

Адсорбционное извлечение аминов из водных растворов

© 2024. И. Е. Тарганов¹, аспирант, А. Л. Гакиев¹, аспирант,
 А. А. Кадирбеков², старший преподаватель,
 И. Д. Трошкина¹, д. т. н., профессор,
 Н. А. Бектенов³, д. х. н., профессор, А. Г. Чередниченко⁴, д. х. н., доцент,
¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
 125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,
²Южно-Казахстанский Университет им. М. Ауэзова,
 160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, ул. Тауке Хана, д. 5,
³Казахский национальный педагогический университет им. Абая,
 050010, Республика Казахстан, Алматы, проспект Достык, д. 13,
⁴Российский университет дружбы народов,
 117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
 e-mail: targanov.igor@yandex.ru

В статических условиях изучена возможность очистки водных растворов, содержащих экстрагенты – первичный амин (Primene-JMT) и третичный амин (триоктиламин, ТОА), адсорбцией на углеродных материалах (активированном угле NWC, угле NWC-Т, модифицированном углеродными нанотрубками, угле УС-ПТФЭ, модифицированном политетрафторэтиленом), а также на стиролдвинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и природном адсорбенте – ракушечнике. Методом ограниченного объема раствора изучена кинетика адсорбции аминов Primene-JMT и ТОА из водных растворов этими адсорбентами. Из известных моделей псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и Еловича модель псевдо-второго порядка более адекватно описывает кинетические данные ($R^2 > 0,99$). Определены значения коэффициентов распределения и констант скорости адсорбции аминов Primene-JMT и ТОА. Предложена блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов, реализация которой позволит снизить токсичность сбросных растворов и вернуть в оборот часть дорогостоящего экстрагента.

Ключевые слова: адсорбция, амины, уголь, синтетический полимерный сорбент, модифицированный уголь, ракушечник, коэффициент распределения, константа скорости, блок-схема.

Adsorption recovery of amines from water solutions

© 2024. I. E. Targanov¹ ORCID: 0000-0001-8354-0018, A. L. Gakiev¹ ORCID: 0000-0003-0166-7192,
 A. A. Kadirbekov² ORCID: 0000-0001-9941-9343, I. D. Troshkina¹ ORCID: 0000-0002-5523-0247,
 N. A. Bektenov³ ORCID: 0000-0003-1427-438X, A. G. Cherednichenko⁴ ORCID: 0000-0002-4709-5313,
¹Mendelev University of Chemical Technology of Russia,
 9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,
²South Kazakhstan University named after. M. Auezova,
 5, Tauke Khana St., Shymkent, Republic of Kazakhstan, 160012,
³Abai Kazakh National Pedagogical University,
 13, Dostyk Av., Almaty, Republic of Kazakhstan, 050010,
⁴Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
 6, Miklukho-Maclay St., Moscow, Russia, 117198,
 e-mail: targanov.igor@yandex.ru

Aquatic biological resources are an important part of the ecosystems of our planet, since they are involved in economic turnover as a source of food. The composition of water, including waste water from enterprises, has a direct impact on the state of aquatic biological resources. To extract and concentrate metals from solutions, hydrometallurgical processes are used – extraction and sorption. Their implementation is possible with the use of special substances – extractants and in a number of processes – sorption materials (Solvent Impregnated Resins (SIR's) and Levextrel's) with a mobile phase of the extractant, combining the properties of sorbents and extractants. Despite the advantages of the latter, such as high kinetic parameters, lack of swelling and high values of mechanical strength, they are characterized by the disadvantages of extraction methods – the entrainment of the extractant into the aqueous phase in dissolved and emulsion forms. Under

static conditions, the possibility of purification of aqueous solutions containing primary or tertiary amine by adsorption on carbon materials (activated carbon NWC, carbon NWC-T modified with carbon nanotubes, CS-PTFE modified with polytetrafluoroethylene), as well as on styrene-divinylbenzene nonionic copolymer Porolas-T and a natural shell rock adsorbent was studied. The kinetics of adsorption of amines Primene-JMT and TOA from aqueous solutions by these adsorbents has been studied by the method of a limited volume of solution. Of the known pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich models, the pseudo-second order model describes kinetic data more adequately ($R^2 > 0.99$). The values of the distribution coefficients and the rate constants of adsorption of Primene-JMT and TOA are determined. A block diagram of adsorption purification of aqueous solutions from amines is proposed, the implementation of which will reduce the toxicity of waste solutions and return some of the expensive extractant to circulation.

Keywords: adsorption, amines, coal, synthetic polymer sorbent, modified coal, shell rock, distribution coefficient, velocity constant, block diagram.

Водные биологические ресурсы являются важной частью экосистем нашей планеты, поскольку вовлечены человеком в хозяйственный оборот в качестве источника продовольствия [1]. Состав воды, в том числе сбросных вод предприятий, оказывает непосредственное влияние на состояние водных биоресурсов.

Для удаления органических веществ, включая летучие [2, 3], из растворов могут быть использованы методы, основанные на извлечении и концентрировании (недеструктивные методы) и на полном разложении органических веществ (деструктивные методы).

Недеструктивное извлечение органических веществ из растворов, при котором происходит их концентрирование без разложения, может быть осуществлено осадительными, сорбционными [4–10], мембранными и биологическими [11–13] методами, а также путём выпаривания. При этом происходит образование вторичных отходов: шламов, отработанных адсорбентов, регенерационных растворов, концентратов, которые требуют дальнейшей переработки. В связи с этим, недеструктивные методы используются, как правило, при переработке растворов с невысоким содержанием органических соединений.

