



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723:661.746

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12414

Исследование сорбции пищевых кислот сульфоэтилированным хитозаном с последующим определением методом капиллярного электрофореза

**Александр Сергеевич Чвилев, Елена Леонидовна Лебедева,
Юлия Сергеевна Петрова, Людмила Константиновна Неудачина,
Анастасия Игоревна Городилова**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург,
Россия, a.i.gorodilova@urfu.ru

Аннотация. Исследование сорбционного концентрирования пищевых кислот новыми материалами имеет важное значение с точки зрения разработки как технологий их извлечения из различного сырья, так и новых гибридных методов определения. Цель работы – исследование сорбции пищевых кислот (лимонной, винной и щавелевой) сорбентом на основе сшитого глутаровым альдегидом N-2-сульфоэтилхитозана со степенью сульфоэтилирования 0.5 (СЭХ 0.5).

Сорбцию органических кислот СЭХ 0.5 исследовали методом ограниченного объема в диапазоне рН 6.0–10.0 (аммиачный буферный раствор) при различных временах контакта фаз (1, 3, 5 и 24 ч). Исходная концентрация кислоты составляла $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, масса сорбента – 0.02 (или 0.05) г, объем раствора – 10.0 см³. Концентрации кислот в растворах до и после сорбции определяли методом капиллярного зонного электрофореза (КЗЭ) с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель-105М» (ГК «Люмэкс», Россия) в следующих условиях: хроматный фоновый электролит с добавлением ЦТА-ОН и косвенное фотометрическое детектирование при длине волны 375 нм. Установлено, что в этих условиях определение трех пищевых кислот осуществляется селективно в виде их полностью депротонированных анионов. Пределы определения кислот составляют 3–6 мкмоль/дм³.

Установлено, что зависимости степени извлечения винной, щавелевой и лимонной кислот СЭХ 0.5 из аммиачного буферного раствора имеют схожий характер: сорбция является максимальной при рН 6–7 и уменьшается при рН > 7. В наибольшей степени в условиях эксперимента сорбентом извлекается щавелевая кислота. Однако степень ее извлечения не является количественной и составляет 53%.

Значительно увеличить степень извлечения пищевых кислот позволяет использование сорбента в медной или никелевой форме. Наибольшие степени извлечения винной кислоты достигаются при использовании СЭХ 0.5 в никелевой форме (порядка 80 % при рН 9), лимонной кислоты – СЭХ 0.5 в медной форме (100 % при рН 6–7). Максимальные значения степени извлечения щавелевой кислоты СЭХ 0.5 в медной и никелевой форме близки между собой (около 80 % при рН 7).

Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования сорбента СЭХ 0.5 при разработке высокочувствительных методик электрофоретического определения винной, щавелевой и лимонной кислот в объектах различной природы (продуктах питания, напитках, лекарственных препаратах).

Ключевые слова: капиллярный электрофорез, винная кислота, лимонная кислота, щавелевая кислота, сорбция.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Чвилев А.С., Лебедева Е.Л., Петрова Ю.С., Неудачина Л.К., Городилова А.И. Исследование сорбции пищевых кислот сульфэтилированным хитозаном с последующим определением методом капиллярного электрофореза // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 4. С. 592-600. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12414>



Original article

Study of sorption of food acids by sulphoethylated chitosan followed by capillary electrophoresis determination

Alexander S. Chvilyov, Elena L. Lebedeva, Yuliya S. Petrova,

Lyudmila K. Neudachina, Anastasia I. Gorodilova[✉]

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg,

Russian Federation, a.i.gorodilova@urfu.ru[✉]

Abstract. The study of sorption concentration of food acids by new materials is important in terms of developing technologies for their extraction from various raw materials as well as new hybrid methods for their determination. The goal of the work was to study the sorption of food acids (citric, tartaric, and oxalic) by a sorbent based on N-2-sulphoethyl chitosan cross-linked with glutaraldehyde with a sulphoethylation degree of 0.5 (SEC 0.5).

