ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗІЧНАЯ ХІМІЯ

PHYSICAL CHEMISTRY

УДК: 541.183.12
https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-7-16

Поступила в редакцию 25.11.2025
Received 25.11.2025

Л. Н. Шаченкова, Н. В. Вонсович, П. В. Нестеронок, А. П. Езубец, В. С. Солдатов

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ИОНООБМЕННЫЕ СУБСТРАТЫ НА ОСНОВЕ СЛАБОКИСЛОТНОГО ИОНИТА ТОКЕМ-200

Аннотация. Показана возможность использования карбоксильного ионита ТОКЕМ-200 в качестве носителя биогенных ионов, необходимых для роста растений. Основной задачей исследования является выяснение ионного соотношения содержания в нем ионов K^+, Mg^{2+} и Ca^{2+}, pH субстратного раствора и суммарной концентрации электролитов. Определены физиологически приемлемые величины этих параметров, получены в лабораторных условиях соответствующие субстраты и проверена их пригодность для выращивания тест-растения – салата листового (*Lactuca sativa* L.). Выросшие на новых 100%-х ионитных субстратах БИОНА, содержащих катионит ТОКЕМ-200, тест-растения развивались нормально в течение трех последовательных вегетаций. Урожай их надземной биомассы почти не зависел от типа оптимизированного по ионному составу анионного компонента. Растения содержали нитрат-ионы в концентрациях не выше 680 мг/кг зеленой биомассы.

Ключевые слова: слабокислотный ионит, слабоосновный ионит, потенциометрическое титрование ионита, ионообменные субстраты для растений, искусственные почвы, заменитель гумуса почвы, ионитопоника, субстраты БИОНА, ТОКЕМ-200

Для цитирования. Ионообменные субстраты на основе слабокислотного ионита ТОКЕМ-200 / Л. Н. Шаченкова, Н. В. Вонсович, П. В. Нестеронок [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 1. – С. 7–16. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-7-16

L. N. Shachenkova, N. V. Vonsovich, P. V. Nesteronok, A. P. Yezubets, V. S. Soldatov

Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ION-EXCHANGE SUBSTRATES BASED ON THE WEAKLY ACIDIC ION EXCHANGER TOKEM-200

Abstract. The possibility of using the carboxyl ion exchanger TOKEM-200 as a carrier of biogenic ions necessary for plant growth has demonstrated. The main objective of the study was to determine the ionic ratio of the content of K^+, Mg^{2+}, and Ca^{2+} in it, the pH of the substrate solution and the total electrolytes concentration. Physiologically acceptable values of these parameters were determined. The corresponding substrates were obtained under laboratory conditions, and their suitability for growing the test plant – lettuce (*Lactuca sativa* L.) – was tested. The test plants, grown on new 100% ion-exchange substrates BIONA, containing TOKEM-200 cation exchange resin, developed normally over three consecutive growing seasons. The yield of aboveground biomass of the plants was almost independent of the type of anionic component optimized for ionic composition. The plants contained nitrate ions in concentrations no higher than 680 mg/kg of green biomass.

Key words: weakly acidic ion exchange resin, weakly basic ion exchange resin, potentiometric titration of ion exchange resin, ion-exchange substrates for plants, artificial soils, soil humus substitute, ionitonics, substrates BIONA, TOKEM-200

For citation. Shachenkova L. N., Vonsovich N. V., Nesteronok P. V., Yezubets A. P., Soldatov V. S. Ion-exchange substrates based on the weakly acidic ion exchanger TOKEM-200. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-7-16

Введение. Ионитные питательные субстраты для растений (искусственные почвы, ионитные почвы) на основе органических ионитов состоят как минимум из одного катионита и одного анионита. Они содержат шесть обязательных макроионов, включающих основные элементы питания (N, P, K, S, Ca, Mg), и микроэлементы (Fe, Na, Mn, Cu, Co, Ni, Zn, B, Mo). Основной принцип их

