



УДК 544.42

Кинетика сорбции 4-нитрофенола полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона

Суханов П.Т.¹, Кушнир А.А.¹, Бондарева Л.П.¹, Чурилина Е.В.¹,
Богдаев А.А.¹, Шаталов Г.В.²

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж

²ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Воронеж

Поступила в редакцию 16.12.2014 г.

Изучена кинетика сорбции нитрофенолов полимерами на основе N-винилпирролидона. Из анализа уравнений диффузионной кинетики установлено, что процесс сорбции идет в смешанно-диффузионном режиме. Применение моделей кинетики показало, что вклад в общую скорость процесса так же вносит стадия взаимодействия 4-нитрофенола с функциональными группами сорбента.

Ключевые слова: поли-N-винилпирролидон, 4-нитрофенол, водные растворы, кинетика сорбции.

Kinetics of sorption of 4-nitrophenol polymeric sorbents based on N-vinylpyrrolidone

Sukhanov P.T.¹, Kushnir A.A.¹, Bondareva L.P.¹, Churilina E.V.¹,
Bogdaev A.A.¹, Shatalov G.V.²

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh

²Voronezh State University, Voronezh

In operation, the kinetics of sorption of 4-nitrophenol (4-NP) from an aqueous solution onto polymeric adsorbents obtained by radical copolymerization of a functional monomer different solvents - vinylpyrrolidone (VP) and the crosslinker - ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) - in different mole fractions. Experimentally obtained integral kinetic curves of sorption and diffusion equations are described and chemical kinetics, which revealed limiting stage of the process. It was found that the sorption process takes place in mixed-diffusion mode. In the first 5-7 minutes in conditions of free active sites on the surface of the polymer sorbent absorption occurs with limiting diffusion solute through the boundary layer solution, then the influence of the external diffusion factor is reduced, and internal diffusion - is increasing, then the sorption process of transition to the limitation of the transfer phase of the polymer. The equations of pseudo-second-order most adequately describe the sorption process. The paper calculated coming across as constant of diffusion of the outer and the inner as well as the reaction rate constant pseudo-second order. The procedure for changing the rate constants of sorption 4 NF polymer sorbents practically coincides with the change in the rate of external diffusion, that is, the active centers in the polymer matrix affect both the intermolecular interactions in the adsorption and phase transfer. Thus sorption 4 NF polymeric sorbents based on N-vinylpyrrolidone jointly diffusion limited and the kinetic stage, the beginning of the process in making a greater contribution to the external diffusion equilibrium is approached with increasing degree of filling of the polymer - the internal. From the combination of kinetic characteristics of sorbents for optimal concentration of 4-NP in static conditions are polymeric sorbents with a ratio of VP: EGDMA equal to 1:30 (solvent CH₃OH and CHCl₃)

Keywords: poly-N-vinylpyrrolidone, 4-nitrophenol, aqueous solutions, kinetics of sorption.

Введение

Нитрофенолы – токсичные соединения, попадающие в окружающую среду в процессе производства и обработки промышленных продуктов [1]. В окружающей среде 4-нитрофенол образуется при деградации нитрофена, метил- и этилпарагидроксибензоата, метил-параоксона. 4-Нитрофенол занесен в перечни экотоксикантов Агентства по охране окружающей среды (США) и А1 законодательства Европейского союза.

Несмотря на развитие современных аналитических методов, предварительное концентрирование при определении концентрации органических соединений на уровне микроколичеств остается необходимой стадией.

Наряду с емкостью сорбента и селективностью извлечения сорбата, скорость достижения равновесия сорбции является важной характеристикой любого процесса твердофазного концентрирования и имеет как практическое, так и теоретическое значение [2]. Практическая реализация таких процессов предполагает возможность поглощения сорбтива за короткое время пребывания вещества в контакте с сорбентом.

В свою очередь скорость сорбции определяется массопереносом в жидкой и твердой фазе. Знание лимитирующей стадии позволяет подобрать оптимальные условия сорбционного процесса для различных типов аналитов, а также гидродинамические параметры, размер гранул сорбента и температуру концентрирования.

Принимая во внимание важность механизма сорбции для практического использования полимерных сорбентов, целью работы является исследование кинетики сорбции 4-нитрофенола из водного раствора на полимерах на основе N-винилпирролидона с различной долей сшивающего агента.