The sorption of organic acids by SEC 0.5 was studied by the limited volume method in the pH range of 6.0–10.0 (ammonia buffer solution) at different phase contact times (1, 3, 5, and 24 h). The initial acid concentration was $1 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³, the sorbent mass was 0.02 (or 0.05) g, and the solution volume was 10.0 cm³. The concentrations of acids in solutions before and after sorption were determined using capillary zone electrophoresis (CZE) with the Kapel-105M capillary electrophoresis system (Lumex group of companies, Russia) in the following conditions: chromate background electrolyte with the addition of CTA-OH and indirect photometric detection at a wavelength of 375 nm. It was established that in these conditions three food acids were determined selectively in the form of their fully deprotonated anions. The limits of acid determination were 3–6 mmol/dm³.

It was found that the dependences of the degree of extraction of tartaric, oxalic, and citric acids by SEC 0.5 from an ammonia buffer solution were similar: sorption reached its maximum at pH 6–7 and decreased at pH > 7. Oxalic acid was extracted by the sorbent to the greatest extent in the experimental conditions. However, the degree of its extraction was not quantitative and amounted to 53%.

The use of a sorbent in copper or nickel form allowed significantly increasing the degree of extraction of food acids. The highest degrees of extraction of tartaric acid were achieved when using SEC 0.5 in nickel form (about 80% at pH 9) and SEC 0.5 in copper form for citric acid (100% at pH 6–7). The maximum values of the degree of extraction of oxalic acid by SEC 0.5 in copper and nickel form were similar (about 80% at pH 7).

The results of the conducted studies showed the potential of using the SEC 0.5 sorbent in the development of highly sensitive methods for the electrophoretic determination of tartaric, oxalic, and citric acids in various objects (food products, beverages, medicines).

Keywords: capillary electrophoresis, tartaric acid, citric acid, oxalic acid, sorption.

Acknowledgements: the study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Development Programme for the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin in accordance with the Priority-2030 programme of academic strategic leadership.

For citation: Chvilyov A.S., Lebedeva E.L., Petrova Yu.S., Neudachina L.K., Gorodilova A.I. Study of sorption of food acids by sulphoethylated chitosan followed by capillary electrophoresis determination. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(4): 592-600. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12414>

Введение

Органические кислоты (щавелевая (ЩК), винная (ВК) и лимонная (ЛК)) являются важными компонентами продуктов питания и могут выступать в качестве индикаторов их качества. В относительно небольших количествах такие кислоты могут присутствовать и в составе лекарственных средств [1]. Исследование

сорбционного концентрирования пищевых кислот представляет определенный интерес с нескольких точек зрения. Во-первых, с точки зрения изучения влияния природы сорбата на сорбент, как, например, в случае сорбции тартрат-, цитрат- и оксалат-ионов гидроксиапатитом, являющимся компонентом зубной эмали [2, 3], или извлечения цитрат-ионов гелеобразными оксигидроксидами, при определен-

ных условиях сопровождающегося растворением последних [4]. Во-вторых, сорбция [5] и электродиализ с мембранами на основе ионообменников [6] применяются для очистки и кондиционирования вин и соков, а также получения пищевых кислот, что также определяет необходимость изучения сорбционных свойств соответствующих материалов. В-третьих, применение сорбционного разделения и концентрирования пищевых кислот может позволить определять низкие их концентрации с использованием доступных методов анализа, характеризующихся относительно небольшой чувствительностью и селективностью, таких, например, как капиллярный электрофорез [7]. Данный метод по сравнению с основной альтернативой – ВЭЖХ – выгодно отличается высокой эффективностью разделения и отсутствием необходимости использования токсичных органических растворителей и дорогостоящих хроматографических колонок [8].

Перспективным материалом для извлечения органических соединений является биосовместимый полимер природного происхождения – хитозан. Сорбенты на основе хитозана могут применяться для извлечения пищевых красителей [9], а также высокомолекулярных соединений [10] и пищевых кислот [11] из вин.

Ранее исследованы сорбционные свойства материалов на основе сшитого глутаровым альдегидом N-2-сульфоэтилхитозана с различными степенями модифицирования. Установлено, что сорбенты, с одной стороны, характеризуются высокой емкостью по ионам переходных металлов [12], с другой стороны, способны к количественному извлечению органических соединений, как нами показано на примере сорбции аргинина [13]. Настоящая работа продолжает исследования сорбционных свойств N-2-сульфоэтилхитозана по отношению к органическим соединениям.

