

УДК 533.583.2:543.544:547.97

АДСОРБЦИЯ МЕТИЛЕНОВОГО ГОЛУБОГО ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НА КОМПОЗИТЕ ГАЛЛУАЗИТ/МАГНЕТИТ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2022 г. О. В. Алексеева^а, А. В. Носков^{а,*}, Д. Н. Смирнова^а

^а Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

*e-mail: avn@isc-ras.ru

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 20.10.2021 г.

Принята к публикации 25.10.2021 г.

Композиционный материал галлуазит/магнетит синтезирован методом химического соосаждения солей железа в порах галлуазита. С использованием полученного композита в качестве адсорбента проведены исследования эффективности извлечения тиазинового красителя метиленового голубого из водных растворов. Для математического описания адсорбционного процесса применена единая модель, сочетающая равновесие и кинетику адсорбции. Показано, что в отличие от традиционных моделей кинетики адсорбции (псевдопервого и псевдвторого порядков) единая модель позволяет определить истинную константу скорости процесса, которая не зависит от начальной концентрации красителя в растворе.

Ключевые слова: галлуазит/магнетит, адсорбция, изотерма, моделирование, метиленовый голубой

DOI: 10.31857/S0044453722040021

Для получения функциональных материалов с контролируемыми свойствами широкое распространение получили растворные методы. Как отмечено в монографии Г.А. Крестова с соавт. [1], развитие теоретических основ таких методов является неременным условием для интенсификации технологических процессов в различных отраслях промышленности.

В последнее время все большее внимание исследователей привлекают магнитные наноматериалы, что обусловлено перспективами их применения в медицине, фармацевтике и областях, связанных с охраной окружающей среды [2, 3]. Среди таких материалов наиболее изучен магнетит (Fe_3O_4). Эти магнитные частицы широко используются в качестве сорбентов, мембран, биосенсоров, для адресной доставки лекарств благодаря своим свойствам, таким как стабильность магнитных характеристик, низкая токсичность и биосовместимость [4–7].

Весьма распространенный метод синтеза магнетита – химическое соосаждение, характеризующееся простотой, эффективностью и экономичностью. Однако одной из проблем при получении магнитных частиц является их склонность к агрегированию и окислению.

Чтобы защитить магнитные частицы от окисления и уменьшить агломерацию, их стабилизи-

руют путем введения в матрицы неорганических и органических соединений. Пример таких матриц – глинистые минералы, которые обладают уникальными физико-химическими свойствами, такими как высокая химическая и механическая стабильность, способность к катионному обмену, большая площадь поверхности, низкая стоимость и др. [8].

Галлуазит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) представляет собой природный глинистый минерал с трубчатой структурой. В его состав входят гидроксильные группы, которые расположены между слоями и на поверхности нанотрубок, а также группы O-Si-O на поверхности [9, 10]. Длина нанотрубок изменяется в диапазоне от 400 до 1500 нм, внутренний диаметр составляет 10–100 нм [11].

Благодаря его нанотрубчатой структуре, уникальным свойствам поверхности, а также химической инертности и биосовместимости галлуазит широко применяется в фармацевтике, в медицине для адресной доставки лекарств, в материалах для тканевой инженерии [10, 11] и в экологических технологиях в качестве эффективного адсорбента для удаления токсичных соединений [12]. Однако при использовании глинистых минералов для очистки сточных вод от загрязнений возникает проблема разделения и регенерации адсорбента. Один из путей решения этой проблемы – модификация алюмосиликата

Таблица 1. Влияние начальной концентрации МГ на время достижения равновесия и степень извлечения красителя при адсорбции на композите галлуазит/магнетит

| $C_0 \times 10^3$, ммоль/л | t_{eq} , мин | α , % |
|-----------------------------|----------------|--------------|
| 5.6 | 25 | 99 |
| 11.1 | 35 | 99 |
| 13.9 | 60 | 99 |

магнетитом с последующим (после проведения адсорбции) разделением твердой и жидкой фаз внешним магнитным полем [13].