Эксперимент

4-Нитрофенол (4-НФ) очищали перекристаллизацией и идентифицировали по температуре плавления. Рабочие растворы готовили растворением точных навесок препарата в дистиллированной воде.

Полимерные сорбенты (ПС) получали радикальной сополимеризацией в различных растворителях функциональных мономеров – винилпирролидон и сшивающего агента – этиленгликольдиметакрилата (ЭГДМА) в присутствии инициатора полимеризации (динитрил азо-бис-изомасляной кислоты) (табл. 1).

Таблица 1. Составы предполимеризационной смеси при синтезе сорбентов на основе N-винилпирролидона

Образцы ПС	Соотношение ВП : ЭГДМА, мол.	Растворитель
ПС-2	1:1	CH ₃ OH
ПС-3	1:15	
ПС-4	1:30	
ПС-5	1:60	
ПС-6	1:30	CHCl ₃
ПС-7	1:15	CH ₂ Cl ₂

Для изучения кинетики сорбции навески сорбентов ($m_{\text{сорб}}=0.050\pm 0.001$) помещали в термостатируемые сосуды с пришлифованными пробками, добавляли

10 см³ раствора 4-НФ различной концентрации и перемешивали на вибросмесителе. Сорбцию проводили при (22±3°C) и pH~3.0. По истечении определенного времени, сорбент отделяли от раствора фильтрованием. Концентрацию 4-НФ в равновесном водном растворе определяли фотометрически [3].

Степени извлечения (R , %), количество поглощенного 4-НФ (a , ммоль/г) рассчитывали по уравнениям:

$$R = \frac{(c_0 - c)}{c_0} \cdot 100, \quad a = \frac{[(c_0 - c) \cdot V]}{m_{\text{сорб}}}$$

где c_0 и c – концентрации определяемого соединения в исходном растворе до и после сорбции соответственно, ммоль/см³; V – объем водного раствора, см³.

Обсуждение результатов

Интегральные кинетические кривые сорбции позволяют установить время достижения равновесия в системе «сорбент–раствор», при этом оценивают возможность и целесообразность применения сорбента для решения практических задач [4-6].

Согласно кинетическим кривым (рис. 1), степень извлечения 4-НФ полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона в первые минуты линейно возрастает, затем плавно увеличивается и достигает максимального значения при установлении равновесия. Массовая доля сшивающего агента и условия синтеза полимерных сорбентов оказывает влияние на время установления сорбционного равновесия и эффективность сорбции. Сорбционное равновесие на ПС-3, ПС-4, ПС-6 достигается в течение 30-50 минут, на остальных образцах – 45-60 мин.

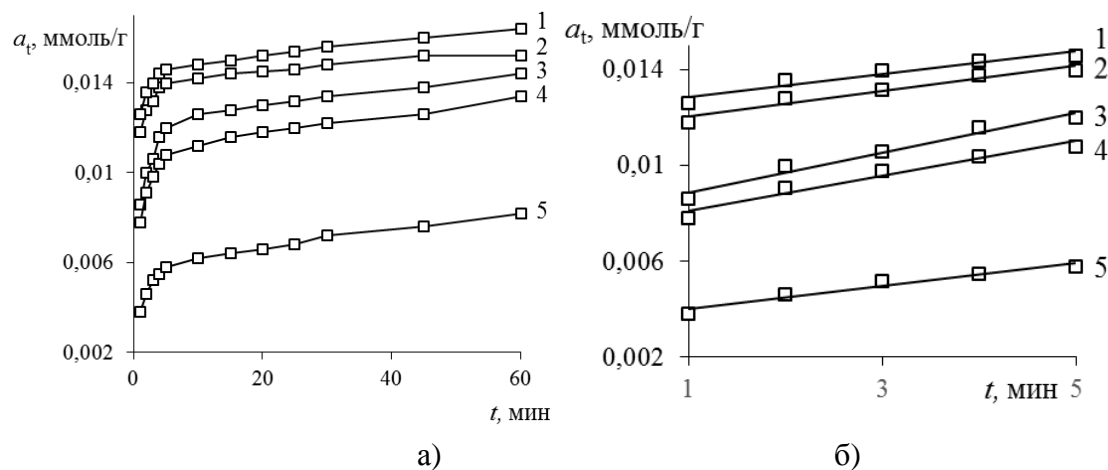


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции 4-нитрофенола полимерными сорбентами ПС-6 (1), ПС-4 (2), ПС-5 (3), ПС-2 (4) и ПС-7 (5) в течение 60 мин (а) и в первые 5 мин (б)