Для удаления органических соединений из сточных вод часто используют деструктивные методы, основанные на окислении или разложении органических веществ с образованием газообразных или низкомолекулярных продуктов реакции. К деструктивным методам относят реагентное, гидротермальное, электрохимическое, каталитическое [14–16], биохимическое окисление; разрушение под действием излучений высоких энергий (ультрафиолетовое и гамма-излучение, ускоренные электроны) [17].

Для реагентного окисления используются вещества, обладающие высокой окислительной способностью: перманганат калия, пероксид водорода и озон. К недостаткам одного из наиболее перспективного метода озонирования относятся сложность и дорого-

визна озонаторного оборудования, большие энергозатраты, высокая токсичность озона.

При использовании в гидрометаллургии цветных, редких и радиоактивных элементов экстракционного метода образуются рафинаты, содержащие растворённый экстрагент, например, трибутилфосфат, ди-2-этилгексилфосфорную кислоту, первичные и третичные амины. Среди аминов широко используются первичный амин Primene-JMT и третичный амин TOA [18, 19]. Осуществление сорбционного метода извлечения металлов возможно при применении специальных материалов (импрегнатов и ТВЭКСов) с подвижной фазой экстрагента, сочетающих в себе свойства сорбентов и экстрагентов [20]. Несмотря на высокие кинетические показатели, отсутствие набухаемости и высокие значения механической прочности, им свойственны недостатки экстракционных методов – унос экстрагента в водную фазу в растворённой и эмульсионной формах.

Цель представленной работы – исследование возможности адсорбционного извлечения и определение кинетических характеристик адсорбции аминов Primene-JMT и TOA из водных растворов природным неорганическим, синтетическим полимерным материалами, а также углями, в том числе наномодифицированными.

Объекты и методы исследования

В качестве сорбентов были использованы:
– активированный уголь NWC (Chemviron Carbon, UK) со значением удельной поверхности $1250 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$;

– уголь NWC-T (Тамбовский государственный технический университет, РФ) модифицированный углеродными нанотрубками (УНТ) со значением удельной поверхности $1250 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$;

– уголь УС-ПТФЭ (Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, РФ) модифицированный политетрафторэтиленом со значением удельной поверхности $945 \pm 21 \text{ м}^2/\text{г}$;

– синтетический стиролдивинилбензол-ный неионогенный сополимер Поролас-Т (Акционерное общество «ВНИИХТ», РФ) со значением удельной поверхности $800 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$ [21].

Кроме этого, в работе был использован природный материал – ракушечник, имеющий следующий элементный состав, мас. %: Ca – 33,1; O – 52,1; C – 13,3; Mg – 1,0; Al – 0,14; Si – 0,34.

В качестве аминов применяли экстрагенты: первичный амин Primene-JMT (Dow Inc., USA) и третичный амин – триоктиламин (TOA) (ACROS Organics, USA, содержание 98%). Концентрация экстрагентов в водных растворах составляла $17,3 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$.

Для определения ёмкостных характеристик выбранных материалов были проведены эксперименты по адсорбции экстрагентов из водных растворов в статических условиях при соотношении фаз Т:Ж, равном 1:100 ($\text{г}:\text{см}^3$). После контакта фаз в течение 4 ч проводили их разделение и определяли концентрации экстрагентов фотометрическим методом, измеряя оптическую плотность раствора при длине волны 426 нм с использованием фотометра КФК-ЗМ. По разнице концентраций экстрагентов в исходном и равновесном растворах, с учётом соотношения фаз, рассчитывали адсорбционную ёмкость материалов.

Коэффициенты распределения экстрагентов в адсорбенте K_d , $\text{см}^3/\text{г}$ рассчитывали как отношение равновесной ёмкости адсорбента $CE_{\text{равн}}$, ммоль/г к его равновесной концентрации в водном растворе $C_{\text{равн}}$, ммоль/дм³:

$$K_d = \frac{CE_{\text{равн}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 1000 \quad (1)$$

Для математической обработки данных интегральных кинетических кривых адсорбции экстрагентов Primene-JMT и TOA были использованы известные кинетические модели псевдо-первого порядка (2) [22] псевдо-второго порядка (3) [23] и модель Еловича (4) [24, 25].

Математическое описание этих моделей в линейной форме имеет вид:

$$\log(Q_e - Q_\tau) = \log Q_e - \frac{k_1}{2,303} \cdot \tau, \quad (2)$$

$$\frac{\tau}{Q_\tau} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \cdot \tau, \quad (3)$$

$$Q_\tau = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \tau \quad (4)$$

где Q_e , Q_τ – сорбционная ёмкость равновесная и в момент времени τ , ммоль/г; k_1 , k_2 – константы скорости псевдо-первого и псевдо-второго порядка, мин^{-1} , $\text{г}(\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$ соответственно; α – начальная скорость сорбционного процесса, $\text{г}(\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$; β – константа Еловича, $\text{г} \cdot \text{ммоль}^{-1}$.

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили на основании расчёта значения коэффициента детерминации Пирсона R^2 . Коэффициент детерминации R^2 определяет насколько экспериментальные данные близки к выбранной линейной модели. Чем ближе значение R^2 к 1, тем выше степень линейной корреляции между соответствующими массивами данных.

