



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 54.057:543.421.424:544.723.23

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12139

Диффузионная и химическая кинетика адсорбции метиленового голубого на кремнеземах, допированных ионами железа (III)

Евгений Николаевич Титов^{1,2},

Дмитрий Евгеньевич Смальченко¹, Ольга Евгеньевна Лебедева¹

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия, olebedeva@bsu.edu.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Аннотация. Кремнеземы находят широкое применение в катализе, адсорбции, хроматографии. В последнее десятилетие растет их использование в медицине, однако для обеспечения биосовместимости необходимо модифицирование кремнезёмов, простейшим вариантом которого является допирование катионами железа. В статье представлено исследование сорбционных характеристик кремнезёмов, допированных катионами железа. Целью исследования являлась оценка влияния допирования ионами железа на кинетику адсорбции кремнеземами модельного сорбата метиленового голубого. Допированные кремнеземы синтезированы алкоксидным золь-гель методом при pH=1.5 и pH=5.0 с введением катионов железа в реакционную смесь в ходе гидролиза тетраэтоксисилана. Содержание железа в образцах составило 1.5, 2.3 и 3.8 атомных процентов. По результатам рентгенофазового анализа все образцы рентгеноаморфны. По форме изотерм низкотемпературной адсорбции азота все образцы отнесены к микропористым. Площадь удельной поверхности образцов и общий объем пор несколько снижаются с ростом содержания железа в образцах. Адсорбция метиленового голубого производилась при температуре 25, 30 и 35°C. Кинетические кривые адсорбции проанализированы при помощи моделей диффузионной кинетики: модели Бойда (внешнедиффузионный процесс) и модели Морриса-Вебера (внутридиффузионный процесс). Также данные кинетических исследований были проанализированы с использованием кинетических моделей псевдопервого порядка (модель Лагергрена) и псевдвторого порядка (модель Хо и Маккея). Установлено, что все образцы характеризуются смешаннодиффузионным течением сорбционного процесса. Кинетику адсорбции адекватно описывает модель псевдвторого порядка.

Ключевые слова: золь-гель, кремнезем, адсорбция, метиленовый голубой, смешаннодиффузионный режим, кинетика псевдвторого порядка.

Для цитирования: Титов Е.Н., Смальченко Д.Е., Лебедева О.Е. Диффузионная и химическая кинетика адсорбции метиленового голубого на кремнеземах, допированных ионами железа (III) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 2. С. 281-288. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12139>

Original article

Diffusion and chemical kinetics of methylene blue dye adsorption on silica doped with iron (III) ions

Evgeniy N. Titov^{1,2}, Dmitriy E. Smalchenko¹, Olga E. Lebedeva¹

¹Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

²All-Russian Research Institute of the Dairy Industry, Moscow, Russia, olebedeva@bsu.edu.ru

Abstract. Silica are widely used in catalysis, adsorption, and chromatography. In the last decade, they have been increasingly used in medicine, however, to ensure their biocompatibility, silica need to be modified and the simplest way of such a modification is doping them with iron cations. The article presents a study of the

sorption characteristics of silica doped with iron cations. The purpose of the study was to assess the effect of doping silica with iron ions on the kinetics of their adsorption of model sorbate of methylene blue dye. Doped silica were synthesised by the alkoxide sol-gel method at pH=1.5 and pH=5.0 with the introduction of iron cations into the reaction mixture during the hydrolysis of tetraethoxysilane. The iron content in the samples was 1.5, 2.3, and 3.8 at. %. According to the results of X-ray phase analysis, all samples were X-ray amorphous. According to the shape of the isotherms of low-temperature nitrogen adsorption, all samples were classified as microporous. The specific surface area of the samples and the total pore volume decreased slightly with an increase in the iron content in the samples. The adsorption of methylene blue dye was carried out at temperatures of 25, 30, and 35 °C. The kinetic adsorption curves were analysed using the following diffusion kinetics models: Boyd model (external diffusion process) and Weber-Morris model (internal diffusion process). Also, the kinetic data were analysed using kinetic models of pseudo first-order (Lagergren model) and pseudo second-order (Ho and McKay's model). It was established that all samples were characterised by a mixed-diffusion regime of the sorption process. Adsorption kinetics was adequately described by the model of pseudo-second-order.