При увеличении исходной концентрации сорбтива в растворе возрастает степень его извлечения при некотором сокращении времени контакта фаз (рис. 1). Более высокая степень извлечения в начальный момент времени объясняется большим числом свободных активных центров, вследствие чего возникает значительный градиент концентрации между сорбируемыми ионами в растворе и в

фазе сорбента [7]. Через некоторое время за счет накопления сорбата на активных центрах градиент концентрации уменьшается, и скорость сорбции снижается.

Описание кинетических кривых при помощи моделей диффузионной и химической кинетики позволяет выявить лимитирующую стадию сорбции [8, 9].

Предполагается, что в области низких концентраций скорость сорбции 4-НФ определяется диффузией сорбтива к поверхности сорбента [10]. Поэтому экспериментальные кинетические кривые аппроксимированы в координатах, характерных для внешнелиффузионных процессов [11].

Для внешнелиффузионных процессов кинетическая кривая линейна в координатах $-\ln(1-F)=f(t)$, где t – время контакта сорбента и раствора сорбтива; $F=a_t/a_e$, где a_t и a_e количества сорбированного вещества в момент времени t и в равновесии.

Линейный вид зависимости $-\ln(1-F)=f(t)$ установлен лишь на начальном участке (рис. 2): для ПС-2 в течение первых 5 минут протекания процесса, ПС-4 и ПС-6 – 7 минут, в дальнейшем линейность функции нарушается. Следовательно, внешнелиффузионная кинетика сорбции 4-НФ реализуется при низких степенях заполнения полимерных сорбентов.

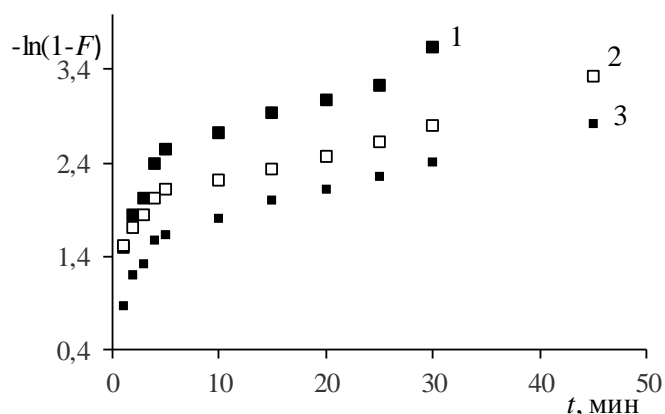


Рис. 2. . Зависимость $-\ln(1-F)$ от t при сорбции 4-нитрофенола ПС-4 (1), ПС-6 (2) и ПС-2 (3)

Для начальных участков кинетических кривых получены линейные уравнения (табл. 2).

Таблица 2. Уравнения в координатах $-\ln(1-F) = f(t)$ сорбции 4-нитрофенола полимерными сорбентами на 1 участке

ПС	Кинетические уравнения $-\ln(1-F) = f(t)$	r^2
2	$y=0.189x+0.753$	0.953
3	$y=0.221x+1.145$	0.934
4	$y=0.224x+1.272$	0.925
5	$y=0.221x+0.706$	0.989
6	$y=0.162x+1.347$	0.976
7	$y=0.171x+0.434$	0.951

Для выяснения лимитирующей стадии процесса при повышении степеней заполнения полимерных сорбентов кинетическая зависимость аппроксимированы в координатах, предложенных Вебером и Мориисом. Если функция удельного

количества сорбированного 4-НФ (a_t , ммоль·г) от времени (t -время, мин) в координатах

$$a_t = k_p \cdot t^{0.5} \quad (1)$$

где k_p – константа скорости внутренней диффузии, ммоль·г⁻¹мин^{-0.5}, линейна, то процесс является диффузионно-контролируемым [12].