Цель работы – изучение сорбции пищевых кислот (винной, лимонной и щавелевой) сорбентом на основе сшитого хитозана со степенью сульфэтилирования 0.5 с последующим их определением методом капиллярного электрофореза.

Экспериментальная часть

Исходные растворы пищевых кислот (винной, щавелевой и лимонной) с концентрацией 10^{-2} моль/дм³ готовили из реагентов квалификации не ниже х.ч. Растворы с меньшей концентрацией готовили разбавлением исходных.

Регистрацию электрофореграмм анализируемых растворов проводили на системе капиллярного электрофореза «Капель-105М» (ГК «Льюэкс», Россия), снабженной немодифицированным кварцевым капилляром (внутренний диаметр 75 мкм, эффективная длина 50 см, общая длина 60 см), УФ-детектором и источником высокого напряжения. Пробу вводили гидродинамически в течение 10 с при давлении 50 мбар. Анализ проводили при температуре водного термостатирования капилляра 25°C, величине рабочего напряжения -12 кВ и длине волны детектирования 375 нм. Между анализами капилляр промывали фоновым электролитом (ФЭ) в течение 3 минут. В качестве ФЭ использовали хроматный фоновый электролит, содержащий 0.0017 моль/дм³ оксида хрома (VI), 0.005 моль/дм³ диэтанолamina и 0.00033 моль/дм³ гидроксида цетилтриметиламмония.

Значение pH растворов контролировали с помощью лабораторного анализатора жидкости «АНИОН 4100» (ООО НПП «Инфраспак-Аналит», Россия), снабженного стеклянным комбинированным электродом ЭСК-10601/7.

В качестве сорбента исследован хитозан со степенью сульфэтилирования 0.5, сшитый глутаровым альдегидом (СЭХ 0.5). Синтез и идентификация сорбента описаны в [14].

Сорбцию органических кислот СЭХ 0.5 исследовали методом ограниченного



Таблица 1. Пределы обнаружения и определения ВК, ЛК и ЩК
Table 1. Detection and determination limits for TA, CA, and OA

Кислота	Предел обнаружения, мкмоль/дм ³	Предел определения, мкмоль/дм ³
ВК	1.0	2.9
ЛК	1.8	6.1
ЩК	2.8	4.6

объема в диапазоне рН 6.0-10.0 (аммиачный буферный раствор). Исходная концентрация кислоты составляла $5 \cdot 10^{-5}$ (или $1 \cdot 10^{-4}$) моль/дм³, масса сорбента – 0.02 (или 0.05) г, объем раствора – 10.0 см³. Время контакта фаз составляло 1, 3, 5 и 24 ч. Концентрацию кислоты в растворах до и после сорбции определяли методом КЗЭ в оптимизированных условиях. По полученным данным рассчитывали значения степени извлечения кислоты (R , %) и сорбции (мкмоль/г).

В аналогичных условиях исследовали сорбцию винной кислоты СЭХ 0.5 в присутствии никеля (II). При этом концентрация кислоты в растворе составляла $5.0 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, никеля (II) – $1.0 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³.

В таких же условиях исследована сорбция органических кислот СЭХ 0.5 в медной (или никелевой) форме. В соответствующую форму сорбент переводили следующим образом: 1 г СЭХ 0.5 смешивали с 50 см³ 1 моль/дм³ раствора сульфата меди (II) (или сульфата никеля (II)), оставляли на сутки при периодическом перемешивании, разделяли фазы фильтрованием, промывали сорбент на фильтре дистиллированной водой, оставляли сушиться на воздухе.

Обсуждение результатов

Для определения органических кислот использовали условия, широко применяемые для определения неорганических ионов [7, 15]: хроматный ФЭ с добавлением ЦТА-ОН и косвенное фотометрическое детектирование. Нами показано, что в этих условиях возможно селективное определение всех трёх аналитов в виде их полностью депротонированных анионов. Градуировочные графики в координатах

«приведённая площадь пика (S/t) – концентрация кислоты» линейны в диапазонах от 1 до 100 мкмоль/дм³. Параметры пиков остаются стабильными, как минимум, в течение 48 часов. Рассчитанные значения пределов определения и обнаружения исследуемых органических кислот приведены в табл. 1.