Результаты и обсуждение

Значения адсорбционной ёмкости материалов по аминам Primene-JMT и TOA, а также коэффициенты распределения этих экстрагентов в адсорбентах приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, третичный амин TOA лучше сорбируется выбранными материалами, чем первичный амин Primene-JMT, что может быть связано с его меньшей склонностью к эмульгированию. При этом лучшими ёмкостными характеристиками обладают синтетический неионогенный сополимер Поролас-Т и активированный уголь, модифицированный нанотрубками NWC-Т (табл. 1). При адсорбции первичного амина Primene-JMT коэффициент его распределения составил $1,02 \cdot 10^3$ и $7,9 \cdot 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$, третичного амина TOA – $5,78 \cdot 10^3$ и $6,50 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$, соответственно.

Кинетику адсорбции экстрагентов изучали методом ограниченного объёма раствора [26]. Интегральные кинетические кривые сорбции аминов Primene-JMT и TOA приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Линеаризованные кинетические интегральные кривые сорбции аминов Primene-JMT и TOA по модели псевдо-второго порядка представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Константы скорости (k_1 , k_2 и β) адсорбции экстрагентов, рассчитанные с использованием различных кинетических моделей, приведены в таблицах 2 и 3.

Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что кинетические данные по адсорбции экстрагентов Primene-JMT и TOA более адекватно описываются по модели псевдо-второго порядка (табл. 2, 3). Коэффициент детерминации R^2 составляет

Таблица 1 / Table 1

Равновесные характеристики адсорбентов при извлечении аминов Primene-JMT и TOA
Sorption capacitive characteristics of adsorbents for amines Primene-JMT and TO

Адсорбент Adsorbent	Primene-JMT			Триоктиламин / Trioctylamine (TOA)		
	CE, ммоль/г mmol/g	Степень извлечения, % Amine adsorption, %	$K_d \cdot 10^{-3}$, см ³ /г cm ³ /g	CE, ммоль/г mmol/g	Степень извлечения, % Amine adsorption, %	$K_d \cdot 10^{-3}$, см ³ /г cm ³ /g
NWC	1,23	71,0	0,25	1,63	94,4	1,68
NWC-T	1,54	88,8	0,79	1,70	98,5	6,50
УС-ПТФЭ CS-PTFE	1,38	79,7	0,39	1,68	97,3	3,55
Поролас-Т Porolas-T	1,58	91,0	1,02	1,70	98,3	5,78
Ракушечник Shell rock	1,06	61,2	0,16	1,66	95,8	2,27

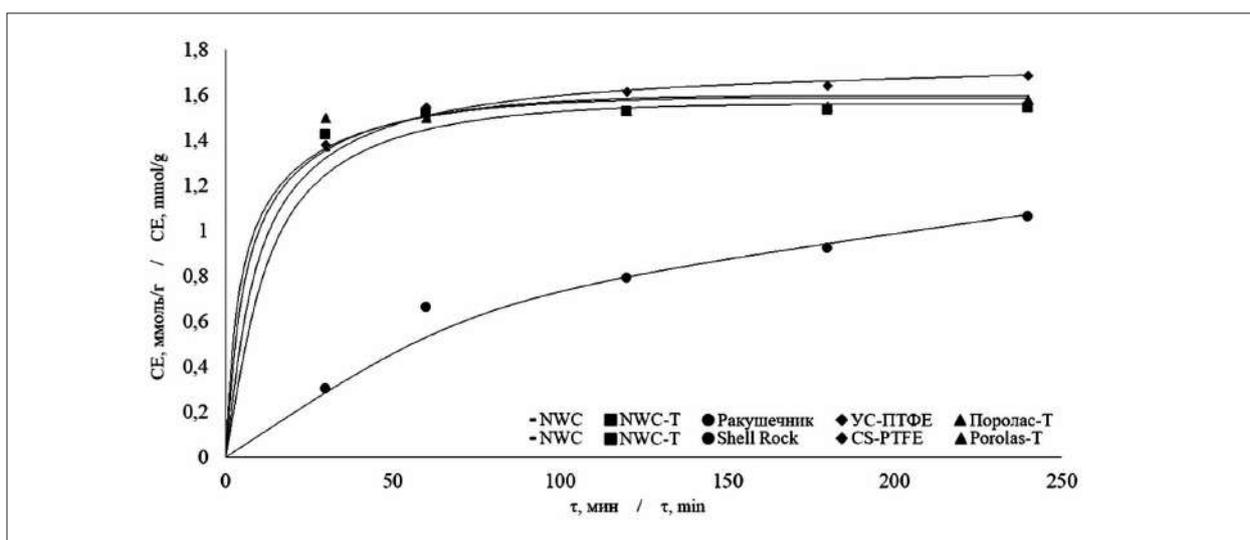


Рис. 1. Интегральные кинетические кривые адсорбции первичного амина Primene-JMT материалами различного типа / Fig. 1. Integral kinetic curves of primary amine Primene-JMT adsorption by materials of various types