Полученные кинетические кривые сорбции представляют собой зависимости, которые при малых временах контакта фаз (до 5-7 мин) являются близкими к линейным, затем через излом переходят к иной линейной функции (рис. 3). Полученные кривые не выходят из начала координат и состоят из 2 участков: первый до 5 мин – близкий к линейному, второй до установления равновесия – линейный с высоким коэффициентом корреляции.

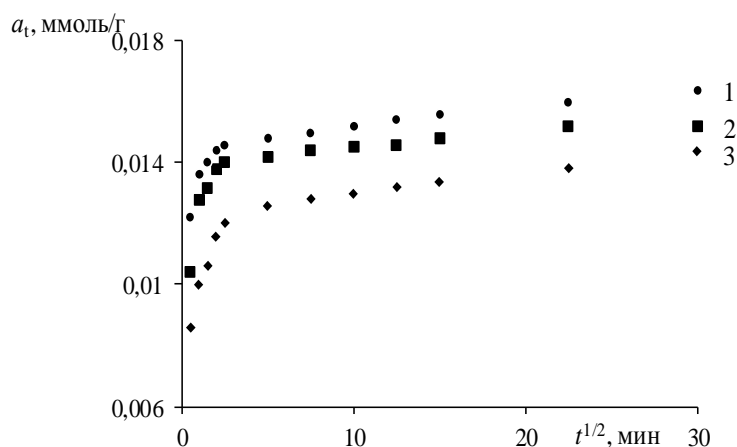


Рис. 3. Зависимость $a_t-t^{0.5}$ сорбции 4-нитрофенола ПС-6 (1), ПС-4 (2), ПС-5(3)

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что сорбционный процесс протекает в смешанно-диффузионном режиме. В начале процесса в условиях свободных активных центров на поверхности полимерного сорбента поглощение протекает с лимитированием диффузии сорбтива через границу у поверхности, далее влияние внешнедиффузионного фактора снижается, а внутридиффузионного – возрастает, и затем сорбционный процесс переходит к режиму лимитирования переноса в фазе полимера. Константы скорости внутренней диффузии соответствуют значению, отсекаемому зависимостью (1) на оси ординат (рис. 3). Константы скорости внешней диффузии устанавливали по углу наклона второго участка рис. 3. Константы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Константы скорости внешней (k_v , мин⁻¹) и внутренней диффузии (k_p , ммоль·г⁻¹мин^{-0.5}) 4-нитрофенола в сорбенте

ПС	1			2		
	Кинетические уравнения $a_t = f(t^{0.5})$	r^2	$k_v \cdot 10^{-2}$	Кинетические уравнения $a_t = f(t^{0.5})$	r^2	$k_p \cdot 10^{-4}$
2	$y=0.0014x+0.007$	0.910	0.7	$y=8 \cdot 10^{-5}x+0.011$	0.982	0.8
3	$y=0.0012x+0.010$	0.951	1.0	$y=6 \cdot 10^{-5}x+0.017$	0.984	0.6
4	$y=0.0011x+0.011$	0.944	1.1	$y=6 \cdot 10^{-5}x+0.014$	0.993	0.6
5	$y=0.0017x+0.008$	0.965	0.8	$y=7 \cdot 10^{-5}x+0.012$	0.995	0.7
6	$y=0.0010x+0.012$	0.972	1.2	$y=6 \cdot 10^{-5}x+0.015$	0.989	0.6
7	$y=0.0012x+0.003$	0.910	0.3	$y=8 \cdot 10^{-5}x+0.005$	0.981	0.8

Скорость как внешней, так и особенно внутренней диффузии не значительно изменяется для различных сорбентов. При сравнении переноса 4-НФ в пограничном слое и в фазе сорбентов, отличающихся только долей сшивающего агента (табл. 1) установлено, что вклад внешнедиффузионного сопротивления несколько выше у сорбентов с большей степенью сшивки (ПС-4 и ПС-5), а внутридиффузионного – с меньшей (ПС-2 и ПС-3).