Кроме того, в ряде публикаций [14–16] показано, что модификация галлуазита магнитными частицами может способствовать повышению сорбционных свойств алюмосиликатной глины по отношению к ионам металлов и токсичным органическим соединениям. Однако, по мнению авторов работ [17, 18], адсорбционная эффективность галлуазита снижается в результате его модификации магнетитом. Таким образом, результаты, полученные разными исследователями, не всегда согласуются друг с другом. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего накопления экспериментальных данных по удалению различных контаминантов (загрязнителей) из жидких сред с помощью сорбентов на основе галлуазита.

Органические красители как яркие представители таких загрязнителей широко используются в различных областях промышленности, таких как текстильная, кожевенная, пищевая, целлюлозно-бумажная, фармацевтическая и т.д. Поэтому исследование процессов извлечения красителей имеет большое прикладное значение. Тем более, что эти соединения в воде, даже в низких концентрациях, могут быть токсичными и вредными для здоровья человека.

Метиленовый голубой (МГ) является примером катионных красителей, содержащихся в сточных водах. Кроме того, МГ может быть использован в качестве модельного соединения при исследованиях адсорбции органических красителей из растворов [19]. Для его удаления из водных сред широко используются различные адсорбенты, такие как активированный уголь, глинистые минералы, магнитные адсорбенты, твердые отходы сельскохозяйственного производства и т.д. [20–23].

В связи с этим цель настоящей работы – синтез композиционного материала галлуазит/магнетит, проведение экспериментальных исследований и моделирование адсорбции МГ на полученном композите.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе композиционный материал галлуазит/магнетит был получен методом химического соосаждения солей железа в порах галлуазита. Для этого галлуазит (6.002 г) диспергировали в растворе гексагидрата хлорида железа $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (1.004 г) и тетрагидрата хлорида железа $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ (0.5 г) в условиях интенсивного перемешивания и воздействия ультразвука. Для осаждения частиц Fe_3O_4 добавляли по каплям водный раствора аммиака. Затем частицы магнетизированного галлуазита были отделены внешним полем, трижды промыты дистиллированной водой до нейтральной pH и высушены в вакууме при 70°C до сухого остатка. Полученный композит представлял собой порошок темно-коричневого цвета.

Сорбционные свойства синтезированного композита были исследованы по отношению к метиленовому голубому при комнатной температуре и pH 6.5. Для этого 0.05 г исследуемого адсорбента смешивали с 5 мл водного раствора МГ и выдерживали при перемешивании. Затем через заданные интервалы времени (t) раствор отделяли от адсорбента декантацией и анализировали спектрофотометрически (T70 + UV/Vis, PG Instrument Co Ltd., Lutterworth, UK) при длине волны 664 нм.

Количество красителя в твердой фазе (A , ммоль/г) определяли по соотношению:

$$A(t) = \frac{C_0 - C(t)}{10}, \quad (1)$$

где C_0 и C (ммоль/л) – концентрация МГ в растворе до и после сорбции соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Адсорбционно-кинетические характеристики галлуазит/магнетита были определены при исследовании влияния времени контакта фаз на количество адсорбированного красителя (A). Как видно из рис. 1, на начальных участках кинетических кривых величина A быстро увеличивается со временем, что связано со значительным градиентом концентрации красителя в начале процесса из-за наличия большого числа свободных мест для адсорбции. Однако в ходе адсорбционного процесса число свободных мест постепенно уменьшается и количество адсорбированного МГ достигает равновесного значения (A_{eq}). При этом время наступления равновесия (t_{eq}) увеличивается с ростом начальной концентрации, а степень извлечения (α) составляет 99% (табл. 1).