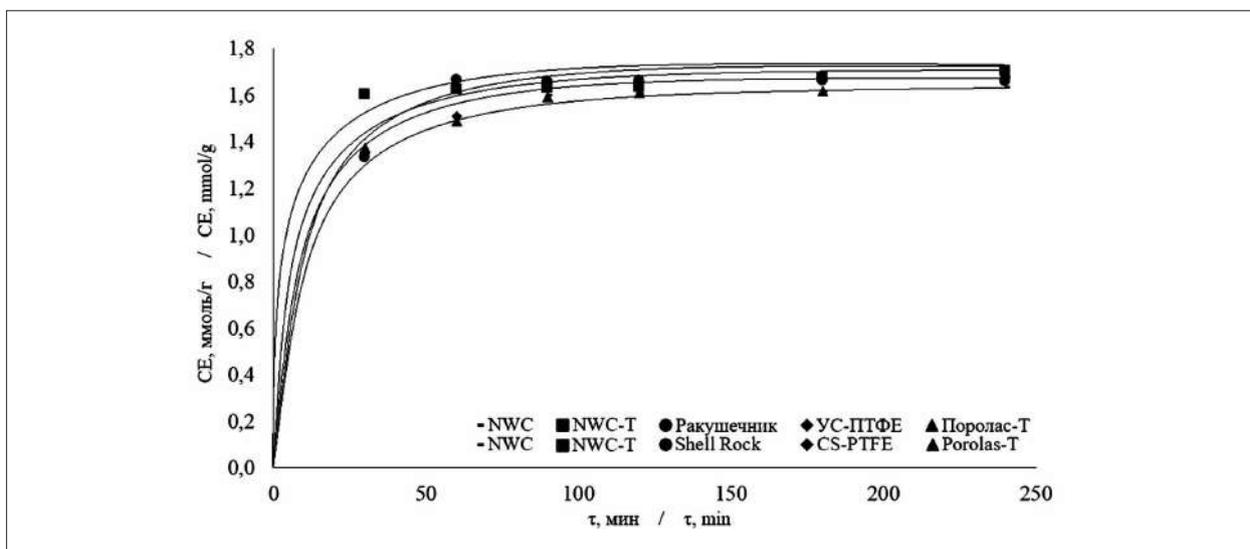


Рис. 2. Интегральные кинетические кривые адсорбции третичного амина TOA материалами различного типа / Fig. 2. Integral kinetic curves of adsorption of tertiary amine TOA by materials of various types

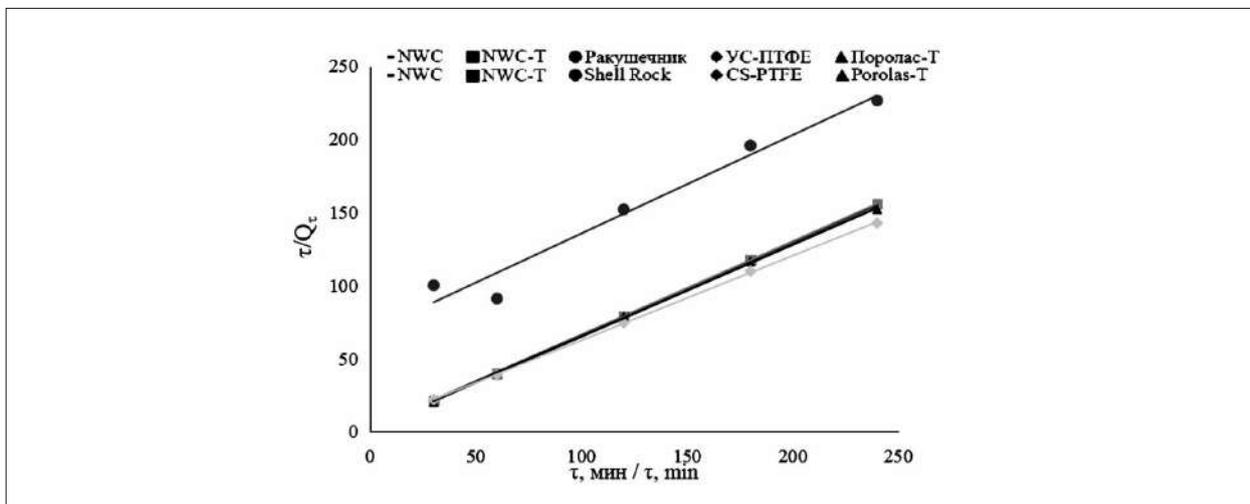


Рис. 3. Линеаризованные кинетические кривые адсорбции первичного амина Primene-JMT из водных растворов по модели псевдо-второго порядка материалами различного типа
Fig. 3. Linearized kinetic curves of primary amine Primene-JMT adsorption from aqueous solutions according to the pseudo-second-order model by materials of various types

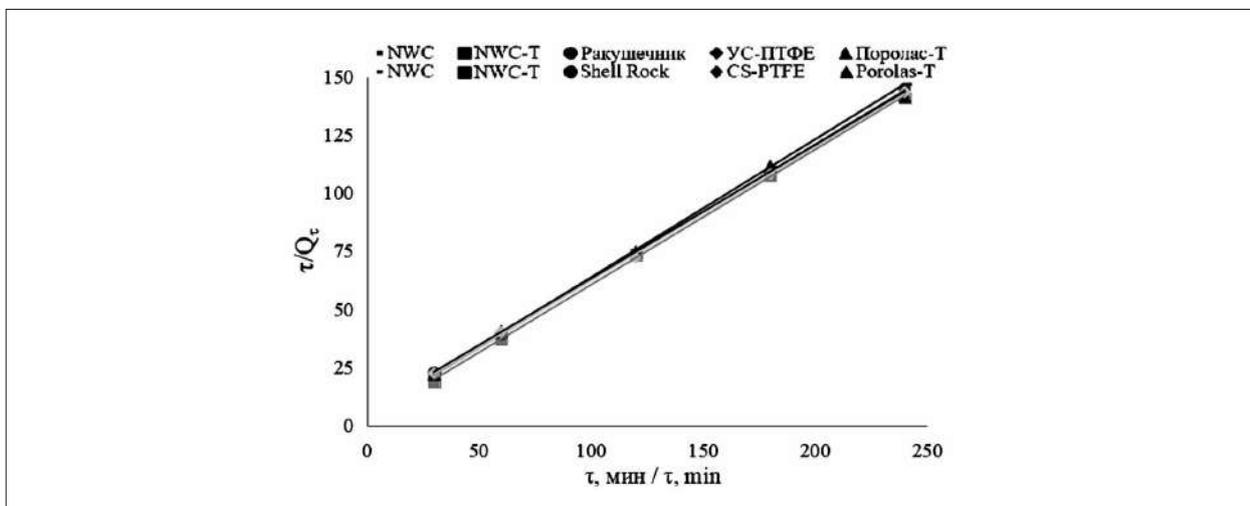


Рис. 4. Линеаризованные кинетические кривые адсорбции третичного амина ТОА из водных растворов по модели псевдо-второго порядка материалами различного типа
Fig. 4. Linearized kinetic curves of adsorption of tertiary amine TOA from aqueous solutions according to the pseudo-second-order model by materials of various types