Сополимер, содержащий даже незначительное количество ЭГДМА, имеет поперечные мостики, что способствует возрастанию гидрофильности. Это приводит к лучшей проницаемости фазы полимера за счет повышенной гидратации, одновременно возможно образование двойного эклектического слоя на поверхности, препятствующего переносу сорбтива к поверхности сорбента.

Поскольку функциональные группы изученных полимерных сорбентов способны образовывать водородные связи с молекулами 4-НФ [3], целесообразно оценить кинетический вклад в сорбционный процесс. Для описания кинетики сорбции в системе «раствор – сорбент» применяют формальные кинетические уравнения целых порядков – псевдо-первого [13] и псевдо-второго порядков [14]. В характеристической линейной форме уравнения соответственно имеют следующий вид:

$$\ln(a_e - a_t) = \ln a_e - k_1 \cdot t \quad (2)$$

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 \cdot a_e^2} + \frac{1}{a_e} \cdot t \quad (3)$$

где a_e и a_t - количество сорбированного НФ на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени t , ммоль/г; k_1 – константа скорости сорбции модели псевдо-первого порядка, мин⁻¹; k_2 – константа скорости сорбции модели псевдо-второго порядка, г/(ммоль·мин).

На рис. 4 представлены примеры зависимости $\ln(a_e - a_t) - t$ и $t/a_t - t$. Установлено, что кинетические уравнения псевдо-первого порядка удовлетворительно описывают экспериментальные данные лишь на начальных стадиях процесса, а модель псевдо-второго порядка во всем изученном интервале времени. Максимальная концентрация сорбата (a_e), константы скорости псевдо-второго порядка (k_2) и значения коэффициентов корреляции, полученные из кинетических уравнений, представлены в табл. 4. Рассчитанные a_e , близки к экспериментально установленным. Таким образом, уравнение псевдо-второго порядка наиболее адекватно описывает сорбционный процесс, лимитирующей стадией которого является взаимодействие сорбата с функциональными группами сорбента.

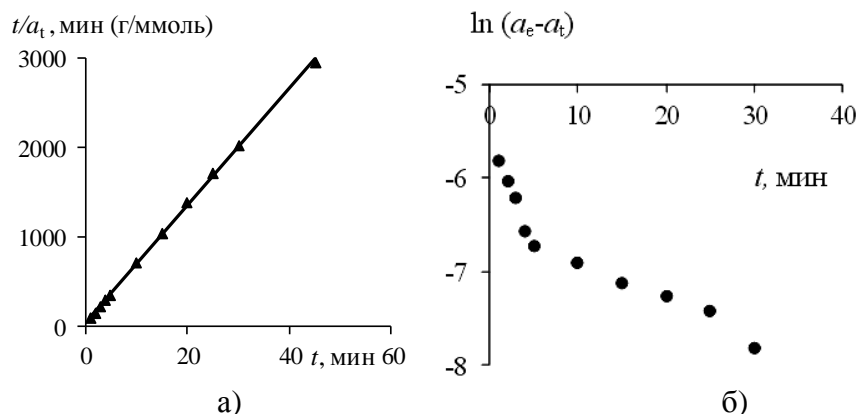


Рис. 4. Кинетическая модель при сорбции 4-НФ полимером ПС-4 псевдо-первого (а) и псевдо-второго порядка (б) в линейных координатах

Наибольшая скорость образования связей сорбат-сорбент установлена для ПС-4, наименьшая - для ПС-7. Порядок изменения констант скорости сорбции 4-НФ полимерными сорбентами практически совпадает с порядком изменения скорости внешней диффузии, то есть активные центры в полимерной матрице влияют как на межмолекулярное взаимодействие при адсорбции, так и межфазный перенос.

Таблица 4. Кинетические параметры сорбции 4-нитрофенола полимерными сорбентами

ПС	Параметры кинетических уравнений псевдо-второго порядка		
	$a_e \cdot 10^2$, ммоль/г	k_2 , г·(ммоль·мин) ⁻¹	r^2
2	1.33	49.0	0.999
3	1.50	110.1	0.993
4	1.52	120.7	0.991
5	1.43	52.3	0.999
6	1.62	73.1	0.997
7	0.82	44.9	0.994

Таким образом, сорбция 4-нитрофенола полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона лимитируется совместно диффузионной и кинетической стадией, причем в начале процесса большой вклад вносит внешняя диффузия, при приближении к равновесию, с ростом степени заполнения полимера, – внутренняя.