Большое значение для кинетики адсорбционного процесса имеет начальная концентрация сорбата в растворе. Поэтому в настоящей работе кинетика удаления МГ галлуазит/магнетитом

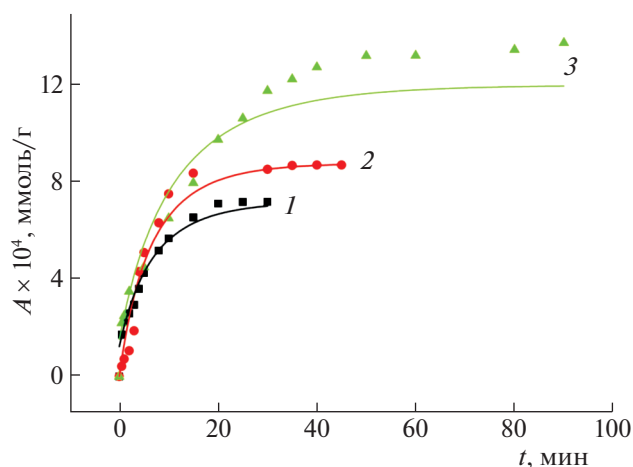


Рис. 1. Влияние начальной концентрации МГ в растворе на количество красителя, адсорбированного композитом галуазит/магнетит. Символы – экспериментальные результаты; сплошные линии построены с использованием уравнения (9) для начальных концентраций C_0 : 5.6×10^{-3} (1), 11.1×10^{-3} (2) и 13.9×10^{-3} (3) ммоль/л.

была исследована при различных концентрациях красителя. Исследования показали, что за 30 мин адсорбционного процесса количество МГ в твердой фазе достигает примерно 7×10^{-4} ммоль/г (для $C_0 = 5.6 \times 10^{-3}$ ммоль/л) и 13×10^{-4} ммоль/г (для $C_0 = 13.9 \times 10^{-3}$ ммоль/л) (рис. 1). Полученные данные свидетельствуют о том, что движущая сила адсорбции увеличивается за счет увеличения начальной концентрации МГ в растворе.

Для математического описания кинетики адсорбции МГ были использованы традиционные модели: кинетическая модель псевдопервого порядка, кинетическая модель псевдовторого порядка и диффузионная модель:

$$A(t) = A_{\text{eq}}[1 - e^{-k_1 t}], \quad (2)$$

$$A(t) = A_{\text{eq}} \frac{k_2 A_{\text{eq}} t}{1 + k_2 A_{\text{eq}} t}, \quad (3)$$

$$A(t) = k_d \sqrt{t} + g, \quad (4)$$

где A_{eq} – равновесная концентрация адсорбированного красителя; k_1 и k_2 – константы скорости адсорбции псевдопервого и псевдовторого порядка соответственно; k_d – константа скорости диффузии; величина g зависит от толщины пограничного слоя.

Для оценки адекватности модели был использован коэффициент детерминации (R^2).

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по кинетике адсорбции МГ на галуазит/магнетите, а также фитирующие кривые, соответствующие перечисленным моделям. Значения

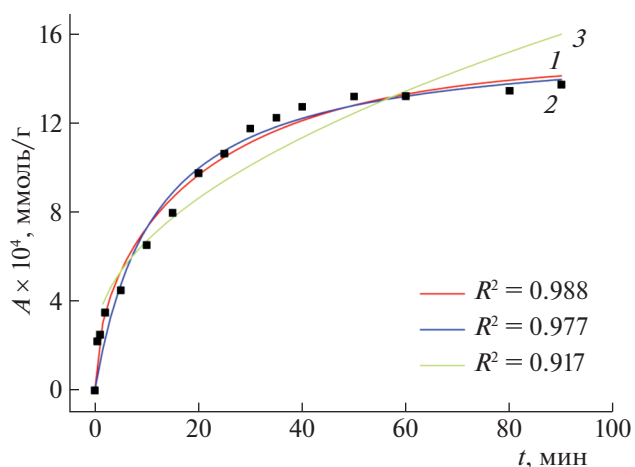


Рис. 2. Кинетика адсорбции МГ на галуазите/магнетите ($C_0 = 13.9 \times 10^{-3}$ ммоль/л). Экспериментальные данные (■) и различные фитирующие кривые: 1 – модель кинетики псевдопервого порядка, 2 – модель кинетики псевдовторого порядка, 3 – диффузионная модель.

ния A_{eq} , k_1 , k_2 , k_d и g , установленные в результате фитирования, приведены в табл. 2.