0,970–0,997. Соответствие экспериментальных данных кинетическому уравнению псевдо-второго порядка указывает на то, что взаимодействие между сорбтивом (сорбатом) и функциональной группой сорбента подчиняется закону действующих масс для реакций второго порядка (скорость взаимодействия пропорциональна произведению концентраций двух реагирующих веществ), компоненты взаимодействуют друг с другом в соотношении 1:1 [27, 28]. Лучшее значение коэффициента детерминации при использовании модели Еловича в случае адсорбции первичного амина Primene-JMT ракушечником может свидетельствовать об энергетической неоднородности поверхности природного адсорбента,

что, в свою очередь, способствует протеканию химической адсорбции [29].

Поскольку на практике часто используют деструктивные методы очистки растворов от экстрагентов, сравнение полученных результатов проводили с данными по очистке от растворённого масла такими адсорбентами, как активированный углеродный волокнистый материал, терморасширенный графит и пенополифенолкарбамид [30]. При адсорбции масла из водных растворов степень извлечения ими составляет 91, 84 и 84% соответственно, что сравнимо с данными, полученными в работе по очистке первичного амина адсорбцией на стиролдивинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и угле

Таблица 2 / Table 2

Константы скорости адсорбции первичного амина Primene-JMT, рассчитанные по кинетическим моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича / Primene-JMT adsorption rate constants calculated from pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich kinetic m

Адсорбент Adsorbent	Модель псевдо-первого порядка The pseudo-first order model		Модель псевдо-второго порядка The pseudo-second order model		Модель Еловича Elovich model	
	$k_1 \cdot 10^2$, 1/мин 1/min	R^2	k_2 , г/(ммоль · мин) g/(mmol · min)	R^2	β , г/ммоль g/mmol	R^2
Ракушечник Shell rock	1	0,967	1,40	0,969	2,95	0,971
NWC	2	0,942	1,02	0,994	11,53	0,851
NWC-T	1,5	0,811	1,01	0,998	19,81	0,789
УС-ПТФЭ CS-PTFE	1,2	0,958	1,03	0,995	7,29	0,948
Поролас-T Porolas-T	0,7	0,977	1,01	0,998	25,77	0,883

Таблица 3 / Table 3

Константы скорости адсорбции третичного амина ТОА, рассчитанные по кинетическим моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича / Tertiary amine TOA adsorption rate constants calculated from pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich kinetic models

Адсорбент Adsorbent	Модель псевдо-первого порядка The pseudo- first order model		Модель псевдо-второго порядка The pseudo-second order model		Модель Еловича Elovich model	
	$k_1 \cdot 10^2$, 1/мин 1/min	R^2	k_2 , г/(ммоль · мин) ⁻¹ g/(mmol · min)	R^2	β , г/ммоль g/mmol	R^2
Ракушечник Shell rock	3,1	0,991	1,03	0,993	6,51	0,885
NWC	0,20	0,965	1,03	0,997	7,47	0,932
NWC-T	0,76	0,886	1,01	0,997	22,47	0,869
УС-ПТФЭ CS-PTFE	0,24	0,934	1,03	0,991	6,22	0,932
Поролас-T Porolas-T	0,09	0,888	1,02	0,992	6,76	0,975

NWC-T, модифицированном углеродными нанотрубками (88,8–91,0%) и ниже по очистке этими адсорбентами третичного амина (98,3–98,5%).

Для десорбции экстрагентов с насыщенных адсорбентов использовали раствор карбоната натрия с концентрацией 10 г/дм³. В полученных элюатах наблюдали расслаивание фаз, которое позволяет выделить экстрагент и отправить его в оборот.

Процесс очистки водных растворов от экстрагентов можно осуществлять в соответствии с предлагаемой принципиальной схемой (рис. 5).

Адсорбент и сбросной раствор, включающий оборотный раствор после отстаивания элю-

ата, поступают на стадию сорбции в колонный аппарат. Очищенный раствор направляется в оборот или на технические нужды предприятия. После насыщения адсорбента экстрагентом проводится элюирование щелочным раствором, например, содой, объём которого значительно меньше, чем объём сбросного раствора. Элюат поступает на отстаивание и отделение экстрагента, возвращаемого в цикл экстракции. Раствор после отстаивания, содержащий растворённую органику, поступает снова на стадию адсорбции.