Заключение

Установлено, что сорбция 4-нитрофенола из водного раствора на полимерных сорбентах, полученных радикальной сополимеризацией винилпирролидона и этиленгликольдиметакрилата протекает в смешанно-диффузионном режиме. В первые 5-7 минут в условиях свободных активных центров на поверхности полимерного сорбента поглощение протекает с лимитированием диффузии сорбтива через пограничный слой раствора, далее влияние внешнедиффузионного фактора снижается, а внутридиффузионного – возрастает и сорбционный процесс переходит к режиму лимитирования переноса в фазе полимера. Уравнения псевдо-второго порядка наиболее адекватно описывают сорбционный процесс, что позволило рассчитать кажущиеся константы скорости реакции. Порядок изменения констант скорости сорбции 4-НФ полимерными сорбентами практически совпадает с изменением скорости внешней диффузии, то есть активные центры в полимерной матрице влияют как на межмолекулярное взаимодействие при адсорбции, так и межфазный перенос. В общем случае сорбция 4-НФ полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона лимитируется совместно диффузионной и кинетической стадией. По совокупности кинетических характеристик (минимальное время достижения сорбционного равновесия и максимальная скорость образования связей сорбат-сорбент) оптимальными сорбентами для концентрирования 4-НФ в статических условиях являются ПС-4 и ПС-6.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. Проект №.2186.

Список литературы

1. Guanghai X., Manglai G., Zheng G. et al. The removal of p-nitrophenol from aqueous solutions by adsorption using gemini surfactants modified montmorillonites // *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 218. pp. 223-231.
2. Неудачина Л.К., Петрова Ю.С., Засухин А.С. и др. Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов пиридилэтилированным аминопропилполисилоксаном // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15. № 1. С. 87-95.
3. Churilina E.V., Kushnir A.A., Sukhanov P.T. et al. Thermodynamics of nitrophenols sorption from aqueous media with N-vinylpyrrolidone-based polymer // *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 83. No. 11. pp. 2032-2036.
4. Мясоедова Г.В., Саввин С.Б. Хелатообразующие сорбенты. М.: Наука, 1984. 171 с.
5. Neudachina L.K., Golub A.Ya., Kholmogorova A.S. Sorption extraction of palladium(II) with modified polysiloxane // *Russ. J. of Appl. Chem.* 2014. Vol. 87. No. 7. pp. 923-929
6. Кокотов Ю.А. Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л.: Химия, 1970. 336 с.
7. Селеменев В.Ф., Котова Д.Л., Амелин А.Н. и др. Межмолекулярные взаимодействия в системе тирозин – анионит АВ-17 // *Журн. физ. химии*. 1991. Т. 65. № 4. С. 1996-1000.
8. Дьяконова О.В., Котов В.В., Селеменев В.Ф. и др. Ионообменные свойства полиаминокислотных пленок с различной степенью имидизации // *Журн. физ. химии*. 1998. Т. 72. № 7. С. 1275-1277.
9. Иониты в цветной металлургии / Под ред. К.Б. Лебедева. М.: Металлургия. 1975. 351 с.
10. Wang S., Li H. Kinetic modeling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon // *Dyes Pigments*. 2007. Vol. 72. No 3. pp. 308-314.
11. Полянский Н.Г., Горбунов Г.В., Полянская Н.Л. Методы исследования ионитов – М.: Химия, 1976. 286 с.
12. Li N., Ba R. Copper adsorption on chitosan – cellulose hydrogel beads: behaviors and mechanisms // *Separ. Purific. Technol.* 2005. Vol. 42. No 3. pp. 237 – 247.
13. Ho Y.S., McKay G. Sorption of dye from aqueous solution by peat // *J. Chem. Eng.* 1998. Vol. 70. pp. 115-124.
14. Ho Y.S., McKay G. The kinetic of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat // *Water. Res.* 2000. Vol. 34. pp. 735-742.