Следующим этапом работы стало исследование сорбции пищевых кислот сорбентом на основе сульфэтилированного хитозана – СЭХ 0.5. Для поддержания постоянного значения рН использовали аммиачный буферный раствор, не содержащий анионов, которые потенциально могли бы мешать электрофоретическому определению анионов исследуемых кислот. Исследование проводили в диапазоне рН 6.0-10.0. На основании значений pK_a исследуемых кислот [16] установлено, что при рН > 6 ВК и ЩК присутствуют в растворе в полностью депротонированной форме. В растворе трехосновной ЛК с рН 6-7 присутствуют частицы типа HA^{2-} и A^{3-} , при рН > 8 – преимущественно цитрат-ионы. Теоретически, извлечение тартрат-, цитрат- и оксалат-ионов СЭХ 0.5 может происходить за счет электростатического взаимодействия с протонированными аминогруппами сорбента или за счет смешаннолигандного комплексообразования при условии присутствия в растворе ионов металла, образующего устойчивые комплексы как с исследуемыми кислотами, так и с функциональными группами сорбента.

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости степени извлечения ЩК СЭХ 0.5 при разных значениях времен контакта фаз. Установлено, что равновесие сорбции достигается в течение 5

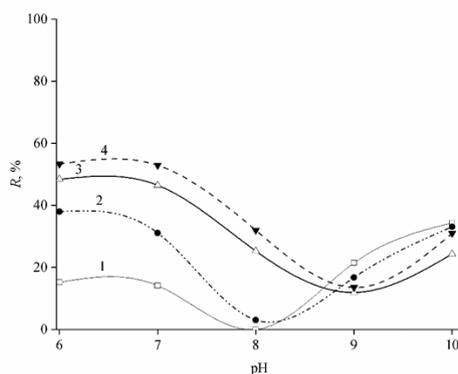


Рис. 1. Зависимость степени извлечения ЩК из раствора с исходной концентрацией $1.0 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ СЭХ 0.5 от pH аммиачного буферного раствора. Условия анализа: $g(\text{СЭХ } 0.5) = 0.0500$ г; $V(\text{ЩК}) = 10.0$ см³; время контакта фаз: 1 час (1), 3 часа (2), 5 часов (3), 24 часа (4).

Fig. 1. Dependence of the degree of extraction of oxalic acid from the solution on the initial concentration $1.0 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³ SEC 0.5 on the pH of the ammonia buffer solution. Analysis conditions: $g(\text{SEC } 0.5) = 0.0500$ g; $V(\text{OA}) = 10.0$ cm³; phase contact time: 1 hour (1), 3 hours (2), 5 hours (3), 24 hours (4)

часов, при этом степень извлечения ЩК является максимальной в диапазоне pH 6-7 и составляет около 53%. При $\text{pH} > 7$ сорбция кислоты уменьшается, что связано с депротонированием аминогрупп в составе сорбента. Зависимости сорбции ВК и ЛК СЭХ 0.5 имеют аналогичный характер. Максимальное значение степени извлечения ЛК составляет порядка 40%. В наименьшей степени СЭХ 0.5 извлекается ВК: значение степени ее извлечения при pH 6-7 не превышает 23%. Относительно низкие степени извлечения данной кислоты можно объяснить большим размером ее молекулы по сравнению с ЩК [5]. Большие значения сорбции ЛК в свою очередь объясняются высокими значениями заряда цитрат-аниона по сравнению с оксалатом и тартратом.

Установлено, что уменьшение исходной концентрации ВК до $5.0 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ не приводит к значительному возрастанию степени извлечения кислоты, которая в данном случае не превышает 28%.