получения непосредственно не регламентирует их ионного состава. Смесь катионитов и анионитов должна иметь состав (по соотношению и количеству питательных элементов), при котором она находится (реально или виртуально) в равновесии с одним из многокомпонентных растворов, пригодных для роста растений и использования в гидропонных технологиях, включающих все перечисленные питательные вещества в виде ионов. Кроме того, необходимо, чтобы pH такого раствора и суммарная концентрация ($C_{\sum}$) электролитов в нем соответствовали физиологическим потребностям растения (приблизительно pH = 5–8, $C_{\sum}$ = 0,01–0,03 экв/л). Такие параметры равновесного раствора были приняты за основу при создании искусственных (гидропонных) питательных растворов [1]. В настоящее время известно несколько сотен, а возможно, и тысяч конкретных питательных растворов, при этом число различных сочетаний концентраций почти не ограничено. Количество ионитных субстратов можно получить в разы больше, так как один и тот же равновесный раствор дает разные соотношения питательных элементов в ионитном субстрате при вариациях химического типа исходных ионитов и соотношения их количеств. Кроме того, состав равновесного раствора ограничен осадкообразованием при введении в воду всех перечисленных ионов. Этого можно избежать, если получать ионообменный субстрат путем механического смешивания моноионных форм ионитов.

При получении ионитных субстратов необходимо соблюдать и некоторые другие очевидные требования к исходным ионитам: отсутствие фитотоксичности и токсичности водных вытяжек для человека, животных, почвенной микрофлоры; химическая и биологическая устойчивость в различных средах, в особенности в прикорневой зоне растений; устойчивость к длительному хранению; стерилизуемость. Последняя группа требований обычно легко соблюдается при использовании промышленно выпускаемых ионитов, так как они предназначены для очистки воды (в том числе питьевой) и жидких пищевых продуктов. Однако это актуально для новых ионитов или экспериментальных продуктов, которые могут содержать остатки моно- и олигомеров, что недопустимо для компонента искусственной почвы.

С учетом вышесказанного ясно, что даже на основе широко используемых ионитов, число типов которых исчисляется, вероятно, десятками, можно получить неисчислимое количество ионитных субстратов, различающихся: соотношением катионов в катионитах, анионов в анионитах, катионита и анионита; химической структурой анионита и катионита; распределением биоионов по соответствующим ионитам; общей концентрацией и pH солевых растворов, использующихся для приготовления субстратов. В связи с этим появление на рынке каждого нового ионита создает возможность получения нового варианта питательного субстрата для растений. Методы получения ионообменных субстратов, базирующиеся на данных по химическому равновесию ионит–раствор, гарантируют получение пригодных для роста растений субстратов из любых ионитов, соответствующих описанным выше требованиям. Однако эти гарантии распространяются только на начальный период развития растения, пока оно не изменило состав ионитной смеси в процессе своего роста. Субстрат высокой эффективности должен иметь большой резерв питательных веществ по элементам, расходующимся растениями в первую очередь (лимитирующим рост растений). К ним обычно относятся калий и азот, реже некоторые микроэлементы (железо, цинк).

Карбоксильные катиониты заслуживают особого внимания для применения в качестве носителей биогенных ионов из-за способности поддерживать pH среды в пределах, приемлемых для корневой системы растений, при значительном изменении содержания биоионов, что чрезвычайно важно с точки зрения практического растениеводства.

Цель работы – предварительные исследования применимости промышленного карбоксильного катионита ТОКЕМ-200 в качестве компонента ионитного питательного субстрата.

Имеющихся в литературе данных о кислотно-основных свойствах этого ионита недостаточно для оценки его перспективности для получения ионитных субстратов. Необходимо иметь информацию о зависимости сорбции катиона K^+ ионитом от pH внешнего раствора и концентрации в нем катиона калия, поскольку истощение субстрата по K^+ в процессе роста растений на ионитных субстратах является первой причиной потери плодородия [1, 2].