Keywords: sol-gel, silica, adsorption, methylene blue dye, mixed diffusion regime, kinetics of pseudo-second-order.

For citation: Titov E.N., Smalchenko D.E., Lebedeva O.E. Diffusion and chemical kinetics of methylene blue dye adsorption on silica doped with iron (III) ions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(2): 281-288. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12139>

Введение

Кремнеземы находят широкое применение благодаря сочетанию таких свойств как развитая поверхность, высокая пористость, низкая плотность, разнообразие способов получения и модифицирования, нетоксичность, термическая стабильность. Перечисленные свойства лежат в основе использования кремнезёмов в катализе [1,2], сорбции [3,4], хроматографии [5,6]. Новые возможности открылись с появлением и развитием золь-гель метода в различных вариантах: в последние годы привлекают широкое внимание наночастицы оксида кремния [7], аэрогели [8], упорядоченные мезопористые кремнеземы [9,10] и другие разновидности материалов на основе оксида кремния. Синтез ксерогелей алкоксидным золь-гель методом достаточно прост: он включает стадии гидролиза алкоксида, поликонденсацию продуктов гидролиза и последующее прокалывание [11].

Кремнеземы рассматриваются как весьма перспективные биоматериалы для таргетной доставки лекарственных средств в организме и контрастирования изображений в современных методах диагностики, поскольку кремнеземы обладают биосовместимостью, гидрофильно-

стью и способностью длительно циркулировать в крови [12]. Тем не менее, остаются некоторые опасения последствий возможного накопления этих материалов в организме, и продолжается поиск способов их модифицирования для повышения биосовместимости. Установлено, что допирование силикагелей ионами железа (III) повышает способность материалов к биodeградации [13]. В связи с этим изучение сорбционных свойств кремнезёмов, допированных ионами железа, представляет интерес для оценки применимости данных материалов для адресной доставки лекарств. Эта функция требует высокой поглотительной способности и возможности постепенного высвобождения сорбата, то есть необходимо контролировать кинетику адсорбции. Оптимальным является допант, регулирующий способность материала к биodeградации, но при этом не ухудшающий его сорбционные характеристики.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния допирования ионами железа кремнезёмов, полученных золь-гель методом в различных условиях, на кинетику адсорбции модельного сорбата метиленового голубого.

Известны работы по исследованию свойств железосодержащих кремнезёмов, полученных другими методами. Так,



в [14] подробно охарактеризованы образцы, синтезированные методами пропитки кремнезема солью железа и осаждения из паровой фазы. Авторы отмечают, что при низком содержании железа (1 масс.%) формируются материалы, содержащие преимущественно изолированные ионы железа. С увеличением содержания железа проявляется взаимодействие ионов железа с подложкой, формируется новая фаза, снижается площадь удельной поверхности образца. Размеры поверхности также зависят от метода приготовления образцов. Осаждение хлорида железа из паровой фазы приводит к наиболее заметному снижению площади удельной поверхности. Представляла интерес оценка поведения кремнеземов, допированных ионами железа непосредственно в процессе синтеза, поскольку в этом случае достигается наиболее равномерное распределение допанта по образцу и, как следствие, минимальное влияние на сорбционные характеристики материалов.

Экспериментальная часть

Кремнеземы получали гидролизом тетраэтоксисилана (ТЭОС) квалификации «о.с.ч.» в присутствии ионов железа, источником которых служил нонагидрат нитрата железа квалификации «х.ч.». Процесс осуществляли в водно-спиртовом растворе. Для получения всех образцов основные компоненты смешивали в мольном соотношении ТЭОС : этанол : вода, составляющем 1 : 4 : 16. Соль железа добавляли в реакционную смесь с таким расчетом, чтобы в конечном сухом легированном кремнеземе содержание железа составляло 1.5, 2.3 или 3.8 ат. %. Синтез проводили при двух различных значениях рН: 1.5 и 5.0, которые поддерживали добавлением 1М раствора аммиака для образцов с рН=5.0, либо добавлением 0.01М раствора азотной кислоты для образца с рН=1.5. При достижении необходимого значения рН образцы в течение 1 ч перемешивали на магнитной

мешалке (500 об/мин) и помещали в термостат при температуре 50°C до окончания процессов поликонденсации (до момента перехода золя в гель). Старение образцов осуществляли при 85°C в течение 12 ч с последующим прокаливанием при 500°C (скорость нагрева 10°C/мин) в течение 3 ч.