Из литературных данных известно [13, 17], что сорбция кислот различными материалами может значительно возрасти в присутствии ионов металлов за счет реализации смешаннолигандного комплексобразования на поверхности сорбентов

с участием их функциональных групп. ВК, ЛК и ЩК образуют устойчивые комплексные соединения с ионами меди (II), железа (III), алюминия (III), титана (IV) [18], сурьмы (III) [19], галлия (III) [20]. С ионом никеля (II) исследуемые органические кислоты образуют средние по прочности комплексы [21]. Поскольку ионы железа (III) и алюминия (III) склонны к гидролизу уже в кислых средах, соли сурьмы (III) в водных растворах также подвергаются гидролизу, к тому же токсичны, а соли галлия (III) и титана (IV) труднодоступны, для дальнейшего исследования сорбции ВК, ЛК и ЩК нами выбраны ионы никеля (II) и меди (II). Немаловажным является и то обстоятельство, что СЭХ 0.5 характеризуется относительно высокой емкостью по меди (II) и никелю (II) [12]. В табл. 2 приведены значения констант устойчивости комплексов, образуемых ионами меди (II) и никеля (II) с исследуемыми кислотами и аммиаком.

Исследована сорбция ВК из раствора с концентрацией $5.0 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, содержащего $1.0 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ сульфата никеля (II) СЭХ 0.5. Установлено, что введение ионов никеля (II) не приводит к изменению характера зависимости

Таблица 2. Логарифмы констант устойчивости комплексов меди (II) и никеля (II) с некоторыми пищевыми кислотами и аммиаком

Table 2. Logarithms of stability constants of copper (II) and nickel (II) complexes with some food acids and ammonia

Лиганд	Состав комплекса	lgβ		Источник
		Ni ²⁺	Cu ²⁺	
БК	MeL	4.61	6.91	[21]
	MeL ₂	3.35	5.65	
ЩК	MeL	3.48	4.65	[21]
	MeL ₂	2.95	3.57	
ЛК	MeL	5.11	н.д.*	[20]
	MeHL	3.36	9.55	
	Me ₂ (OH)L	н.д.	4.92	
	Me ₂ (OH)L ₂	н.д.	10.85	
	MeH ₂ L	1.54	н.д.	
	MeL ₂	7.84	н.д.	
NH ₃	MeL	2.68	3.99	[16]
	MeL ₂	4.80	7.33	
	MeL ₃	6.40	10.06	
	MeL ₄	7.47	12.03	
	MeL ₅	7.99	11.43	
	MeL ₆	7.91	8.90	

*н.д. – нет данных

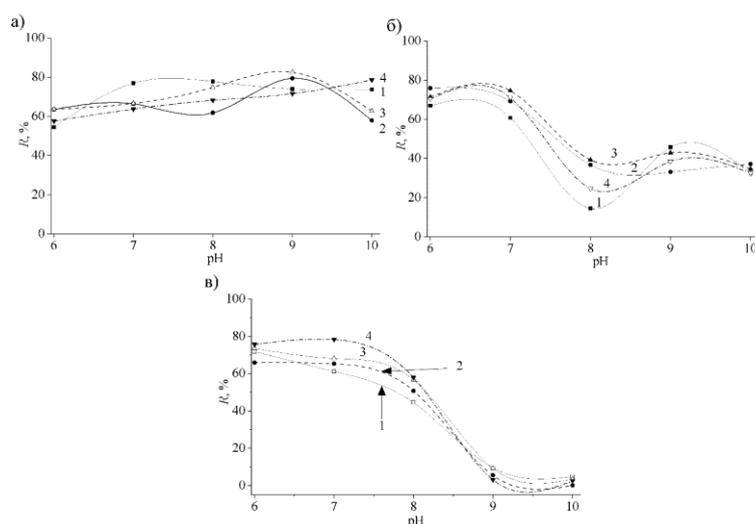


Рис. 2. Зависимость степени извлечения пищевых кислот: ВК (а), ЩК (б), ЛК (в) СЭХ 0.5 в никелевой форме от рН аммиачного буферного раствора. Условия анализа: g(СЭХ 0.5) = 0.0500 г; V = 10.0 см³; C = 5.0·10⁻⁵ моль/дм³; время контакта фаз: 1 час (1), 3 часа (2), 5 часов (3), 24 часа (4).