В настоящей работе были экспериментально получены кривые титрования катионита ТОКЕМ-200 при трех постоянных концентрациях KCl (1,00; 0,10 и 0,01 моль/л) в интервале pH 2–12. Из этих

данных были найдены параметры его кислотности, на основе которых была рассчитана теоретическая кривая титрования при концентрации KCl в растворе 0,02 моль/л, соответствующей почвенному раствору. Из теоретической кривой нашли интервал pH и предельно допустимое содержание калия в ионите. Разработаны новые варианты ионообменных субстратов на его основе в сочетании с различными слабоосновными анионитами. Первые испытаны в биологическом эксперименте по выращиванию салата листового сорта Афицион (*Lactuca sativa* L.) относительно контрольного образца субстрата БИОНА-111® (ТУ РБ 100185198.063-2002).

Объекты и методы исследования. *Иониты.* ТОКЕМ-200 по данным производителя (ТУ 2227-019-72285630-2009) является гранульным макропористым карбоксильным катионитом на акрил-дивинилбензольной матрице (статическая обменная емкость – 4,3 мэкв/см^3; эффективный размер зерен – 0,4–0,6 мм, насыпная масса – 0,74–0,80 г/см^3). Данные о химической природе акрилового звена, проценте кросс-агента и характеристиках пористости не приводятся.

ТОКЕМ-320, ТОКЕМ-400 и АН-31 – гранульные слабоосновные аниониты разной структуры, содержащие одинаковые функциональные группы – третичные аминогруппы [3]. В табл. 1 представлены ионные составы анионитов, полученные при приведении в химическое равновесие питательным раствором с общей концентрацией анионов 20 мэкв/л с относительными эквивалентными долями: $X_N = 0{,}80$, $X_S = 0{,}15$, $X_P = 0{,}05$; pH = 6,5 [4–6].

Таблица 1. **Ионный состав анионообменных компонентов субстратов при равновесии с питательным раствором: C = 20 мэкв/л: NO_3^- – 16, $H_2PO_4^-$ – 1, SO_4^{2-} – 3; pH ≈ 6,5**

Table 1. **Ionic composition of anion exchange components of substrates when they are equilibrated with a nutrient solution: C = 20 meq/l: NO_3^- – 16, $H_2PO_4^-$ – 1, SO_4^{2-} – 3; pH ≈ 6,5**

Анионит	Содержание анионов, мэкв/г				Относительные эквивалентные доли		
	NO_3^-	SO_4^{2-}	$H_2PO_4^-$	Σ	NO_3^-	SO_4^{2-}	$H_2PO_4^-$
АН-31	2,04	2,19	0,55	4,78	0,43	0,46	0,11*
ТОКЕМ-320	2,59	0,78	0,11	3,48	0,74	0,23	0,03*
ТОКЕМ-400	1,50	2,50	0,29	4,29	0,35	0,58	0,07*

Условные обозначения: * – для $H_2PO_4^-$ приведены относительные мольные доли.

Обменная емкость и потенциометрическое титрование. Для определения кислотно-основных свойств катионит предварительно обрабатывали раствором HCl, затем отмывали дистиллированной водой до pH ~6,5 и сушили на воздухе при комнатных условиях до постоянного веса.

Обменную емкость катионита определяли титриметрически: навеска образца массой ~0,3 г заливалась 20 мл 0,1 н раствора NaOH и выдерживалась в течение времени, гарантирующего наступление равновесия (48 ч) при периодическом перемешивании. Аликвота раствора, отобранная по весу (±0,0002 г), титровалась 0,1 н раствором соляной кислоты. Величина обменной емкости (ОЕ) рассчитывалась из количества титранта, пошедшего на нейтрализацию избыточной щелочи, и оказалась равной 11,7 миллиэквивалентов на грамм сухого ионита в Н-форме (мэкв/г), что согласуется с ТУ 2227-019-72285630-2009.

Кривые потенциометрического титрования получены методом одной навески [7]. Титрование суспензии ~0,5 г ионита в 30 мл раствора фонового электролита KCl различной концентрации (1,00; 0,10 и 0,01 моль/л) проводилось 1 М раствором KOH, приготовленным на фоне раствора KCl, соответствующего концентрации солевого фона. Добавление каждой последующей порции титранта происходило по массе после того, как дрейф pH в течение 5 мин не превышал 0,02. В работе использовали pH-метр HANNA 213 со стеклянным электродом.

