KU-2x8 ionite in water, based on the results of periodic deformation tests

механических нагрузках величина упругих деформаций сжатия очень невелика. По-видимому, физическое релаксационное состояние таких ионитов аналогично переходному состоянию из высокоэластического в стеклообразное состояние полимеров с температурой стеклования, близкой к 20-30°C (вязкоупругие материалы).

Анализ деформационного поведения набухшего в воде катионита КУ-2х8 в К-форме показал, что для него также характерны упругие деформации, т.е. полимер находится в высокоэластическом состоянии, хотя и заметен вклад остаточных (пластических) деформаций (рис. 6). Однако полистирольная матрица более жесткая по сравнению с полиакриловыми и полиметакриловыми катионитами в форме иона щелочного металла, поэтому амплитуда деформирования существенно меньше. Изохронная кривая деформации также нелинейная (рис. 7). Для катионита

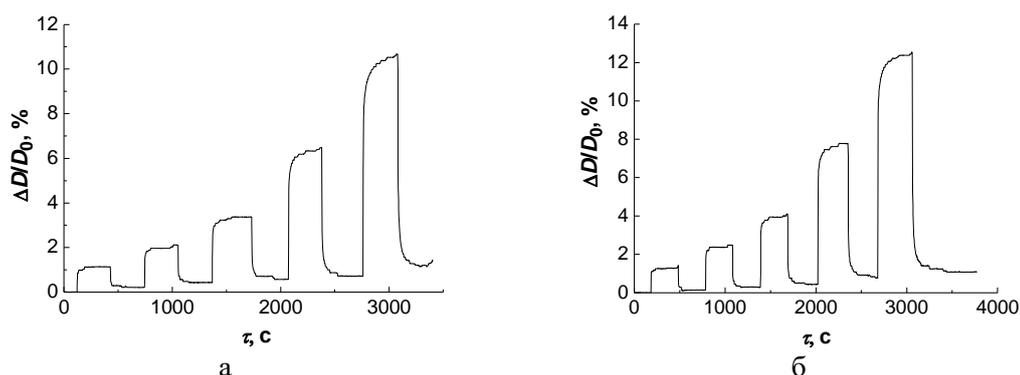


Рис. 8. Кривые изменения вертикального диаметра сферических гранул ионита КУ-2x8 (а) в Са-форме в воде и (б) Ni-форме в 0.1 н растворе NiCl<sub>2</sub> во времени при последовательной нагрузке (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Н) и последующем снятии нагрузки.  
 Fig. 8. Curves of changes in the vertical diameter of spherical granules of the KU-2x8 ion-exchanger (a) in Ca-form in water and (b) in Ni-form in 0.1 n NiCl<sub>2</sub> solution over time under successive load (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 N) and subsequent unload

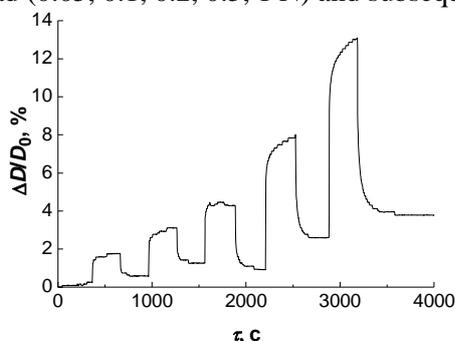


Рис. 9. Кривые изменения вертикального диаметра набухших в 3.6 н растворе NiCl<sub>2</sub> сферических гранул ионита КУ-2x8 во времени при последовательной нагрузке (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 Н) и последующем снятии нагрузки.  
 Fig. 9. Curves of changes in the vertical diameter of spherical granules of the KU-2x8 ionite swollen in 3.6 n NiCl<sub>2</sub> solution over time under successive load (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, and 1 N) and subsequent unload

КУ-2x8 в Са- и Ni- формах даже в концентрированном растворе преобладающими остаются упругие деформации (рис. 8, 9).

### Закключение

Таким образом, ионная форма полиакрилата и полиметакрилата, сшитых, соответственно, диметакрилатом триэтиленгликоля и дивинилбензолом, и концентрация внешнего раствора влияют на их упруго-пластические свойства. В разбавленных растворах хлорида натрия и хлорида кальция гели проявляют упругие свойства с близкими относительными амплитудами деформирования. При воздействии нагрузки амплитуда деформирования зерна полиметакрилата, сшитого ди-

винилбензолом, в Ni-форме в разбавленном растворе хлорида никеля значительно ниже, чем у Са-формы, со значительным вкладом пластической деформации. С увеличением концентрации внешнего раствора хлоридов кальция и никеля под действием механической нагрузки на зерно такого ионита уменьшается величина упругой деформации, а остаточные (пластические) деформации увеличиваются. В концентрированных растворах CaCl<sub>2</sub> и NiCl<sub>2</sub> такой ионит становится неупругим жестким материалом, для которого даже при повышенных механических нагрузках величина упругих деформаций сжатия очень невелика.