Заключение

В работе изучена возможность очистки водных растворов, содержащих амины (пер-

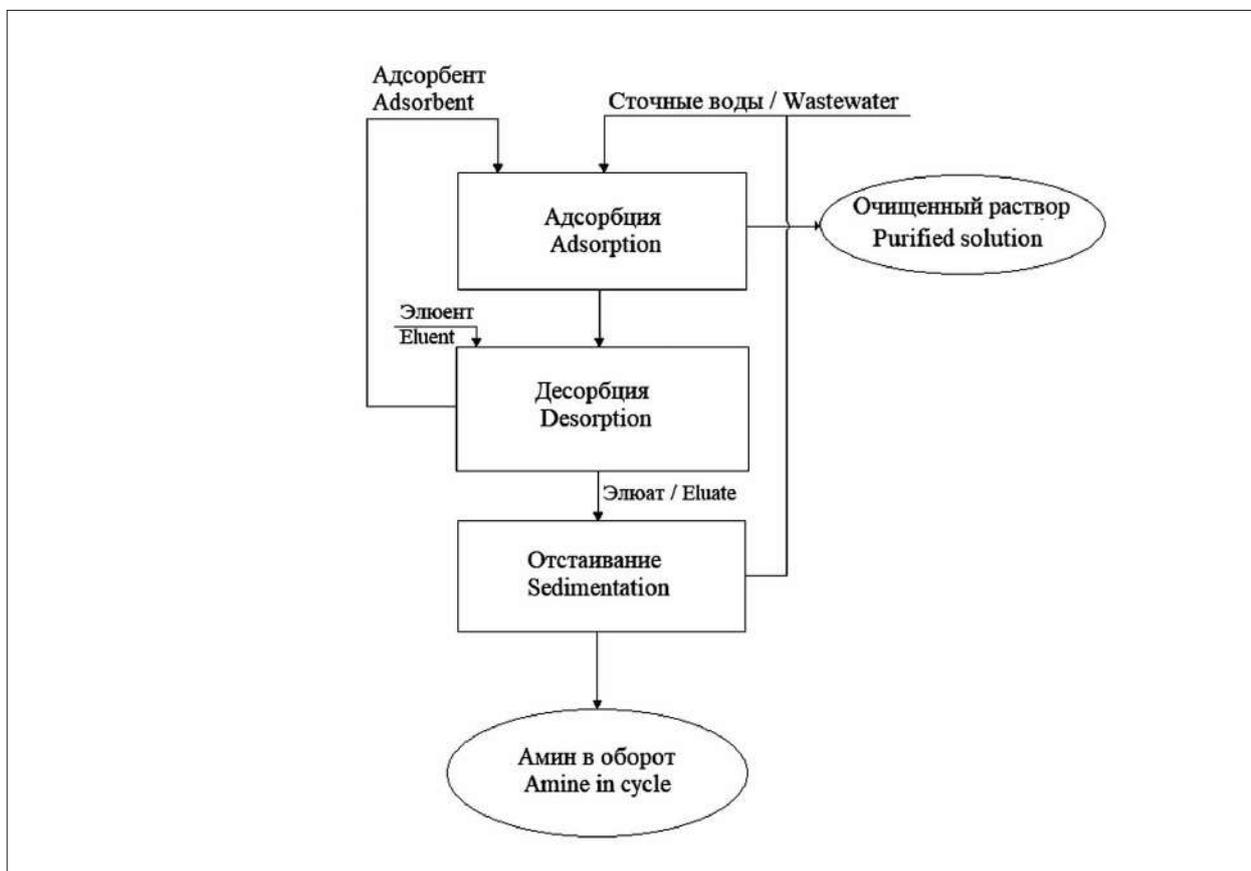


Рис. 5. Принципиальная блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов
 Fig. 5. Schematic block diagram of adsorption purification of aqueous solutions from extractants

вичный амин Primene-JMT и третичный амин ТОА), адсорбцией на углеродных материалах (активированном угле NWC, угле NWC-Т, модифицированном углеродными нанотрубками, угле УС-ПТФЭ, модифицированном политетрафторэтиленом), а также стиролдивинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и природном адсорбенте – ракушечнике. В статических условиях определены значения коэффициентов распределения аминов в адсорбентах и установлено, что значительная эмульгируемость третичного амина ТОА по сравнению с первичным амином ответственна за более высокие коэффициенты его распределения. Лучшими ёмкостными характеристиками обладают синтетический неионогенный сополимер Поролас-Т и активированный уголь, модифицированный нанотрубками NWC-Т. Методом ограниченного объёма получены интегральные кинетические кривые адсорбции выбранных аминов из водных растворов этими адсорбентами. Обработка полученных кинетических данных по известным моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича позволили рассчитать константы скорости адсорбции аминов и по-

казали, что уравнение модели псевдо-второго порядка более адекватно описывает процесс ($R^2 > 0,99$), что может свидетельствовать о подчинении его закону действующих масс для реакций второго порядка. Лучшее значение коэффициента детерминации при использовании модели Еловича, в случае адсорбции Primene-JMT ракушечником, может быть связано с энергетической неоднородностью поверхности адсорбента.

Сравнение полученных в работе данных с результатами по адсорбции растворённого масла углеродными материалами и пенополифенолкарбамидом показало, что степень извлечения первичного амина на выбранных лучших материалах сравнима со степенью очистки растворов от масла и выше для адсорбции третичного амина.

На основании полученных результатов предложена блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов.

Таким образом, полученные в работе данные по очистке растворов, содержащих амины Primene-JMT и ТОА, показывают возможность использования для этой цели всех выбранных адсорбентов.

Осуществление процесса адсорбционной очистки водных растворов, содержащих экстрагент, по предложенной схеме позволит снизить токсичность сбрасываемых растворов, а также вернуть в оборот часть дорогостоящего экстрагента.