Методика определения катионного состава ионита, равновесного питательному раствору, используемому для его насыщения в колоночных условиях. Раствор насыщения общей концентрацией катионов 20 мэкв/л готовили из нитратов калия, магния и кальция с относительными эквивалентными долями $X_K = 0{,}70$, $X_{Mg} = 0{,}10$, $X_{Ca} = 0{,}20$, pH = 6,5. Для ускорения процесса уравновешивания в колоночных условиях катионит предварительно был переведен в смешанную H^+–K^+-форму (K^+ = 6,0 мэкв/г). Навеску полученной формы катионита (1 г) помещали в колонку (диаметр – 16 мм,

высота слоя ионита – 7 мм, объем фильтрационного слоя (ОФС) – 1,4 см^3) и пропускали раствор со скоростью ~4 мл/ч (~2,8 ОФС/ч) до момента достижения равенства pH и концентраций всех ионов на входе и выходе из колонки. После этого ионит центрифугировали 15 мин при 4 000 об/мин для удаления избытка раствора. Затем проводилось полное вытеснение ионов раствором 0,5 н HCl, объем элюата – 300 мл. Аликвоту элюата досуха выпаривали на водяной бане, растворяли сухой остаток в воде и анализировали раствор методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104-Т». Содержание катионов выражали в миллиэквивалентах на грамм сухого ионита в H-форме (мэкв/г).

Получение ионообменных субстратов и исследование их свойств. Ионообменные субстраты получали солевым методом в статических условиях [8]. В качестве анионообменных компонентов использовали аниониты с третичными аминогруппами: гелевые АН-31 и ТОКЕМ-400 и макропористый ТОКЕМ-320. Равноэквивалентную смесь катионита ТОКЕМ-200 в H-форме и анионита (АН-31, ТОКЕМ-400 или ТОКЕМ-320) в OH-форме однократно при перемешивании обрабатывали раствором солей макро- (калий, магний, кальций, азот, фосфор и сера) и микроэлементов (железо, марганец, бор, медь, цинк, кобальт, никель, молибден). Соотношение биогенных макроионов в реагентной смеси соответствовало соотношению этих ионов в выбранных ионитах, равновесных в динамических условиях раствору насыщения (C = 20 мэкв/л: K^+ – 14, Mg^{2+} – 2, Ca^{2+} – 4, NO_3^- – 16, $H_2PO_4^-$ – 1, SO_4^{2-} – 3, pH ≈ 6,5). Количество вводимых микроэлементов идентично рецептуре производства БИОНА-111® [8].

Физические свойства полученных субстратов изучали по общепринятым методикам [9, 10]. Для получения водных вытяжек 10 г субстрата настаивали в 20 мл воды и выдерживали в течение 24 ч при периодическом перемешивании. Удельную электропроводность (УЭП) растворов измеряли с помощью кондуктометра HANNA EC214, ионный состав – методом капиллярного электрофореза.

Эксперименты по определению набухания проводили весовым методом: набухший в растворе субстрат центрифугировали в лабораторной центрифуге (4 000 об/мин) в течение 20 мин. Значение набухания (W, гH_2O/г) рассчитывали как отношение массы воды к массе сухого ионита.

Для раздельного количественного определения содержания биоэлементов в катионном и анионном компонентах субстратов механически были выделены из них навески катионита и анионита, через которые в колоночных условиях пропускали растворы 0,5 н HCl (для катионита) или 0,4 н $(NH_4)_2CO_3$ (для анионитов). Аликвоты из полученных элюатов, подготовленные по описанной ранее методике [3], анализировали методом капиллярного электрофореза.

Биологическое испытание субстратов. Сравнительные биологические испытания полученных образцов субстратов проводили в лабораторных условиях относительно контрольного образца БИОНА-111®, состоящего из сильнокислотного катионита ТОКЕМ-100 и полиосновного анионита ЭДЭ-10П. Освещенность на уровне листовой пластины ~5 000 Лк при длительности светового периода 18 ч. Температура воздуха в фитотроне составляла 20–22 °C. Экспериментальная культура – салат листовой сорта Афицион (*Lactuca sativa* L.). Посадка пророщенных семян осуществлялась по 1 семени на вазон. Использовали пластиковые вазоны высотой 5 см, почвенной площадью 27 см^2; объем заполнения субстратом – 70 см^3 (30 г сухого субстрата). Было поставлено две серии экспериментов по три повторности. В первом случае полив осуществлялся дистиллированной водой, во втором – водопроводной. Эксперимент продолжался согласно средней продолжительности технического вегетационного периода салата листового – 30 суток. После извлечения корней в те же субстраты (без какой-либо обработки) проводили посадку новых пророщенных семян для следующей вегетации. Проведено три последовательные вегетации.

Продуктивность субстратов определяли по количеству сырой биомассы надземной части растений в конце каждой вегетации с единицы веса субстрата ($г_{биомассы}/г_{субстрата}$).

Количество нитрат-ионов в водных вытяжках из зеленой биомассы салата определяли ионометрическим методом с использованием нитрат-селективного электрода ЭКОМ-NO_3.

Результаты и их обсуждение. Априорная оценка пригодности неизвестного ионита в качестве компонента ионитного субстрата требует знания параметров кислотности, которые позволят рассчитать его рабочую емкость по доступным для растений элементам питания в интерва-

ле физиологических значений pH и возможных изменений суммарной концентрации солевого фона в процессе роста растений. Эти параметры [11] находятся из данных по потенциометрическому титрованию ионита в H^+-форме щелочью того иона, по которому начинает проявляться недостаток в процессе роста растений на субстрате без дополнительного внесения удобрений. В данном случае это ион K^+.

Теоретическая модель и способы расчета параметров кислотности ионитов детально описаны [11]. Гетерогенный процесс нейтрализации катионита в H^+-форме (RH) щелочью (KtOH) в этой модели (1) описывается совместным применением уравнения коэффициента равновесия ионного обмена $k_i(X_i, C_{Kt})$ (2) и ионного произведения воды (3):

$$RH + Kt^+ = R^-Kt^+ + H^+, \tag{1}$$

$$k_i(X_i, C_{Kt}) = (C_{RKt} \cdot C_H)/(C_{RH} \cdot C_{Kt}) = (X_{RK} \cdot X_H)/(X_{RH} \cdot X_K), \tag{2}$$

$$[H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}, \tag{3}$$

где X_{RK} – относительная эквивалентная доля обменных групп ионита, нейтрализованных калием, $Kt = K^+$, $X_K + X_H = 1$; C_{Kt} – концентрация K^+ в растворе.

Вид зависимости $k_i(X_i, C_{Kt})$ индивидуален и неизвестен, однако было показано [11], что линейное приближение его логарифмической формы обеспечивает приемлемую точность расчета теоретических кривых титрования $pH = f(g)$:

$$pH = \lg(X_{RKi}/(1 - X_{RKi})) - pK°_i - \Delta pk_i\,(X_{RKi} - {}^1/_2) - (1 - b) \cdot \lg C, \tag{4}$$

где b – эмпирическая константа [11], $pK° = -\lg K°$, $K°$ – константа ионообменного равновесия (5) [12, 13]:

$$\lg K° = {}_0\int^1 \cdot \lg k \cdot dx = {}^1/_2(\lg k_{X=0} - \lg k_{X=1}). \tag{5}$$

Определение этих зависимостей возможно из независимых экспериментальных данных, что и было сделано в настоящей работе. Уравнение (4) выражает в количественном виде влияние природы катиона нейтрализующей щелочи (через k), его концентрации (C) и степени нейтрализации ионита (X) на положение и форму кривой титрования.