Рентгенофазовый анализ выполняли с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра SmartLab – Rigaku (CuK α – излучение). Текстуальные характеристики (площадь удельной поверхности, общий объем пор, распределение пор по размерам) определяли методом низкотемпературной адсорбции-термодесорбции азота на анализаторе удельной поверхности и пористости TriStar 3020 при температуре 77 К.

Для определения кинетических характеристик адсорбции в качестве сорбата использовали краситель метиленовый голубой. Эксперименты проводили при 25, 30 и 35°C в течение 240 минут. Значения рН исходного раствора метиленового голубого составляло 6.64; после окончания кинетических экспериментов рН растворов лежали в диапазоне 5.40-5.90. Исследования выполняли в режиме ограниченного объема. Концентрацию красителя в растворе определяли спектрофотометрически с использованием спектрофотометра Specord 210 PLUS (Analytic Jena) при максимуме поглощения 665 нм. Положение максимума не изменялось в ходе эксперимента и свидетельствовало о мономерной форме метиленового голубого в растворе. Полученные кинетические кривые были проанализированы при помощи моделей диффузионной кинетики: модели Бойда (внешнедиффузионный процесс) [16] и модели Морриса-Вебера (внутридиффузионный процесс) [17]. Также данные кинетических исследований были проанализированы с использованием кинетических моделей псевдопервого (модель Лагергрена [18]) и псевдовторого (модель Хо и Маккея [19]) порядков.

Таблица 1. Состав и текстурные свойства кремнезёмов, допированных ионами железа
 Table 1. Composition and textural properties of silicas doped with ferric ions

№	pH гидролиза	Содержание железа, ат.%	Площадь удельной поверхности, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Диапазон диаметров пор, нм
1	1.5	1.5	590	0.32	1.8-5.0
2		2.3	586	0.22	1.8-5.0
3		3.8	437	0.21	1.8-5.0
4	5.0	1.5	541	0.34	1.8-80.0
5		2.3	432	0.19	1.8-60.0
6		3.8	386	0.16	1.8-50.0

Обсуждение результатов

Общая характеристика синтезированных образцов легированных кремнезёмов представлена в таблице 1. Далее в тексте нумерация образцов сохраняется. Согласно данным РФА, все образцы рентгеноаморфны. Изотермы низкотемпературной адсорбции азота для всех изучаемых образцов однотипны. Они относятся к I типу по классификации ИЮПАК, характерному для микропористых сорбентов. Можно видеть, что повышение содержания железа в образцах приводит к некоторому снижению площади удельной поверхности и объема пор легированных кремнезёмов (табл. 1). Отсутствие рефлексов соединений железа на рентгеновских дифрактограммах свидетельствует, что крупные агломераты, сужающие либо блокирующие поры кремнезёмов, не сформировались. Однако нельзя исключать присутствие наноразмерных рентгеноаморфных частиц оксида железа или его гидрата. Можно было ожидать, что это найдет отражение в развитии внутридиффузионных ограничений, особенно для молекул большего размера, чем молекула азота. В качестве такого сорбата использовали метиленовый голубой.

Особенностью метиленового голубого является разнообразие форм его нахождения в растворах, обусловленное участием в различных протолитических и окислительно-восстановительных процессах [15]. Поскольку адсорбционные

эксперименты проводились при значении pH, близком к нейтральному, в отсутствие восстановителей в системе, исходили из предположения о преобладании в растворе метиленового голубого в его таутомерных окисленных формах. Эти формы положительно заряжены, что практически исключает их избирательную адсорбцию на катионах железа, инкорпорированных в кремний-кислородную трехмерную сетку.