References

1. Guanghai X., Manglai G., Zheng G. et al. The removal of p-nitrophenol from aqueous solutions by adsorption using gemini surfactants modified montmorillonites, *Chemical Engineering Journal*, 2013, Vol. 218. pp. 223-231.
2. Neudachina L.K., Petrova Yu.S., Zasukhin A.S. et al. Kinetika sorbtzii ionov tyazhelykh metallov piri-diletilirovannym aminopropilpolisiloksanom [Sorption kinetics of heavy metal ions by polysiloxane functionalized with 2-aminoethylpyridine groups], *Analitika i kontrol'*, 2011, Vol. 15, No. 1, pp. 87-95.
3. Churilina E.V., Kushnir A.A., Sukhanov P.T. et al. Thermodynamics of nitrophenols sorption from aqueous media with N-vinylpyrrolidone-based polymer, *Russ. J. Gen. Chem.*, 2013, Vol. 83, No. 11, pp. 2032-2036.
4. Myasoedova G.V., Savvin S.B. Khelatoobrazuyushchie sorbenty [Chelating sorbents], М., Nauka, 1984. 171 pp.
5. Neudachina L.K., Golub A.Ya., Kholmogorova A.S. Sorption extraction of palladium(II) with modified polysiloxane, *Russ. J. of Appl. Chem.*, 2014, Vol. 87, No. 7, pp. 923-929
6. Kokotov Yu.A. Pasechnik V.A. Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena [Equilibrium and kinetics of ion exchange], L., Khimiya, 1970. 336 pp.
7. Selemenov V.F., Kotova D.L., Amelin A.N. et al. Mezhmolekuljarnye vzaimodejstvija v sisteme tirozin – anionit

AV-17 // Zhurn. fiz. himii. 1991. Vol. 65. No 4. pp. 1996-1000.

8. D'jakonova O.V., Kotov V.V., Selemenev V.F. et al. Ionoobmennye svojstva poliamiokislotnyh plenok s razlichnoj stepen'ju imidizacii // Zhurn. fiz. himii. 1998. Vol. 72. No 7. pp. 1275-1277.

9. Ionity v tsvetnoi metallurgii [Resins in nonferrous metallurgy], pod red. K.B. Lebedeva, M., Metallurgiya, 1975, 351 pp.

10. Wang S., Li H. Kinetic modeling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon, Dyes Pigments, 2007, Vol.72, No. 3, pp. 308-314.

11. Polyanskii N.G., Gorbunov G.V., Polyanskaya N.L. Metody issledovaniya

ionitov [Research methods of resins], M., Khimiya, 1976, 286 pp.

12. Li N., Ba R. Copper adsorption on chitosan – cellulose hydrogel beads: behaviors and mechanisms, Separ. Purific. Technol, 2005, Vol. 42, No. 3, pp. 237-247.

13. Ho Y.S., McKay G. Sorption of dye from aqueous solution by peat, J. Chem. Eng., 1998, Vol. 70, pp. 115-124.

14. Ho Y.S., McKay G. The kinetic of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat, Water. Res., 2000, Vol. 34, pp. 735-742.

Суханов Павел Тихонович – профессор кафедры физической и аналитической химии, д.х.н., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж

Кушнир Алексей Алексеевич – аспирант кафедры физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж.

Бондарева Лариса Петровна – доцент кафедры физической и аналитической химии, д.х.н., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж

Чурилина Елена Васильевна – доцент кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж.

Шаталов Геннадий Валентинович – зав. кафедрой высокомолекулярных соединений и коллоидов, профессор, д.х.н., Воронежский государственный университет, Воронеж

Богдаев Алексей Анатольевич – студент, факультет экологии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж.

Sukhanov Pavel T. – prof., grand Ph.D (chemistry), department of physical and analytical chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, e-mail: pavel.suhanov@mail.ru

Kushnir Aleksei A. – the postgraduate student, department of physical and analytical chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, e-mail: kushnir_aleksei@mail.ru

Bondareva Larissa P. – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of physical and analytical chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh

Churilina Elena V. – Ph.D (chemistry), associate prof., department of Chemistry and Chemical Technology of organic compounds and polymer processing, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh

Shatalov Gennady V. – prof., grand Ph.D (chemistry) head of the department chair of high molecular compounds and colloids, Voronezh State University, Voronezh

Bogdaev Aleksei A. – student, Faculty of Environment and Chemical Engineering, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh