



УДК 543.062

## Применение полиэлектролитов для определения концентрации сахарозы в растворе методом оптической микрометрии

© 2021 Щемелев И.С.<sup>1</sup>, Староверова А.В.<sup>1</sup>, Иванов А.В.<sup>1,2</sup>, Ферапонтов Н.Б.<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3830

Целью настоящей работы является разработка кинетической методики определения концентрации сахарозы методом оптической микрометрии для экспрессного анализа сахаросодержащих пищевых продуктов. Объектами исследования являются сильнокислотный катионит КУ-2×4 и слабокислотные катиониты, КБ-2э-3 и КБ-4п-2, взятые в разных ионных формах. Эксперименты проводились в статических ячейках на водных растворах сахарозы с концентрациями 100.0 г/см<sup>3</sup>, а также 0.1, 0.2, 0.5 и 1.0 моль/дм<sup>3</sup>. В ходе проведения экспериментов была получена зависимость формы кинетических кривых от природы противоиона, полимерной матрицы и сшивающего реагента. Установлено, что наибольшей чувствительностью к сахарозе обладают катиониты, взятые в Са<sup>2+</sup>-формах. При этом катионит КБ-2э-3 демонстрирует оптимальную скорость изменения степени набухания на начальном участке кинетической кривой, что является важным с точки зрения минимизации погрешности методики определения концентрации. Наиболее важным с точки зрения аналитической химии является начальный участок кинетических кривых, обладающий характерным экстремумом, форма которого определяется природой сенсорного полимера, растворителя и растворенного вещества. Для оценки чувствительности метода были получены зависимости глубины минимума от концентрации раствора сахарозы. Исходя из величины СКО измерения  $V/V_0$ , которая оценивается в 0.01, было установлено, что предел обнаружения сахарозы в водных растворах с помощью КУ-2×4 составляет 0.18 моль/дм<sup>3</sup>, а при использовании КБ-2э-3 – 0.10 моль/дм<sup>3</sup>. Поэтому для анализа водных растворов сахарозы наиболее предпочтительным оказывается применение КБ-2э-3 в Са<sup>2+</sup>-форме. Таким образом, показана принципиальная возможность определения концентрации сахарозы в водных растворах методом оптической микрометрии с помощью кинетических поверхностей набухания гранул полиэлектролитов. Тем не менее, нерешенной остается проблема селективности метода. Ведется поиск новых полимерных сенсорных гранул для определения сахарозы и других сахаров методом оптической микрометрии в меде, кондитерских изделиях, молочных продуктах, напитках и пр.

**Ключевые слова:** оптическая микрометрия, полимерные сенсорные гранулы, определение сахарозы.

### Введение

Контроль содержания сахарозы – один из ключевых этапов при установлении качества кондитерских изделий, молока и продуктов на его основе, меда, напитков. Чаще всего при анализе пищевых продуктов определяют количество восстанавливающих сахаров и сахарозы. Для этой цели наиболее широко используют методы окислительно-восстановительного

титрования и спектрофотометрии [1-3]. В этом случае возникает необходимость кислотной инверсии сахарозы, что значительно увеличивает время пробоподготовки и усложняет анализ. В настоящее время разрабатываются варианты определения сахарозы методами ИК-спектроскопии [4-9], капиллярного электрофореза [10-13] и хроматографии [14]. Это позволяет определять сахарозу без предварительной инверсии, что дает выигрыш

в экспрессности анализа, но при этом требуется применение сложного и дорогостоящего оборудования. Кроме того, данные методы пригодны для определения лишь небольших содержаний сахарозы. Так предел обнаружения сахарозы методом ВЭЖХ составляет 0.002% [15], а методом капиллярного электрофореза – в пределах от 0.0022 до 0.0029 мг/см<sup>3</sup> [13]. Для анализа пищевых продуктов с высоким содержанием сахаров это может быть не всегда оправдано, поэтому перечисленные инструментальные методы не находят широкого применения.

Описанный в работе метод оптической микрометрии (МОМ) позволяет осуществлять экспресс-анализ водных или водно-органических [16] растворов без применения химических реагентов. Существуют методики, позволяющие проводить анализ как индивидуальных, так и сложных по составу [17-19] растворов электролитов, что особенно важно при анализе реальных объектов, таких как технические рассолы, сточные воды, отходы металлургических и электротехнических предприятий и пр. В качестве сенсорных элементов могут быть использованы гидрофильные полимеры с различными матрицами, функциональными группами и степенью сшивки. Кроме того, метод оптической микрометрии позволяет определять сахарозу в больших концентрациях, что делает его пригодным для анализа кондитерских изделий и напитков, где содержание сахарозы очень велико, без их предварительного разбавления.