Далее все рассмотрение проводится в приближении, не учитывающем неидеальности ионита, так как способы определения активности его компонентов не известны. Концентрация вместо активности используется и для K^+ и Cl^- в растворе, потому что их концентрации невелики. Тем не менее, рассчитанные кривые титрования (рис. 1, *a*) хорошо описывают экспериментальные

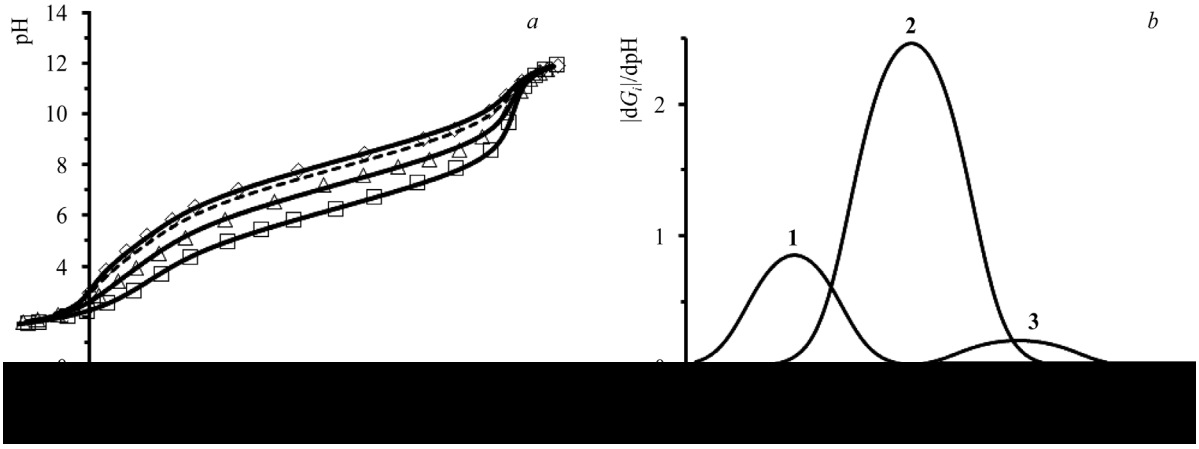

Рис. 1. Кривые потенциометрического титрования катионита ТОКЕМ-200 при различных концентрациях фонового электролита KCl: □ – 1 М; Δ – 0,1 М; ◊ – 0,01 М; пунктир – 0,02 М (*a*) и дифференциальные кривые сорбции индивидуальных видов групп соответственно табл. 2 (*b*) (символы – экспериментальные точки, линии – расчетные кривые)

Fig. 1. Potentiometric titration curves of the cation exchanger TOKEM-200 at different concentrations of the supporting electrolyte KCl: □ – 1 M; Δ – 0.1 M; ◊ – 0.01 M; dotted line – 0.02 M (*a*) and differential sorption curves of individual types of groups according to Table 2 (*b*) (symbols are experimental data, lines are calculated curves)

Эксперимент по выращиванию салата листового (*Lactuca sativa* L.) показал, что выросшие на 100%-х ионитных субстратах, содержащих катионит ТОКЕМ-200, тест-растения развивались нормально в течение трех последовательных вегетаций. Урожай их надземной биомассы почти не зависел от типа оптимизированного по ионному составу анионного компонента. Растения содержали нитрат-ионы в концентрациях не выше 680 мг/кг зеленой биомассы.

Список использованных источников

1. A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations / R. S. Velazquez-Gonzalez, A. L. Garcia-Garcia, E. Ventura-Zapata [et al.] // Agriculture. – 2022. – Vol. 12, № 5. – Art. 646. https://doi.org/10.3390/agriculture12050646

2. Медведев, С. С. Физиология растений : учебник / С. С. Медведев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 512 с.

3. Шаченкова, Л. Н. Ионообменные субстраты БИОНА с новыми анионообменными компонентами / Л. Н. Шаченкова, А. П. Езубец, Н. В. Вонсович // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 2. – С. 105–118.

4. Вонсович, Н. В. Биозона слабоосновного анионита Токем-400 в равновесии с трехкомпонентными растворами NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$ / Н. В. Вонсович // Круглый стол магистрантов, аспирантов и соискателей Отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси, Минск, 28 февр. 2024 г. : тез. докл. / Нац. акад. наук Беларуси, Отд-ние химии и наук о Земле, Совет молодых ученых ; редкол.: А. В. Труханов (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2024. – С. 7.