Кинетические кривые адсорбции метиленового голубого получали при начальной концентрации сорбата в растворе 0.03 ммоль/дм³. Эксперимент провели для трех различных значений температуры. Примеры кинетических кривых поглощения метиленового голубого допированными кремнезёмами при 25°C приведены на рис. 1. В рамках моделей диффузионной кинетики были построены зависимости $-\ln(1-F) = f(t)$ и $F = f(t^{1/2})$, где F – степень завершения процесса, рассчитываемая по формуле

$$F = a_t/a_e,$$

где a_e и a_t – количество сорбированного красителя на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени t. Известно, что в случае преобладания внешнедиффузионного лимитирования процесса сорбции линейной является первая из приведенных зависимостей. Если лимитирующей стадией сорбции является внутренняя диффузия, то наблюдается линейная корреляция во втором случае [16, 17]. В нашем случае удовлетворительные коэффициенты линейной

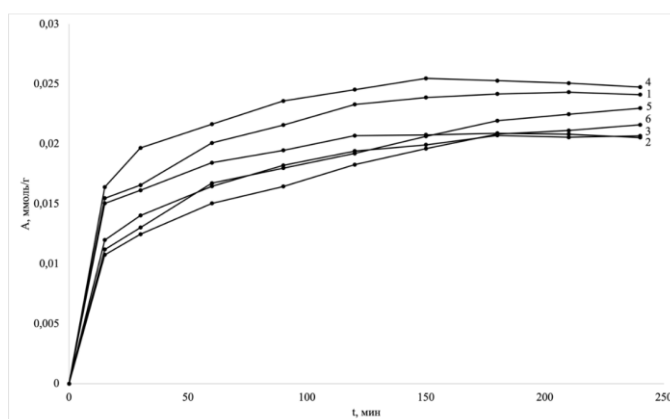


Рис. 1. Кинетические кривые поглощения метиленового голубого из водного раствора кремнеземами, допированными ионами железа, при температуре 25°C.

Fig. 1. Kinetic curves of methylene blue dye adsorption from an aqueous solution by silica doped with iron ions at a temperature of 25°C.

Таблица 2. Результаты анализа кинетических кривых адсорбции метиленового голубого методами диффузионной и химической кинетики

Table 2. Results of analysis of kinetic curves of methylene blue sorption by methods of diffusion and chemical kinetics

Образец	t, °C	Внутренняя диффузия	Внешняя диффузия	Модель псевдопервого порядка		Модель псевдовторого порядка		
		R ²	R ²	k, мин ⁻¹	R ²	A _{max} , ммоль·г ⁻¹	k, г·ммоль ⁻¹ ·мин ⁻¹	R ²
1	25	0.95	0.95	0.03	0.95	0.02	5.79	0.99
	30	0.98	0.90	0.03	0.98	0.02	6.56	0.99
	35	0.97	0.95	0.03	0.97	0.02	6.81	0.99
2	25	0.97	0.95	0.02	0.97	0.02	2.68	0.99
	30	0.95	0.97	0.03	0.95	0.02	4.90	0.99
	35	0.94	0.94	0.03	0.94	0.02	5.09	0.99
3	25	0.99	0.98	0.02	0.99	0.02	2.61	0.99
	30	0.91	0.96	0.03	0.92	0.02	2.82	0.99
	35	0.81	0.90	0.03	0.81	0.02	3.12	0.99
4	25	0.99	0.96	0.02	0.99	0.02	4.12	0.99
	30	0.98	0.87	0.02	0.97	0.02	5.07	0.99
	35	0.99	0.96	0.02	0.99	0.02	5.79	0.99
5	25	0.96	0.99	0.02	0.96	0.02	1.38	0.99
	30	0.93	0.96	0.02	0.93	0.02	1.55	0.99
	35	0.92	0.99	0.02	0.92	0.02	1.71	0.99
6	25	0.95	0.98	0.02	0.95	0.02	1.35	0.99
	30	0.85	0.99	0.02	0.85	0.02	1.48	0.99
	35	0.91	0.99	0.02	0.91	0.02	1.86	0.99

корреляции получены для обеих зависимостей (таблица 2), что не дает оснований для выделения одного из режимов как преобладающего. По-видимому, во всех случаях процесс протекает в смешанно-диффузионном режиме. В изученном ин-

тервале температур 25-35°C не зафиксировано фактов, свидетельствующих о возникновении дополнительных стерических препятствий для молекулы метиленового голубого при увеличении содержания железа в образцах. По-видимому,

пространственные затруднения возникают уже при введении минимального количества железа в образец, но при повышении концентрации железа остаются примерно на сопоставимом уровне, не возрастая настолько, чтобы вызвать переход из смешаннодиффузионного режима к выраженному лимитированию процесса внутренней диффузией. Наблюдаемые закономерности одинаковы для образцов, полученных при различных рН, несмотря на то, что диапазон рН ниже 2.0 считается метастабильной областью, а рН 5.0 отвечает типичному протеканию кислотного гидролиза алкоксидов кремния.

Для описания кинетики сорбции на поверхности твердых веществ обычно применяются модели псевдопервого и псевдодовторого порядка [18, 19]:

$$a_t = a_e \cdot (1 - e^{-k_1 t})$$
$$a_t = \frac{1}{\frac{1}{k_2 \cdot a_e^2} + \frac{t}{a_e}}$$

В таблице 2 представлены расчеты на основании указанных моделей для результатов адсорбции метиленового голубого на легированных кремнеземах при трех различных температурах.

При анализе данных таблицы 2 видно, что более адекватно адсорбция метиленового голубого на легированных силикагелях описывается моделью псевдодовторого порядка (модель Хо и Маккея). Об этом свидетельствуют как более высокие коэффициенты линейной корреляции, так и рост констант скорости с температурой при использовании данной модели при расчетах. Отметим, что наибольшие значения константы скорости получены для образцов с минимальным содержанием железа. С увеличением доли железа в образце константа скорости адсорбции снижается; этот факт косвенно подтверждает отсутствие избирательной адсорбции метиленового голубого на катионах железа. Существенно, что снижение скорости адсорбции симбатно уменьшению объема пор (табл. 1). Вероятно, причиной сниже-

ния значения эффективной константы является не изменение природы адсорбционных центров, а снижение их доступности для сорбата.

Заключение

Золь-гель методом при рН 1.5 и 5.0 синтезирован ряд кремнезёмов с различным содержанием катионов железа. Все образцы рентгеноаморфны. Изотермы низкотемпературной адсорбции азота имеют вид, характерный для микропористых образцов. Анализ кинетических кривых адсорбции метиленового голубого при трех различных температурах в рамках моделей Бойда и Морриса-Вебера показал, что для всех образцов адсорбция протекает в смешаннодиффузионном режиме. Значение рН гидролиза на характер диффузии синтезированных образцов не влияет. Кинетику адсорбции во всех случаях адекватно описывает модель псевдодовторого порядка. С увеличением доли железа в образце константа скорости адсорбции несколько снижается. Сделано заключение, что допирование кремнезёмов ионами железа приводит к небольшому снижению удельной поверхности и доступности сорбционных центров молекуле метиленового голубого, однако не приводит к преобладанию внутридиффузионных ограничений. Таким образом, допирование катионами железа, предназначенное для увеличения способности материалов к биодegradации, не снижает существенно их функциональных свойств – сорбционной способности, кинетических и диффузионных параметров адсорбции. Избежать значительного снижения константы скорости адсорбции возможно при использовании умеренных количеств железа.

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. Kaur M., Sharma S., Bedi P.M., Silica supported Brönsted acids as catalyst in organic transformations: A comprehensive review, *Chinese Journal of Catalysis*, 2015; 36(37): 520-549. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60299-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60299-0)
2. Preeti S.S., Pradnya S.S., Kanchan K.P., Vedika M.B., Sandeep A.S., Sagar D.D., Sushilkumar A.J., A Brief Overview of Recent Progress in Porous Silica as Catalyst Supports, *Journal of Composites Science*, 2021; 5(3): 75. <https://doi.org/10.3390/jcs5030075>
3. Sudam K.P., Sukalyan D., Sabita P., Mishra B.K., Adsorption of organic molecules on silica surface, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006; 121: 13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.028>
4. Syeda S.F., Azry B., Muhammad A., Noraini A.G., Development and progress of functionalized silica-based adsorbents for CO₂ capture, *Journal of Molecular Liquids*, 2021; 338: 116913. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116913>
5. Engelhardt H., Löw H., Götzinger W., Chromatographic characterization of silica-based reversed phases, *Journal of Chromatography A*, 1991; 544: 371-379. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)83996-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)83996-0)
6. Yashin Y.I., Yashin A.Y., Sorbents for HPLC. Current state and new directions of development (review), *Sorption and chromatographic processes*, 2021; 21(2): 235-245. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3357>
7. Lok P.S., Sriman K.B., Rahul K., Geetika M., Usha S., Garima S., Saurabh A., Sol-Gel processing of silica nanoparticles and their applications, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014; 214: 17-37. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.007>
8. Pajonk G.M. Some applications of silica aerogels // *Colloid and Polymer Science*, 2003; 281: 637-651. <https://doi.org/10.1007/s00396-002-0814-9>
9. Xinbin Y., Christopher T.W., Recent advances in the applications of mesoporous silica in heterogeneous catalysis, *Catalysis Science & Technology*, 2002; 19: 5777-5788. <https://doi.org/10.1039/D2CY00001F>
10. Khludneva A.S., Karpov S.I., Influence of the composition of the reaction medium on the structure and sorption properties of mesoporous silica, *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*, 2022; 22(4): 421-432. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10571> (In Russ.)
11. Hench L.L., West J.K., The Sol-Gel Process, *Chemical Reviews*, 1990; 90: 33-72. <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>
12. Gonçalves M.C., Sol-Gel Silica Nanoparticles in Medicine: A Natural Choice. Design, Synthesis and Products, *Molecules*, 2018; 23(8): 22-26. <https://doi.org/10.3390/molecules23082021>
13. Pohaku Mitchell K.K., Liberman A., Kummel A.C., Trogler W.C., Iron (III)-Doped, Silica Nanoshells: A Biodegradable Form of Silica, *Journal of the American Chemical Society*, 2012; 134(34): 13997-14003. <https://doi.org/10.1021/ja3036114>
14. Decyk P., Trejda M., Ziolk M., Kujawa J., Głazyszka K., Bettahar M., Monteverdi, S.M., Mercy Physicochemical and catalytic properties of iron-doped silica—the effect of preparation and pretreatment methods, *Journal of Catalysis*, 2003; 219(1): 146-155. [https://doi.org/10.1016/S0021-9517\(03\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9517(03)00186-6)
15. Nayanova E.V., Elipasheva E.V., Sergeev G.M., Sergeeva V.P. Redox properties of methylene blue as a promising photometric reagent for determination of halogen oxidants. *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2015; 19(2): 154-160. <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.005> (In Russ.)
16. Boyd G.E., Adamson A.V., Myers L.S. Chromatographic method of ion separation. Moscow, Chemistry Publ., 1949, pt. 1, 333 p.
17. Weber W. J., Morris J. C., Kinetics of



Adsorption on Carbon from Solution, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 1963; 89(2): 31-60. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>

18. Lagergren, S., About the theory of so-called adsorption of soluble substance, *Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 1898; 24: 1-39.

19. Ho Y.S., McKay G., Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochemistry*, 1999; 34(5): 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

Информация об авторах / Information about the authors

Е.Н. Титов – аспирант кафедры общей химии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород; младший научный сотрудник, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», Москва, Россия

Д.Е. Смальченко – ассистент кафедры общей химии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

О.Е. Лебедева – заведующий кафедрой общей химии, д.х.н., профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

E.N. Titov – PhD student, Department of General Chemistry, Belgorod State National Research University, Belgorod, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia, e-mail: titov.evgeniy96@gmail.com

D.E. Smalchenko – Assistant Prof., Department of General Chemistry, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia, e-mail: smalchenko@bsu.edu.ru

O.E. Lebedeva – Head of Department, Doctor of chemical science, professor, Department of General Chemistry, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia, e-mail: olebedeva@bsu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 08.09.2023; одобрена после рецензирования 03.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 08.09.2023; approved after reviewing 03.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.