Fig. 2. Dependence of the degree of extraction of food acids: TA (a), OA (b), CA (c) SEC 0.5 in nickel form on pH of the ammonia buffer solution. Analysis conditions: g(SEC 0.5) = 0.0500 g; V = 10.0 cm³; C = 5.0·10⁻⁵ mol/dm³; phase contact time: 1 hour (1), 3 hours (2), 5 hours (3), 24 hours (4)

сорбции ВК от рН и увеличению степени извлечения кислоты. Очевидно, что добавленного количества никеля (II) в данном случае недостаточно для

реализации механизма смешаннолигандного комплексообразования. Поэтому в следующем этапе работы стало исследование сорбции пищевых кислот

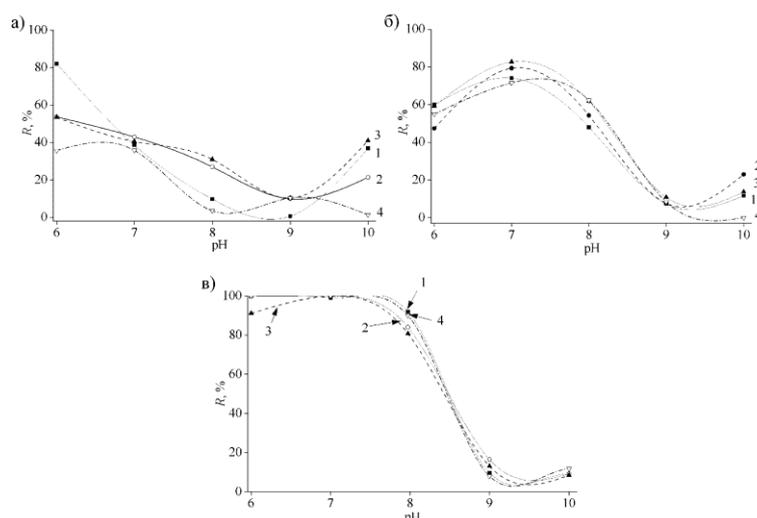


Рис. 3. Зависимость степени извлечения пищевых кислот: ВК (а), ЩК (б), ЛК (в) СЭХ 0.5 в медной форме от pH аммиачного буферного раствора. Условия анализа: $g(\text{СЭХ } 0.5) = 0.0500 \text{ г}$; $V = 10.0 \text{ см}^3$; $C = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$; время контакта фаз: 1 час (1), 3 часа (2), 5 часов (3), 24 часа (4).

Fig. 3. Dependence of the degree of extraction of food acids: TA (a), OA (b), CA (c) SEC 0.5 in copper form on pH of the ammonia buffer solution. Analysis conditions: $g(\text{СЭХ } 0.5) = 0.0500 \text{ g}$; $V = 10.0 \text{ cm}^3$; $C = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$; phase contact time: 1 hour (1), 3 hours (2), 5 hours (3), 24 hours (4)

СЭХ 0.5 в никелевой форме. Полученные зависимости приведены на рис. 2.

Установлено, что использование сорбента в никелевой форме позволяет значительно повысить степень извлечения всех исследуемых пищевых кислот. Зависимости сорбции ЛК и ЩК от pH имеют схожий характер: наибольшие значения степени извлечения кислот достигаются при pH 6-7. Уменьшение сорбции при дальнейшем увеличении pH связано с возрастанием концентрации аммиака в системе, что приводит к разрушению комплекса, образуемого никелем (II) с функциональными группами СЭХ 0.5 (как видно из данных табл. 2 комплексы аммиака с никелем (II) характеризуются большей устойчивостью по сравнению с комплексами с пищевыми кислотами). В свою очередь сорбция ВК СЭХ 0.5 в никелевой форме незначительно зависит от pH раствора. Предположительно это может быть связано с включением аммиака в состав смешаннолигандного комплекса с участием ВК и функциональных групп сорбента. Кроме этого, обращает на себя

внимание тот факт, что сорбция ВК и ЩК при pH 9-10 не является нулевой, в отличие от ЛК. Это можно объяснить тем, что для ВК и ЩК наиболее устойчивыми являются комплексы состава ML , для ЛК – ML_2 . В последнем случае при высоких значениях pH, благоприятствующих наиболее полному связыванию никеля (II) в комплекс, у иона металла-комплексобразователя не остается вакантных орбиталей для связывания с функциональными группами сорбента.

Зависимости сорбции пищевых кислот СЭХ 0.5 в медной форме (рис. 3) имеют схожий вид: степень их извлечения является максимальной в интервале pH 6-7 и далее уменьшается с возрастанием содержания аммиака в системе. По сравнению с сорбцией ВК СЭХ 0.5 в никелевой форме использование сорбента в медной форме приводит к уменьшению степени извлечения данной кислоты. Это связано с тем, что значения констант устойчивости комплексов с аммиаком при переходе от никеля (II) к меди (II) возрастают более



значительно по сравнению с устойчивостью тартратных комплексов (табл. 2). Вследствие данного обстоятельства конкурентное влияние аммиака на сорбцию ВК возрастает. В противоположность этому, использование СЭХ 0.5 в медной форме обеспечивает количественную степень извлечения ЛК, что связано с высокой устойчивостью комплексов, образуемых кислотой с медью (II) (табл. 2). Таким образом, использование сорбента в различных формах позволяет в определенной степени влиять на степень извлечения анионов органических кислот.

Заключение

Показана возможность определения винной, щавелевой и лимонной кислот методом КЗЭ с косвенным фотометрическим детектированием с пределами определения на уровне 3-6 мкмоль/дм³. Получены зависимости степени извлечения

пищевых кислот СЭХ 0.5 от рН аммиачного буферного раствора. Установлено, что наибольшие степени извлечения винной кислоты достигаются при использовании СЭХ 0.5 в никелевой форме, лимонной кислоты – СЭХ 0.5 в медной форме. Максимальные значения степени извлечения щавелевой кислоты СЭХ 0.5 в медной и никелевой форме близки между собой. Определены значения рН аммиачного буферного раствора, соответствующие наибольшим значениям сорбции исследуемых кислот.

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. Mazilnikov G.V., Shimansky A.P., Likhoded Yu.A., Miller S.S. Patent WIPO, no WO 2011/119126 A1, 2011.
2. Janusz W., Skwarek E., Adsorption of the Tartrate Ions in the Hydroxyapatite/Aqueous Solution of NaCl System, *Materials*, 2021; 14 (11): 3039-3055. <https://doi.org/10.3390/ma14113039>
3. Janusz W., Skwarek E., Comparison of Oxalate, Citrate and Tartrate Ions Adsorption in the Hydroxyapatite/Aqueous Electrolyte Solution System, *Colloids Inter.*, 2020; 4 (4): 45-57. <https://doi.org/10.3390/colloids4040045>
4. Pechenyuk S.I., Semushina Yu.P., Kadyrova G.I., Geleobraznye oksidiroksidy i tsitrat-iony: konkurenciya mezhdu adsorbtsiei i kompleksoobrazovaniem, *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*, 2012; 12(5): 719-724. (In Russ.)
5. Selemenev V.F., Lantsuzskaya E.V., Krisilov A.V., Oros G.Yu., Naumenko L.F., Kharchenko G.Yu., Sorbttsiya pishchevykh kislot polifunktsional'nymi anionoobmennikami. *Vestnik VGU, seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2015; 3: 31-36. (In Russ.)
6. Chermit R.Kh., Chermit E.V., Degtyareva M.S., Zabolotskii V.I., Obmennaya sorbttsiya i

elektricheskaya provodimost' geterogennykh anionoobmennyykh membran v smeshannykh rastvorakh solei vinnoi kisloty, *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*, 2013; 13(5): 668-675. (In Russ.)

7. Komarova N.V., Kamentsev Ya.S. *Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu sistem kapillyarnogo elektroforeza «Kapel»*. Sankt-Peterburg, OOO «Veda». 202 p. (In Russ.)

8. *Problemy analiticheskoi khimii*. Vol. 18. Kapillyarnyi elektroforez. Ed. Kartsova L.A. Moscow, Nauka Publ., 2014, 444 p. (In Russ.)