Для набухшего в воде сильнокислотного полистирольного катионита с привитыми сульфогруппами, сшитого дивинилбензолом, в К-форме также характерны упругие деформации, т. е. полимер находится в высокоэластическом состоянии. Однако полистирольная матрица более жесткая по сравнению с полиакриловыми и полиметакриловыми катионитами в форме иона щелочного металла, поэтому амплитуда деформирования существенно меньше. Для такого катионита

в Са- и Ni- формах даже в концентрированных растворах преобладающими являются упругие деформации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы/References

1. Zich L., Václavíková N. Characterization of ion exchange material behavior under pressure simulating electro-membrane cell conditions. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2018; 62(2): 150-155.
2. Tiihonen J., Laatikainen M., Markkanen I., Paatero E. Sorption of neutral components in ion-exchange resins. 1. Effect of cross-link density and counterion on selective sorption of water-ethanol mixtures in sulfonated PS-DVB resins. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1999; 38(12): 4832-4842.
3. Tiihonen J., Markkanen I., Laatikainen M., Paatero E. Elasticity of ion-exchange resin beads in solvent mixtures. *J. Appl. Polym. Sci.* 2001; 82(5): 1256-1264.
4. Tiihonen J., Markkanen I., Kärki A., Äänismaa P., Laatikainen M., Paatero E. Modelling the sorption of water-ethanol mixtures in cross-linked ionic and neutral polymers. *Chem. Eng. Sci.* 2002; 57(11): 1885-1897.
5. Pastukhov A.V., Davankov V.A., Sidorova E.V., Shkol'nikov E.I., Volkov V.V. Deformation of styrene-divinylbenzene copolymers and hypercrosslinked polystyrenes during solvent adsorption and desorption. *Russ. Chem. Bull.* 2007; 56(3): 484-493.

6. Davankov V.A., Pastukhov A.V. Paradoxes of thermodynamics of aqua-vapor-polymer interface equilibrium. *Russian J. Phys. Chem. A.* 2011; 85(5): 721-729.
7. Davankov V.A., Pastukhov A.V. Paradoxes of thermodynamics of Swelling equilibria of polymers in liquids and vapors. *J. Phys. Chem. B.* 2011; 115(51): 15188-15195.
8. Karpyuk E.A., Titova O.I., Pastukhov A.V., Davankov V.A., Kargov S.I., Ivanov V.A. Complex formation of divalent cations with carboxylic acid resins as a factor determining different stationary states of their swelling. *Solv. Extr. Ion Exch.* 2016; 34(4): 362-374.
9. Butikov E.I., Bykov A.A., Kondrat'ev A.S. *Fizika v primerah i zadachah.* L., Izdvo Leningr. un-ta, 1983. 462 p. (In Russ.)
10. Hazel' M.Yu., Selemenev V.F., Slepova O.V., Sockaya N.V. *Processy kompleksobrazovaniya v faze poliamfolitov pri sorbcii ionov nikelya iz slozhnyh mnogokomponentnyh rastvorov.* *Vestnik VGU. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya.* 2008; 1: 55-63.
11. Soldatov V.S. *Prostye ionoobmennye ravovesiya.* Minsk. Nauka i tekhnika. 1972. 224 p. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Е.А. Карпюк** – к.х.н., доцент, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**А.В. Пастухов** – д.х.н., в.н.с., ИНЭОС РАН, Москва, Россия

**E.A. Karpyuk** – Doctor of Chemistry, Docent, Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: [kat\\_il@mail.ru](mailto:kat_il@mail.ru)

**A.V. Pastukhov** – Doctor of Chemistry, Senior Scientist, Moscow, Russia, e-mail: [avpast@gmail.com](mailto:avpast@gmail.com)



**О.Т. Гавлина** – к.х.н., старший научный сотрудник, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**С.И. Каргов** – д.х.н., профессор, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**В.А. Иванов** – д.х.н., профессор, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**O.T. Gavlina** – Doctor of Chemistry, Senior Scientist. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: [ogavlina@mail.ru](mailto:ogavlina@mail.ru)

**S.I. Kargov** – Doctor of Chemistry, Professor. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: [skargov@yandex.ru](mailto:skargov@yandex.ru)

**V.A. Ivanov** – Doctor of Chemistry, Professor. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: [ivanov@phys.chem.msu.ru](mailto:ivanov@phys.chem.msu.ru)

*Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.*

*The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.*