5. Определение биозоны слабоосновного анионита АН-31 в равновесии с трехкомпонентными питательными растворами «NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$» / Н. В. Вонсович, Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, А. П. Езубец // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : материалы VIII Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Гомель, 22–24 окт. 2024 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2024. – С. 18–19.

6. Вонсович, Н. В. Биозона слабоосновного анионита Токем-320 в равновесии с трехкомпонентными питательными растворами NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$ / Н. В. Вонсович, Е. Г. Косандрович // Молодежь в науке – 2024 : тез. докл. XXI Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 29–31 окт. 2024 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2024. – Ч. 2. – С. 478–480.

7. Acid-base properties of ion exchangers. I. Optimising of potentiometric titration of ion exchangers exemplified by carboxylic acid resins / V. S. Soldatov, Z. I. Sosinovich, T. A. Korshunova, T. V. Mironova // Reactive and Functional Polymers. – 2004. – Vol. 58, № 1. – P. 3–12. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.003

8. Солдатов, В. С. Ионитные почвы / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Хорошко. – Мн. : Наука и техника, 1978. – 270 с.

9. Кидин, В. В. Практикум по агрохимии : учеб. пособие / В. В. Кидин, И. П. Дерюгин, В. И. Кобзаренко. – М. : КолосС, 2008. – 599 с.

10. Спирина, В. З. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений : учеб. пособие / В. З. Спирина, Т. П. Соловьева. – Томск, 2014. – 347 с.

11. Soldatov, V. S. Potentiometric titration of ion exchangers / V. S. Soldatov // Reactive and Functional Polymers. – 1998. – Vol. 38, № 2–3. – P. 73–112. https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2

12. Davidson, W. Equilibrium constants of cation exchange processes / W. Davidson, W. J. Argersinger Jr. // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1953. – Vol. 57, № 3. – P. 105–115. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1953.tb36390.x

13. Gaines Jr., G. L. Adsorption studies on clay minerals. II. A formulation of the thermodynamics of exchange adsorption / G. L. Gaines Jr., H. C. Thomas // The Journal of Chemical Physics. – 1953. – Vol. 21, № 4. – P. 714–718. https://doi.org/10.1063/1.1698996

14. Мейчик, Н. Р. Расчет константы ионизации функциональных групп карбоксильных ионитов / Н. Р. Мейчик, С. И. Степанов, Ю. И. Николаева // Журнал физической химии. – 2018. – Т. 92, № 2. – С. 251–256. https://doi.org/10.7868/S0044453718010168

15. Чугунов, А. С. Кислотно-основные свойства карбоксильного катионита ТОКЕМ-200 при сорбции ионов щелочных металлов и аммония / А. С. Чугунов // Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (Технического университета). – 2015. – № 29. – С. 19–23.

16. Выращивание растений без почвы / В. А. Чесноков, Е. Н. Базырина, Т. М. Бушуева, Н. Л. Ильинская. – Л. : Ленингр. ун-т, 1960. – 170 с.

References

1. Velazquez-Gonzalez R. S., Garcia-Garcia A. L., Ventura-Zapata E., Barceinas-Sanchez J. D. O., Sosa-Savedra J. C. A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. *Agriculture*, 2022, vol. 12, iss. 5, art. 646. https://doi.org/10.3390/agriculture12050646

2. Medvedev S. S. *Plant physiology*. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2012. 512 p. (in Russian).

3. Shachenkova L. N., Yezubets H. P., Vonsovich N. V. Ion exchange BIONA substrates with new anion exchange components. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2024, no. 2, pp. 105–118 (in Russian).

4. Vonsovich N. V. Biozone of weakly basic anion exchanger Tokem-400 in equilibrium with three-component solutions NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$. *Kruglyi stol magistrantov, aspirantov i soiskatelei Otdeleniya khimii i nauk o Zemle NAN Belarusi:*

tez. dokl. [Round table of master's, postgraduate and applicants students of the Department of Chemistry and Geosciences of the National Academy of Sciences of Belarus. Abstracts of reports]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2024, pp. 7 (in Russian).