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

Литература

1. Торцев А.М. Хозяйственное использование и сохранение водных биологических ресурсов в России: проблемы правового регулирования // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 216–224. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-216-224
2. Kim K.J., Khalekuzzaman M., Suh J.N., Kim H.J., Shagol C., Kim H.J. Phytoremediation of volatile organic compounds by indoor plants: a review // Horticulture, Environment and Biotechnology. 2018. V. 59. P. 143–157. doi: 10.1007/s13580-018-0032-0
3. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // Progress in Chemistry. 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402
4. Auta M., Hameed B.H. Coalesced chitosan activated carbon composite for batch and fix-bed adsorption of cationic and anionic dyes // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. V. 105. P. 199–206. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.12.021
5. Mohmood I., Lopes C.B., Lopes I., Ahmad I., Duarte A.C., Pereira E. Nanoscale materials and their use in water contaminants removal – a review // Environmental Science and Pollution Research. 2013. V. 20. P. 1239–1260. doi: 10.1007/s11356-012-1415-x
6. Kucherova A.E., Shubin I.N., Yermakov A.A., Gerasimova A.V., Memetov N.R., Popova A.A. Kinetic studies on toluene removal from aqueous solutions using carbon nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 693. Article No. 012039. doi: 10.1088/1757-899X/693/1/012039
7. Aditya D., Rohan P., Suresh G. Nano-adsorbents for wastewater treatment: a review // Research Journal of Chemistry and Environment. 2011. V. 15. P. 1033–1040.
8. Ruan X., Liu H., Chang C.-Y., Fan X.-Y. Preparation of organobentonite by a novel semidry-method and its adsorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution // International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. V. 95. P. 212–218. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007
9. Sun Y.B., Chen C.L., Shao D.D., Li J.X., Tan X.L., Zhao G.X., Yang S., Wang X. Enhanced adsorption of ionizable aromatic compounds on humic acid-coated

- carbonaceous adsorbents // RSC Advances. 2012. V. 2. P. 10359–10364. doi: 10.1039/C2RA21713A
10. Чаплина Т.О., Пахненко В.П. Особенности очистки поверхностных вод от углеводородов с использованием природных сорбентов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 38–44. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044
11. Cheng Y., He H., Yang C., Zeng G., Li X., Chen H., Yu G. Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds // Biotechnology Advances. 2016. V. 34. P. 1091–1102. doi: 10.1016/j.biotechadv.2016.06.007
12. Гогонин А.В., Щемелина Т.Н., Анчугова Е.М. Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 109–115. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
13. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G.M. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separation Purification Methods. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1081/SPM-100100009
14. Mamaghani A.H., Haghight F., Lee C.-S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: the state-of-the-art // Applied Catalysis B: Environmental. 2017. V. 203. P. 247–269. doi: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037
15. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // Progress in Chemistry. 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402
16. Kuzmin V.I., Kuzmin D.V., Gudkova N.V., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A., Alekseenko V.N., Aksyutin P.V., Bartseva Yu.V., Ivanov A.V., Kryuchek N.M. Autocatalytic decomposition of tributyl phosphate in the spent extractant of the PUREX process for safe disposal of radioactive impurities // Hydrometallurgy. 2022. V. 213. Article No. 105909. doi: 10.1016/j.hydromet.2022.105909
17. Jackson P., Attalla M. Ultra-violet treatment as a strategy for destruction of degradation products from amine-based post combustion CO₂ capture // Energy Procedia. 2013. V. 37. P. 1543–1553.
18. Wen J., Ning P., Cao H., Sun Z., Zhang Y. Controllable recovery of ammonium substituted polyoxovanadate acid compound (ASPOVC) from aqueous/leaching solution by primary amines // Journal of Cleaner Production. 2018. V. 205. P. 728–737. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.237
19. Межов Э.А. Экстракция аминами и четвертичными аммониевыми основаниями. Справочник. М.: Атомиздат. 1977. 304 с.
20. Трошкина И.Д., Обручникова Я.А., Пестов С.М. Сорбция металлов материалами с подвижной фазой экстрагентов // Российский химический журнал. 2017. Т. 61. № 4. С. 54–65. doi: 10.1134/S107036321912048X
21. Ионообменные материалы для процессов гидрометаллургии, очистки сточных вод и водоподготовки: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ВНИИХТ, 1989. 232 с.

22. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances // *Kung Sven Vetén Hand.* 1898. V. 24. P. 39–45.
23. Ho Y.S., McKay G.M. A Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents // *Process Safety and Environmental Protection.* 1998. V. 76. P. 332–340. doi: 10.1205/095758298529696
24. Zeldowitsch J. Uber den mechanismus der katalytischen oxydation von CO an MnO_2 // *URSS, Acta Physicochim.* 1934. V. 1. No. 2. P. 364–449.
25. Chien S.H., Clayton W.R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils // *Soil Science Society of America Journal.* 1980. V. 44. P. 265–268. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x
26. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Ленинград: Химия. Ленинградское отделение, 1970. 336 с.
27. Tran H.N., You S.-J., Hosseini-Bandegharai A., Chao H.-P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review // *Water Research.* 2017. V. 120. P. 88–116. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.014
28. Бабкин А.В., Нескоромная Е.А., Бураков А.Е., Буракова И.В. Кинетика сорбции ионов меди(II) из водных растворов оксидом графена // *Вестник ТГТУ.* 2018. Т. 24. № 1. С. 79–86.
29. Gautam R.K., Chattopadhyaya, M.C. *Nanomaterials for Wastewater Remediation.* Oxford: Elsevier, 2016. 347 p.
30. Богдан Н.Ф., Лоркипанидзе Н.С., Галунова Е.П., Виноградова Л.Е., Асташкина О.В. Адсорбция масла из водных растворов материалами различной природы // *Химические волокна.* 2008. № 4. С. 11–14.
5. Mohmood I., Lopes C.B., Lopes I., Ahmad I., Duarte A.C., Pereira E. Nanoscale materials and their use in water contaminants removal – a review // *Environmental Science and Pollution Research.* 2013. V. 20. P. 1239–1260. doi: 10.1007/s11356-012-1415-x
6. Kucherova A.E., Shubin I.N., Yermakov A.A., Gerasimova A.V., Memetov N.R., Popova A.A. Kinetic studies on toluene removal from aqueous solutions using carbon nanotubes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 693. Article No. 012039. doi: 10.1088/1757-899X/693/1/012039
7. Aditya D., Rohan P., Suresh G. Nano-adsorbents for wastewater treatment: a review // *Research Journal of Chemistry and Environment.* 2011. V. 15. No. 2. P. 1033–1040.
8. Ruan X., Liu H., Chang C.-Y., Fan X.-Y. Preparation of organobentonite by a novel semidry-method and its adsorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2014. V. 95. P. 212–218. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007
9. Sun Y.B., Chen C.L., Shao D.D., Li J.X., Tan X.L., Zhao G.X., Yang S., Wang X. Enhanced adsorption of ionizable aromatic compounds on humic acid-coated carbonaceous adsorbents // *RSC Advances.* 2012. V. 2. P. 10359–10364. doi: 10.1039/C2RA21713A
10. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of purification of surface waters from hydrocarbons using natural sorbents // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 4. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044
11. Cheng Y., He H., Yang C., Zeng G., Li X., Chen H., Yu G. Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds // *Biotechnology Advances.* 2016. V. 34. P. 1091–1102. doi: 10.1016/j.biotechadv.2016.06.007
12. Gogonin A.V., Schemelina T.N., Anchugova E.M. Evaluation of the use of waste water as a nutrient medium for the accumulation of microalgae biomass // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 109–115 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
13. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G.M. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separation Purification Methods.* 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1081/SPM-100100009
14. Mamaghani A.H., Haghghat F., Lee C.-S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: the state-of-the-art // *Applied Catalysis B: Environmental.* 2017. V. 203. P. 247–269. doi: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037
15. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // *Progress in Chemistry.* 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402
16. Kuzmin V.I., Kuzmin D.V., Gudkova N.V., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A., Alekseenko V.N., Aksyutin P.V., Bartseva Yu.V., Ivanov A.V., Kryuchek N.M. Autocatalytic

References

decomposition of tributyl phosphate in the spent extractant of the PUREX process for safe disposal of radioactive impurities // *Hydrometallurgy*. 2022. V. 213. Article No. 105909. doi: 10.1016/j.hydromet.2022.105909

17. Jackson P., Attalla M. Ultra-violet treatment as a strategy for destruction of degradation products from amine-based post combustion CO₂ capture // *Energy Procedia*. 2013. V. 37. P. 1543–1553.

18. Wen J., Ning P., Cao H., Sun Z., Zhang Y. Controllable recovery of ammonium substituted polyoxovanadate acid compound (ASPOVC) from aqueous/leaching solution by primary amines // *Journal of Cleaner Production*. 2018. V. 205. P. 728–737. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.237

19. Mezhev E.A. Extraction with amines and quaternary ammonium bases. Directory. Moskva: Atomizdat, 1977. 304 p. (in Russian).

20. Troshkina I.D., Obruchnikova Y.A., Pestov S.M. Metal sorption by materials with a mobile phase of extractants // *Russ. J. Gen. Chem.* 2019. V. 89. No. 12. P. 2721–2732. doi: 10.1134/S107036321912048X

21. Ion-exchange materials for hydrometallurgical processes, wastewater treatment and water treatment: A Handbook. 4th ed., revised. and additional Moskva: VNIKhT, 1989. 232 p. (in Russian).

22. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances // *Kung Sven Vetén Hand.* 1898. V. 24. No. 1. P. 39–45.

23. Ho Y.S., McKay G.M. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various

sorbents // *Process Safety and Environmental Protection*. 1998. V. 76. P. 332–340. doi: 10.1205/095758298529696

24. Zeldowitsch J. Uber den mechanismus der katalytischen oxydation von CO an MnO₂ // *URSS, Acta Physicochim.* 1934. V. 1. No. 2. P. 364–449.

25. Chien S.H., Clayton W.R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. V. 44. P. 265–268. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x

26. Kokotov Yu.A., Pasechnik V.A. Equilibrium and kinetics of ion exchange. Leningrad: Khimia. Leningradskoe otdelenie, 1970. 336 p. (in Russian).

27. Tran H.N., You S.J., Hosseini-Bandegharai A., Chao H.P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review // *Water Research*. 2017. V. 120. P. 88–116. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.014

28. Babkin A.V., Neskornnaya E.A., Burakov A.E., Burakova I.V. Kinetics of sorption of copper(II) ions from aqueous solutions by graphene oxide // *Vestnik TSTU*. 2018. V. 24. No. 1. P. 79–86. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.079-086

29. Gautam R.K., Chattopadhyaya M.C. Nanomaterials for wastewater remediation. Oxford: Elsevier, 2016. 347 p.

30. Bogdan N.F., Lortkipanidze N.S., Galunova E.P., Vinogradova L.E., Astashkina O.V. Adsorption of oils from aqueous solutions by materials of various natures // *Chemical fibers*. 2008. No. 4. P. 11–14 (in Russian).