В настоящей работе основной задачей является поиск чувствительного материала для определения сахарозы методом оптической микрометрии.

### Теоретическая часть

Метод оптической микрометрии основан на изменении степени набухания полимерных гелей при их перемещении из чистого растворителя в раствор, содержащий определяемое вещество. Экспериментальная установка для определения

концентрации растворенных веществ состоит из оптического микроскопа с установленной в него цифровой видеокамерой, подключенной к персональному компьютеру, снабженному пакетом программ, позволяющих регистрировать и обрабатывать экспериментальные данные.

Ранее концентрацию растворенных веществ данным методом определяли при выдерживании гранул в растворе пробы до установления равновесия, однако это значительно увеличивало время анализа. Поэтому в настоящей работе предложен другой подход, основанный на использовании кинетических кривых, представляющих собой зависимость степени набухания гранулы от времени ее выдерживания в растворе пробы. Математическое описание кинетики изменения объема гранул в растворах основано на кинетической физико-математической гетерофазной модели строения полимерных гелей [20]. Экспериментальные результаты описываются с помощью системы уравнений, содержащей следующие кинетические коэффициенты:  $k_1$ , характеризующий скорость потока жидкости из гранулы (или в гранулу) под действием градиента химического потенциала  $k_2$ , отражающий время релаксации гранулы и приход ее в равновесное состояние,  $k_3$ , характеризующий скорость проникновения растворенного вещества в гранулу под действием градиента химического потенциала. Для полимеров, образующих межцепочечные водородные связи, вводят параметр  $p$ , значение которого определяют заранее. Следует отметить, что для коэффициентов  $k_1$  и  $k_3$  известен функциональный вид, описывающийся формулами (1) и (2):

$$K_1 = \frac{k_1}{\sqrt[3]{c_0}}, \quad (1)$$

$$K_3 = \frac{k_3 d}{D \sqrt{c_0}}. \quad (2)$$

Коэффициенты  $K_1$ ,  $k_2$ ,  $K_3$  и  $p$  зависят только от природы растворенного веще-

ства и полимера. Через них можно построить кинетические поверхности набухания полимера в растворах разной концентрации данного соединения без проведения экспериментов.

### Экспериментальная часть

**Материалы и реактивы.** Использовали следующие материалы и реактивы: приведенные в таблице 1 катиониты, сахароза (ч.д.а.), дистиллированная вода прокипяченная и охлажденная для приготовления растворов.

**Методика эксперимента.** В измерительную ячейку помещали гранулу исследуемого полимера, заливали водой, накрывали покровным стеклом и выдерживали до установления равновесной степени набухания. С помощью программы Webcam Screen Video Capture фиксировали фотоизображение гранулы в ячейке. С помощью программы Grain Size Treatment определяли объем гранулы согласно алгоритму, разработанному в статье [24].

Далее в ячейке меняли дистиллированную воду на раствор сахарозы с определенной концентрацией и тотчас же начинали фотосъемку гранулы в ячейке с частотой 1 кадр в 10 с. По истечении часа частоту съемки меняли на 1 кадр в 1 мин. Время эксперимента составляло от 2 до 5 ч в зависимости от времени достижения равновесной степени набухания гранулы

в растворе сахарозы. Последующая обработка фотоизображений проводилась тем же самым способом, как и при определении  $V_0$ . По полученным данным строили кинетическую кривую в координатах  $V/V_0-f(t)$ . Получив набор кривых при разных концентрациях строили кинетические поверхности для наиболее чувствительных к сахарозе полимеров.

### Обсуждение результатов

**Влияние природы противоиона на чувствительность катионита КУ-2×4 к сахарозе.** Катионит КУ-2 относится к сильно-кислотным катионитам и представляет собой сульфированный полистирол, сшитый дивинилбензолом. Аналогами КУ-2 являются такие материалы, как КРС, Amberlite IR-120, Dowex 50, Lewatit S 100, кальцит HCR и пермутит Q [25, 26]. Катиониты различаются между собой степенью сшивки, пористостью и полной обменной емкостью, что приводит к различию в способности к набуханию в воде и водных растворах.

Стоит отметить, что способность ионообменных материалов к набуханию в воде зависит и от природы противоиона, в которой находится ионит, поскольку природа противоиона влияет на способность полимера поглощать воду. Ранее [21] было установлено, что наилучшим образом вода сорбируется  $H^+$ -

Таблица 1. Характеристики исследованных катионитов  
Table 1. Characteristics of the studied cation exchangers

Марка катионита	Природа полимерной матрицы	Природа сшивающего реагента	Степень сшивки, %	Ионные формы	Литература
КУ-2×4	сульфированный полистирол	дивинилбензол	4	$H^+$ , $K^+$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$	[21]
КБ-4п-2	полиметакриловая кислота	дивинилбензол	2.5	$H^+$ , $K^+$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$	[22]
КБ-2э-3	полиметакриловая кислота	Диметакрилат диэтиленгликоля	3	$H^+$ , $Na^+$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$	[23]

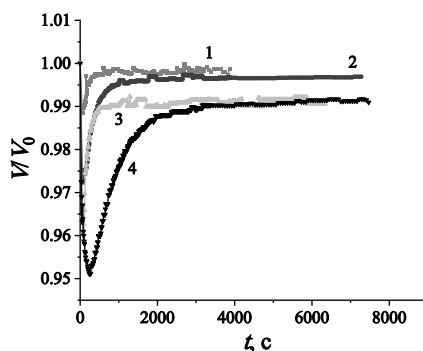


Рис. 1. Влияние природы противоиона на чувствительность КУ-2×4 к сахарозе,  $C=100.0$  мг/см<sup>3</sup>: 1 – H<sup>+</sup>-форма, 2 – K<sup>+</sup>-форма, 3 – Mg<sup>2+</sup>-форма, 4 – Ca<sup>2+</sup>-форма  
 Fig. 1. Influence of the nature of the counterion on the sensitivity of KU-2×4 to sucrose,  $C=100.0$  mg/cm<sup>3</sup>: 1 – H<sup>+</sup> form, 2 – K<sup>+</sup> form, 3 – Mg<sup>2+</sup> form, 4 – Ca<sup>2+</sup> form

формой. Это может быть объяснено большими размерами гидратированного протона [27].

Нами было изучено влияние природы противоиона на степень набухания КУ-2×4 в растворе сахарозы с концентрацией 100.0 мг/см<sup>3</sup>. На рис. 1 представлены кинетические кривые набухания катионита, взятого в различных ионных формах. Полученные зависимости имеют характерный минимум на начальных участках, положение и ширина которого определяется природой полимера и растворенного вещества, а глубина – концентрацией растворенного вещества. Из представленных кривых видно, что глубина минимума изменяется в ряду H<sup>+</sup><Mg<sup>2+</sup><K<sup>+</sup><Ca<sup>2+</sup>, а значение равновесной степени набухания – в ряду H<sup>+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>≈Ca<sup>2+</sup>. Это свидетельствует о том, что для сильнокислотного катионита и радиус, и заряд противоиона оказывают влияние на форму кинетических кривых. Катиониты с двухзарядными противоионами обладают большей чувствительностью к раствору сахарозы за счет способности к взаимодействию с полярными группами соседних цепей полимера, что приводит к увеличению степени поперечной сшивки [21] и уменьшению степени набухания на начальных участках кривых.

Влияние природы противоиона на чувствительность карбоксильных катионитов к сахарозе. Также исследовали карбоксильные катиониты КБ-2Э-3 и КБ-4п-

2. Общим у этих катионитов является природа полимерной цепи и, соответственно, полярных групп. Однако в КБ-2э-3 полимерные цепи сшиваются диметакрилатом диэтиленгликоля, а при получении КБ-4п-2 – дивинилбензолом. На рис. 2 изображены кинетические кривые набухания для карбоксильных катионитов, взятых в различных ионных формах, полученные при помещении гранул в раствор сахарозы с концентрацией 100.0 мг/см<sup>3</sup>.

Отличие слабокислотных карбоксильных катионитов от сульфокатионита заключается в их способности образовывать поперечные водородные связи, а также в склонности к образованию комплексных соединений с типичными жесткими кислотами Льюиса (чаще – переходными металлами). Это отражается на закономерностях в изменении кинетики их набухания в растворе сахарозы при переходе от формы к форме. Так, за счет образования межцепочечных водородных связей чувствительность к сахарозе для карбоксильных катионитов в H<sup>+</sup>-форме выше, чем для КУ-2 и его аналогов. Этим же объясняется и более долгий выход кинетической кривой к равновесному состоянию. Однако значительно больший вклад вносит потенциальная способность карбоксильных групп полимеров к комплексообразованию с двухзарядными ионами металлов (ионы кальция и магния) [28].

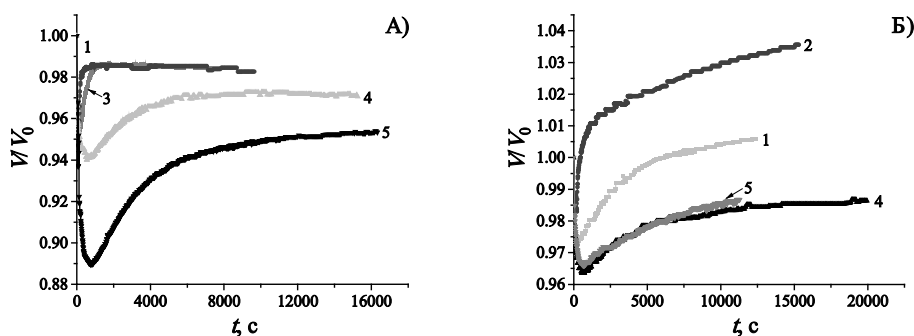


Рис. 2. Кинетические кривые набухания гранул КВ-2э-3 (А) и КВ-4п-2 (Б) в растворе сахарозы с концентрацией  $100.0 \text{ мг/см}^3$ : 1 –  $\text{H}^+$ -форма, 2 –  $\text{Na}^+$ -форма, 3 –  $\text{K}^+$ -форма, 4 –  $\text{Mg}^{2+}$ -форма, 5 –  $\text{Ca}^{2+}$ -форма

Fig. 2. Kinetic curves of swelling of KB-2e-3 (A) and KB-4p-2 (B) granules in a sucrose solution with a concentration of  $100.0 \text{ mg/cm}^3$ : 1 –  $\text{H}^+$  form, 2 –  $\text{Na}^+$  form, 3 –  $\text{K}^+$  form, 4 –  $\text{Mg}^{2+}$  form, 5 –  $\text{Ca}^{2+}$  form

Разница в поведении КВ-2э-3 и КВ-4п-2 в растворах сахарозы определяется главным образом природой сшивающего реагента. Так, для  $\text{H}^+$  и  $\text{Na}^+$ -форм КВ-4п-2 равновесная степень набухания больше 1, что связано с проникновением сахарозы в гранулу и последующим растягиванием полимерной сетки. При этом степень набухания для  $\text{Na}^+$ -формы выше вследствие значительно более высокой константы диссоциации полярных групп ионита. Для КВ-2э-3 это нехарактерно ввиду более длинного и гибкого сшивающего мостика. В случае  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ -форм более короткая и жесткая поперечная сшивка в катионите КВ-4п-2 приводит к неразличимой способности к набуханию гранул катионитов в растворе сахарозы в указанных формах. В работе установлено, что наибольшей чувствительностью к сахарозе из представленных в работе карбоксильных катионитов обладает КВ-2э-3, взятый в  $\text{Ca}^{2+}$ -форме. Кроме того, КВ-2э-3 демонстрирует также оптимальную скорость изменения степени набухания на начальном участке кинетической кривой, что является важным с точки зрения минимизации погрешности методики. Следовательно, указанный катионит представляет наибольший интерес для экспрессного определения концентрации сахарозы в водном растворе в диапазоне концентраций от  $0.10$  до  $1.00 \text{ моль/дм}^3$ .

Сравнение чувствительности катионитов к сахарозе и оценка предела обнаружения. На основании полученных экспериментальных результатов, для определения концентрации сахарозы нами были выбраны катиониты КУ-2×4 и КВ-2э-3, взятые в  $\text{Ca}^{2+}$ -форме. Были проведены эксперименты по изучению кинетики набухания указанных сенсорных материалов в растворах сахарозы с разными концентрациями. По проведенным экспериментам были получены кинетические поверхности, представленные на рис. 3.

С помощью данных поверхностей, полученных на основании данных кинетической модели, возможно определение концентрации раствора сахарозы в любой момент времени. Однако наиболее важным с точки зрения аналитической химии является именно начальный участок. Во-первых, его применение позволяет сократить время анализа с нескольких часов до нескольких минут, за счет чего происходит выигрыш в экспрессности. Во-вторых, как было отмечено ранее, форма минимума является характеристической для конкретной системы «полимер – растворитель – растворенное вещество». Наконец, в минимуме наблюдается наибольшая чувствительность метода оптической микрометрии для определения сахарозы. Для оценки данной величины были получены зависимости глубины минимума от

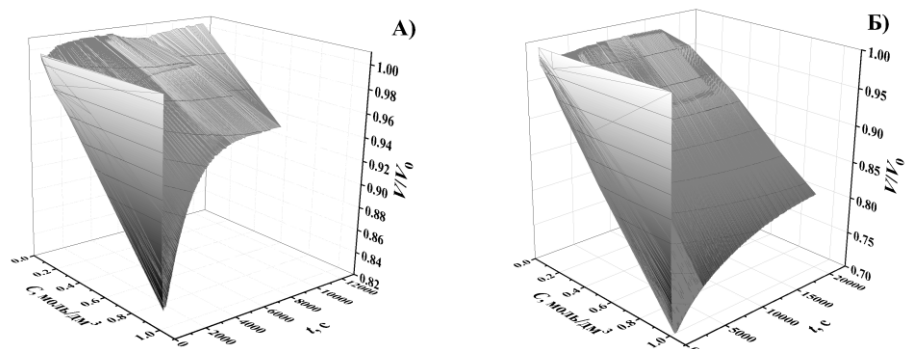


Рис. 3. Кинетические поверхности набухания КУ-2×4 (А) и КБ-2э-3 (Б) в  $\text{Ca}^{2+}$ -форме в растворах сахарозы  
 Fig. 3. Kinetic swelling surfaces of KU-2×4 (A) and KB-2e-3 (B) in the  $\text{Ca}^{2+}$  form in sucrose solutions

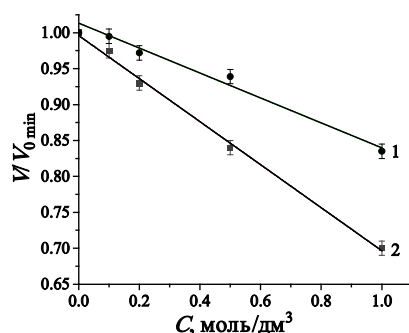


Рис. 4. Зависимость глубины минимума на кинетических кривых набухания КУ-2×4 (1) и КБ-2э-3 (2) в  $\text{Ca}^{2+}$ -форме от концентрации сахарозы  
 Fig. 4. Dependence of the depth of the minimum on the kinetic curves of swelling of KU-2×4 (1) and KB-2e-3 (2) in the  $\text{Ca}^{2+}$  form from the concentration of sucrose

концентрации раствора сахарозы, приведенные на рис.4.

Исходя из величины СКО измерения  $V/V_0$ , которая оценивается в 0.01, было установлено, что предел обнаружения сахарозы в водных растворах с помощью КУ-2×4 составляет 0.18 моль/дм<sup>3</sup>, а при использовании КБ-2э-3 – 0.10 моль/дм<sup>3</sup>. Поэтому для анализа водных растворов сахарозы наиболее предпочтительным оказывается применение КБ-2э-3 в  $\text{Ca}^{2+}$ -форме. Следовательно, он может быть использован для анализа напитков, кондитерских и молочных изделий, меда и других объектов с высоким содержанием сахаров.

Следует учесть, что несмотря на очевидное преимущество карбоксильного катионита по сравнению с сульфокатионитом, предел обнаружения по-прежнему остается высоким, что несущественно

при анализе природного меда, но ограничивает применение метода для ряда других кондитерских изделий. Кроме того, нерешенной остается проблема селективности метода. В настоящее время ведутся работы по поиску новых полимерных материалов, которые позволят решить обозначенные проблемы и тем самым расширить круг объектов, в которых требуется определение содержания сахарозы.

### Заключение

Показана принципиальная возможность определения концентрации сахарозы в водных растворах методом оптической микрометрии с помощью кинетических поверхностей набухания гранул полиэлектролитов. Установлена зависимость кинетики набухания катионитов от природы матрицы, противоиона и сшивающего реагента. Произведена оценка

предела обнаружения сахарозы. Предложенный подход может быть использован

для установления качества пищевых продуктов с высоким содержанием сахара.

*Часть работы выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОХХ РАН.*

### Список литературы

- ГОСТ 5903-89. Изделия кондитерские. Методы определения сахара. М. Стандартинформ. 2012. 24 с.
- ГОСТ Р 54667-2011. Молоко и продукты переработки молока. Методы определения массовой доли сахаров. М. Стандартинформ. 2012. 23 с.
- ГОСТ 32167-2013. Мед. Метод определения сахаров. М. Стандартинформ. 2018. 11 с.
- Simeone M.L.F., Parrella R.A.C., Schaffert R.E., Damasceno C.M.B. et al. // *Microchem. J.* 2017. Vol. 134. pp. 125-130.
- Pan L., Zhu Q., Lu R., McGrath J. M. // *Food Chem.* 2015. Vol. 167. pp. 264-271.
- Balan B., Dhaulaniya A.S., Jamwal R., Yadav A. et al. // *Spectrochim. Acta A.* 2020. Vol. 240. 118628.
- Wang T., Rodriuez-Saona L.E. // *J. Food Sci.* 2012. Vol. 77. No 8. pp. C874-C879.
- Wang J., Klilis M.M., Jun S., Jackson M., Li Q.X. // *J. Food Sci.* 2010. Vol. 75. No 2. pp. C208-C214.
- Landari H., Roudjane M., Messaddeq Yo., Miled A. // *Micromachines.* 2018. Vol. 9. No 10. P. 517.
- Tůma P., Sommerová B., Daněček V. // *Food Chem.* 2020. Vol. 316. 126362.
- Алексеева А.В., Карцова Л.А., Казачищева Н.В. // *Журн. аналит. химии.* 2010. Т. 65. № 2. С. 205-211.
- ГОСТ 33527-2015. Молоко и молочные составные продукты для детского питания. Определение массовой доли моно- и дисахаридов с использованием капиллярного электрофореза. М. Стандартинформ. 2019. 12 с.
- Rizelio V.M., Tenfen L., da Silveira R., Gonzaga L.V. et al. // *Talanta.* 2012. Vol. 93. pp. 62-66.
- Aljohar H.I., Maher H.M., Albaqami J., Al-Mehaizie M. et al. // *Saudi Pharm. J.* 2018. Vol. 26. No 7. pp. 932-942.
- Debebe A., Temesgen Sh., Redi-Abshiro M., Chandravanshi B.S. et al. // *J. Anal. Methods Chem.* 2018. Vol. 2018. 4010298.
- Кудухова И.Г., Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Ферапонтов Н.Б. // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2010. Т. 10. № 5. С. 759-761.
- Ферапонтов Н.Б., Ковалева С.С., Рубин Ф.Ф. // *Журн. аналит. химии.* 2007. Т. 62. № 10. С. 1028-1033.
- Ферапонтов Н.Б., Рубин Ф.Ф., Ковалева С.С. Патент РФ. № 2282850. 2006.
- Бабаян И.И., Токмачев М.Г., Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б. // *Жур. аналит. химии.* 2019. Т. 74. № 8. С. 634-638.
- Токмачев М.Г., Ферапонтов Н.Б., Тробов Х.Т., Гавлина О.Т. // *Учен. Записки физич. фак-та Моск. ун-та.* 2018. № 5. 1850303.
- Некряч Е.Ф., Гороховатская Н.В., Аврамчук Л.П., Куриленко О.Д. // Иониты и ионный обмен. № 22 / под ред. А.В. Киселева. М. Наука. 1966. С. 40-46.
- Крылов Е.А. Дисс. канд. хим. наук. Нижний Новгород. 1997. 280 с.
- Илюхина Е.А. Дисс. канд. хим. наук. М. 2008. 193 с.
- Гагарин А.Н., Ферапонтов Н.Б., Токмачев М.Г. // *Коллоидн. журнал.* 2017. Т. 79. № 6. С. 705-712.
- Гельферих Ф. Иониты / Пер. с нем. М. Изд-во иностр. лит-ры. 1962. 490 с.
- Тростянская Е.Б., Макарова С.Б., Аптова Т.А., Мурашко И.Н. и др. / В кн.: Синтез и свойства ионообменных материалов / под ред. К.В. Чмутова. М. Наука. 1968. С. 17-22.
- Sundheim B.R., Waxman M.H., Gregor H.P. // *J. Phys. Chem.* 1953. Vol. 57. No 9. pp. 974-978.
- Салдадзе К.М., Копылова-Валова В.Д. Комплексообразующие иониты (комплекситы). М. Химия. 1980. 336 с.



## The use of polyelectrolytes for determining the concentration of sucrose in solution by the optical micrometry method

© 2021 Shchemelev I.S.<sup>1</sup>, Staroverova A.V.<sup>1</sup>, Ivanov A.V.<sup>1,2</sup>, Ferapontov N.B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow

<sup>2</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The aim of this study was the development of a kinetic method for the determination of sucrose concentration by optical micrometry for the rapid analysis of sugar-containing food products. The objects of research were the strongly acidic cation exchanger KU-2×4 and the weakly acidic cation exchangers KB-2e-3 and KB-4p-2, taken in different ionic forms. The experiments were carried out in static cells on aqueous solutions of sucrose with concentrations of 100.0 g/cm<sup>3</sup>, as well as 0.1, 0.2, 0.5, and 1.0 mol/dm<sup>3</sup>. Over the course of the experiments, the dependence of the shape of the kinetic curves on the nature of the counterion, polymer matrix, and crosslinking reagent was obtained. It was found that cation exchangers in Ca<sup>2+</sup> forms possess the highest sensitivity to sucrose. In this case, the KB-2e-3 cation exchanger demonstrated the optimal rate of change in the degree of swelling in the initial section of the kinetic curve, which is important from the point of view of minimizing the error in the method for determining the concentration. The most important factor, from the point of view of analytical chemistry, is the initial portion of the kinetic curves, which has a characteristic extremum, the shape of which is determined by the nature of the sensor polymer, solvent, and solute. For the assessment of the sensitivity of the method, the dependences of the depth of the minimum on the concentration of the sucrose solution were obtained. Based on the value of the standard deviation of the V/V<sub>0</sub> measurement, which was 0.01, it was found that the detection limit of sucrose in aqueous solutions using KU-2×4 was 0.18 mol/dm<sup>3</sup>, the detection limit using KB-2e-3 was 0.10 mol/dm<sup>3</sup>. Therefore, for the analysis of aqueous solutions of sucrose, the most preferable is the use of KB-2e-3 in the Ca<sup>2+</sup> form. Thus, it has been shown that there is possibility to determine the concentration of sucrose in aqueous solutions by optical micrometry using the kinetic swelling surfaces of polyelectrolyte granules. Nevertheless, the problem of the selectivity of the method remains unsolved. The search for new polymer sensor granules for the determination of sucrose and other sugars by optical micrometry in honey, confectionery, dairy products, beverages, etc. continues.

**Keywords:** optical micrometry, polymer sensor granules, determination of sucrose.

### References

1. GOST 5903-89. Izdeliya konditerskie. Metody` opredeleniya sakhara, M., Standartinform, 2012, 24 p.
2. GOST R 54667-2011, Moloko i produkty` pererabotki moloka, Metody` opredeleniya massovoj doli Sakharov, M., Standartinform, 2012, 23 p.
3. GOST 32167-2013. Med. Metod opredeleniya Sakharov, M., Standartinform, 2018, 11 p.
4. Simeone M.L.F., Parrella R.A.C., Schaffert R.E., Damasceno C.M.B. et al., *Microchem. J.*, 2017, Vol. 134, pp. 125-130. DOI: 10.1016/j.microc.2017.05.020.
5. Pan L., Zhu Q., Lu R., McGrath J.M., *Food Chem.*, 2015, Vol. 167, pp. 264-271. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.06.117.
6. Balan B., Dhaulaniya A.S., Jamwal R., Yadav A. et al., *Spectrochim. Acta A*, 2020, Vol. 240, 118628. DOI: 10.1016/j.saa.2020.118628.
7. Wang T., Rodriuez-Saona L.E., *J. Food Sci.*, 2012, Vol. 77, No 8, pp. C874-C879. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02824.x.
8. Wang J., Klils M.M., Jun S., Jackson M., Li Q.X., *J. Food Sci.*, 2010, Vol. 75, No 2, pp. C208-C214. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01504.x.
9. Landari H., Roudjane M., Messaddeq Yo., Miled A., *Micromachines*, 2018, Vol. 9, No 10, p. 517. DOI: 10.3390/mi9100517.
10. Tůma P., Sommerová B., Daněček V., *Food Chem.*, 2020, Vol. 316, 126362. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126362.
11. Alekseeva A.V., Karczova L.A., Kazachishheva N.V., *Zhurn. analit. Khimii*, 2010, Vol. 65, No 2. pp. 205-211. DOI: 10.1134/S1061934810020176.
12. GOST 33527-2015. Moloko i molochny`e sostavny`e produkty` dlya detskogo pitaniya. Opredelenie massovoj



doli mono- i disakharidov s ispol'zovaniem kapillyarnogo e'lektroforeza. M. Standartin-form, 2019, 12 p.