5. Vonsovich N. V., Kosandrovich E. G., Shachenkova L. N., Yezubets A. P. Determination of the biozone of weakly basic anion exchanger AN-31 in equilibrium with three-component nutrient solutions "NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$". *Novye funktsional'nye materialy, sovremennye tekhnologii i metody issledovaniya: Materialy VIII Respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Gomel', 22–24 okt. 2024 g.* [New functional materials, modern technologies and research methods. Proc. of the VIII Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Gomel, October 22–24, 2024]. Gomel, 2024, pp. 18–19 (in Russian).

6. Vonsovich N. V., Kosandrovich E. G. Biozone of weakly basic anionite Tokem-320 in equilibrium with three-component nutrient solutions NO_3^-–SO_4^{2-}–$H_2PO_4^-$. *Molodezh' v nauke – 2024: Tez. dokl. XXI Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh, Minsk, 29–31 okt. 2024 g. Ch. 2* [Youth in Science – 2024. Proc. of the XXI International Scientific Conf. of Young Scientists, Minsk, October 29–31, 2024. Part. 2]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2024, pp. 478–480 (in Russian).

7. Soldatov V. S., Sosinovich Z. I., Korshunova T. A., Mironova T. V. Acid-base properties of ion exchangers. I. Optimising of potentiometric titration of ion exchangers exemplified by carboxylic acid resins. *Reactive and Functional Polymers*, 2004, vol. 58, no. 1, pp. 3–12. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.003

8. Soldatov V. S., Piorishkina N. G., Horoshko R. P. *Ion Exchange Soils*. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1978. 270 p. (in Russian).

9. Kidin V. V., Deryugin I. P., Kobzarenko V. I. *Agrochemistry Workshop*. Moscow, KolosS Publ., 2008. 599 p. (in Russian).

10. Spirina V. Z., Solov'eva T. P. *Agrochemical methods for studying soils, plants and fertilizers*. Tomsk, 2014. 347 p. (in Russian).

11. Soldatov V. S. Potentiometric titration of ion exchangers. *Reactive and Functional Polymers*, 1998, vol. 38, no. 2–3, pp. 73–112. https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2

12. Davidson W., Argersinger W. J. Jr. Equilibrium constants of cation exchange processes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1953, vol. 57, iss. 3, pp. 105–115. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1953.tb36390.x

13. Gaines G. L. Jr., Thomas H. C. Adsorption studies on clay minerals. II. A formulation of the thermodynamics of exchange adsorption. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, vol. 21, no. 4, pp. 714–718. https://doi.org/10.1063/1.1698996

14. Meychik N. R., Stepanov S. I., Nikolaeva Y. I. Calculating the ionization constant of functional groups of carboxyl ion exchangers. *Russian Journal of Physical Chemistry A,* 2018, vol. 92, no. 2, pp. 265–270. https://doi.org/10.1134/s0036024418010156

15. Chugunov A.S. Acid-base properties of protonated form of carboxyl cation exchangers TOKEM-200 under sorption of alkali metal and ammonium. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (Tekhnicheskogo universiteta) = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2015, no. 29, pp. 19–23 (in Russian).

16. Chesnokov V. A., Bazyrina E. N., Bushueva T. M., Il'inskaya N. L. *Growing plants without soil*. Leningrad, Leningr. un-t Publ., 1960. 170 p. (in Russian).

Информация об авторах

Шаченкова Лариса Николаевна – кандидат химических наук, заведующий лабораторией. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sln13102005@mail.ru

Вонсович Наталия Васильевна – научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: natasha_ya_vonsovich@tut.by

Нестеронок Петр Викторович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: petr.nester@gmail.com

Езубец Анна Павловна – научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna.ezubets94@gmail.com

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Information about the authors

Shachenkova Larisa N. − Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sln13102005@mail.ru

Vonsovich Nataliya V. – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: natasha_ya_vonsovich@tut.by

Nesteronok Petr V. − Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petr.nester@gmail.com

Yezubets Hanna P. – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna.ezubets94@gmail.com

Soldatov Vladimir S. − Academician, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Chief Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by