9. Pavlova O.V., Kucher A.S., Sorbtionnyi potentsial khitozana k pishchevym krasitel'yam, *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika*. 2021; 11(1): 86-96. (In Russ.)

10. Chermit Z.M., Ageeva N.M., Primenenie aktivirovannykh form khitozana dlya obrabotki vinogradnykh vin, *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2016; 4: 51-53. (In Russ.)

11. Gruppi A., Romanini E., Bassani A., Lambri M., Chinnici F., Gabrielli M., Adsorption Capabilities of Fungoid Chitosan Toward Organic Acids in Model Solutions and White Wine, *Food Bioprocess Tech.*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03135-9>

12. Petrova Yu.S., Neudachina L.K., Mekhaev A.V., Pestov A.V., Simple synthesis and chelation capacity of N-(2-sulfoethyl)chitosan, a



taurine derivative, *Carbohydr. Polym.*, 2014; 112: 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.028>

13. Nurmukhametova K.R., Lebedeva E.L., Petrova Yu.S., Neudachina L.K., Issledovanie sorbtzii arginina sul'foetilirovannym khitozonom s posleduyushchim opredeleniem metodom kapillyarnogo elektroforeza, *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2022; 22(6): 856-868. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10892> (In Russ.)

14. Petrova Yu.S., Pestov A.V., Usoltseva M.K., Neudachina L.K., Selective adsorption of silver(I) ions over copper(II) ions on a sulfoethyl derivative of chitosan, *J. Hazard. Mater.*, 2015; 299: 696-701. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.001>

15. GOST 31867–2012 Voda pit'evaya. Opredelenie soderzhaniya anionov metodom khromatografii i kapillyarnogo elektroforeza. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 15 p. (In Russ.)

16. Lur'e Yu.Yu. Spravochnik po analiticheskoi khimii. Moscow, Al'yans Publ., 2007, 447 p. (In Russ.)

17. Ovsyannikova D.V., Bondareva L.P., Grigorova E.V., Vzaimodeistvie metionina s mono- i bifunktsional'nymi karboksil'nymi ionoobmennikami v mednoi forme, *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2015; 15(4): 532-539. (In Russ.)

18. Babko A.K., Pyatnitskii I.V. Kolichestvennyi analiz. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1962, 508 p. (In Russ.)

19. Kulikova D.I., Kulikova D.M., Shapnik M.S., Izuchenie kompleksoobrazovaniya sur'my (III) s vinnoi kislotoi, *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2007; 3-4: 7-12. (In Russ.)

20. Hyperquad Simulation and Speciation. Available at: <http://www.hyperquad.co.uk/hyss.htm> (accessed 25 June 2023)

21. Khalil M.M., Mahmoud R.K., pH-metric studies of acid-base equilibria on the mixed M(II) complexes with R-3-[-1-hydroxy-2(methylamino)ethyl]phenol and some selected carboxylic acids, *J. Iran. Chem. Soc.* 2015; 12(1): 1149-1161. <https://doi.org/10.1007/s13738-014-0576-6>

Информация об авторах / Information about the authors

А.С. Чвилев – студент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Е.Л. Лебедева – доцент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, к.х.н., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Ю.С. Петрова – заведующий кафедрой аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, к.х.н., доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Л.К. Неудачина – доцент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, к.х.н., доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

А.И. Городилова – студент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

A.S. Chvilyov – student, department of analytical and environmental chemistry of the Institute of natural sciences and mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

E.L. Lebedeva – Ph. D. (chemistry), associate prof., department of analytical and environmental chemistry of the Institute of natural sciences and mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

Yu.S. Petrova – Ph. D. (chemistry), Head of the department of analytical and environmental chemistry of the Institute of natural sciences and mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

L.K. Neudachina – Ph. D. (chemistry), associate prof., department of analytical and environmental chemistry of the Institute of natural sciences and mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

A.I. Gorodilova – student, department of analytical and environmental chemistry of the Institute of natural sciences and mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation, a.i.gorodilova@urfu.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2024; одобрена после рецензирования 02.07.2024; принята к публикации 03.07.2024.

The article was submitted 13.03.2024; approved after reviewing 02.07.2024; accepted for publication 03.07.2024.