13. Rizelio V.M., Tenfen L., da Silveira R., Gonzaga L.V. et al., *Talanta*, 2012, Vol. 93, pp. 62-66. DOI: 10.1016/j.talanta.2012.01.034.

14. Aljohar H.I., Maher H.M., Albaqami J., Al-Mehaizie M. et al., *Saudi Pharm. J.*, 2018, Vol. 26, No 7, pp. 932-942. DOI: 10.1016/j.jsps.2018.04.013.

15. Debebe A., Temesgen Sh., Redi-Abshiro M., Chandravanshi B.S. et al., *J. Anal. Meth-ods Chem.*, 2018, Vol. 2018, 4010298. DOI: 10.1155/2018/4010298.

16. Kudukhova I.G., Rudakov O.B., Rudakova L.V., Ferapontov N.B., Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy, 2010, Vol. 10, No 5, pp. 759-761.

17. Ferapontov N.B., Kovaleva S.S., Rubin F.F., *Zhurn. analit. khimii.*, 2007, Vol. 62, No 10, pp. 1028-1033. DOI: 10.1134/S1061934807100048.

18. Ferapontov N.B., Rubin F.F., Kovaleva S.S. Patent RF, No 2282850, 2006.

19. Babayan I.I., Tokmachev M.G., Ivanov A.V., Ferapontov N.B., *Zhur. analit. Khimii*, 2019, Vol. 74, No 8, pp. 634-638. DOI: 10.1134/S1061934819080033.

20. Tokmachev M.G., Ferapontov N.B.,

Trobov Kh.T., Gavlina O.T., *Uchen. Zapiski fi-zich. fak-ta Mosk. un-ta*, 2018, No 5, 1850303.

21. Nekryach E.F., Gorokhovatskaya N.V., Avramchuk L.P., Kurilenko O.D., Ionity' i ionny'j obmen. No 22, pod red. A.V. Kiseleva. M., Nauka, 1966, pp. 40-46.

22. Kry'lov E.A., Diss. kand. khim. nauk. Nizhnij Novgorod, 1997, 280 p.

23. Ilyukhina E.A., Diss. kand. khim. nauk. M., 2008, 193 p.

24. Gagarin A.N., Ferapontov N.B., Tokmachev M.G., *Kolloidn. Zhurnal*, 2017, Vol. 79, No 6, pp. 705-712. DOI: 10.1134/S1061933X17060096.

25. Gel'ferikh F., Ionity, / Per. s nem. M. Izd-vo inostr. lit-ry', 1962, 490 p.

26. Trostyanskaya E.B., Makarova S.B., Aptova T.A., Murashko I.N. et al., V kn.: Sintez i svoystva ionoobmennyy'kh materialov / pod red. K.V. Chmutova, M., Nauka, 1968, pp. 17-22.

27. Sundheim B.R., Waxman M.H., Gregor H.P., *J. Phys. Chem.*, 1953, Vol. 57, No 9, pp. 974-978. DOI: 10.1021/j150510a029.

28. Saldadze K.M., Kopy'lova-Valova V.D., Kompleksoobrazuyushhie ionity' (kompleksi-ty'), M., Khimiya, 1980, 336 p.

**Щемелев Иван Сергеевич** – аспирант кафедры аналитической химии Химического факультета МГУ, Москва

**Староверова Анастасия Владимировна** – студент Химического факультета МГУ, Москва

**Иванов Александр Вадимович** – д.х.н., доцент кафедры аналитической химии Химического факультета МГУ, научный сотрудник ИОНХ РАН, Москва

**Ферапонтов Николай Борисович** – д.х.н., ведущий научный сотрудник Химического факультета МГУ, Москва

**Shchemelev Ivan S.** – PhD student, the Analytical Chemistry Division, Chemistry Department, Moscow State University, Moscow, E-mail: [shchemelev\\_93@mail.ru](mailto:shchemelev_93@mail.ru)

**Staroverova Anastasiya V.** – student, Chemistry Department, Moscow State University, Moscow

**Ivanov Alexander V.** – grand PhD (chemistry), associate professor, Analytical Chemistry Division, Chemistry Department, Moscow State University, Researcher of the Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow

**Ferapontov Nikolay B.** – grand PhD (chemistry), leading researcher, Chemistry Department, Moscow State University, Moscow