Как видно, высокие коэффициенты детерминации ($R^2 > 0.95$) наблюдаются при использовании моделей кинетики как псевдопервого, так и псевдовторого порядка. Это свидетельствует о невозможности заключения о предпочтительности какой-либо одной модели. Кроме того, при относительно небольшой начальной концентрации МГ в растворе ($C_0 = 5.6 \times 10^{-3}$ ммоль/л) важным фактором адсорбционного процесса является также диффузионный транспорт молекул красителя к поверхности адсорбента ($R^2 = 0.953$).

Анализ литературных данных показывает, что для получения информации о механизме адсорбционного процесса, как правило, найденные значения равновесных концентраций используются для построения изотерм, которые затем анализируются с использованием теоретических представлений.

Как видно из рис. 3, при сорбции МГ на галуазит/магнетите на начальном участке изотермы равновесная концентрация красителя в твердой фазе (A_{eq}) почти линейно увеличивается с ростом равновесной концентрации красителя в растворе (C_{eq}). Это связано с достаточным количеством адсорбционных центров на поверхности адсорбента. Однако дальнейшее увеличение концентрации МГ может привести к дефициту свободных центров адсорбции, что проявляется в искривлении изотермы.

Таблица 2. Кинетические параметры адсорбции МГ на композите галлуазит/магнетит, рассчитанные с использованием различных математических моделей

| Параметр модели | $C_0 = 5.6 \times 10^{-3}$ ммоль/л | $C_0 = 11.1 \times 10^{-3}$ ммоль/л | $C_0 = 13.9 \times 10^{-3}$ ммоль/л |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Модель кинетики псевдопервого порядка | | | |
| $A_{eq} \times 10^4$, ммоль/г | 7.091 | 8.891 | 14.719 |
| $k_1 \times 10^3$, мин ⁻¹ | 0.190 | 0.146 | 0.028 |
| R^2 | 0.959 | 0.972 | 0.988 |
| Модель кинетики псевдвторого порядка | | | |
| $A_{eq} \times 10^4$, ммоль/г | 8.423 | 10.617 | 15.770 |
| $k_2 \times 10^{-2}$, г/(ммоль мин) | 2.588 | 1.425 | 0.547 |
| R^2 | 0.973 | 0.951 | 0.977 |
| Диффузионная модель | | | |
| $k_d \times 10^4$, ммоль/(г мин ^{0.5}) | 1.249 | 1.431 | 1.470 |
| $g \times 10^4$, ммоль/г | 1.112 | 0.644 | 2.064 |
| R^2 | 0.953 | 0.807 | 0.917 |

Для математического описания полученных изотерм были использованы традиционные модели Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина:

$$A_{eq} = A_m \frac{K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}}, \quad (5)$$

где A_m – теоретическая максимальная адсорбционная способность монослоя; K_L – постоянная Ленгмюра;

$$A_{eq} = K_F (C_{eq})^{1/n}, \quad (6)$$

где K_F – константа Фрейндлиха, $1/n$ – коэффициент энергетической неоднородности поверхности сорбента;

$$A_{eq} = B_T \ln[K_T C_{eq}], \quad (7)$$

где B_T и K_T – постоянные изотермы Темкина.

Значения констант, рассчитанные с использованием перечисленных моделей, перечислены в табл. 3. Как видно, коэффициент детерминации, полученный при использовании модели Ленгмюра, значительно выше таковых для моделей Фрейндлиха и Темкина. Это может свидетельствовать о том, что именно модель Ленгмюра может быть использована для математического описания равновесной адсорбции МГ на галлуазит/магнетите.

Анализ результатов исследований кинетики адсорбционного процесса показывает, что константы скорости, определенные с использованием классических моделей кинетики псевдопервого и псевдвторого порядков, зависят от начальной концентрации красителя (табл. 2). Таким образом, величины k_1 и k_2 являются кажущимися константами скорости, а не истинными константами скорости. По-видимому, это связано с тем, что перечисленные модели не учитывают обратный (десорбционный) процесс, роль которого возрастает по мере приближения к равновесию. Это затрудняет интерпретацию полученных результатов и снижает прогностическую способность использованных моделей.

Для устранения указанного недостатка в работе [24] был предложен подход, базирующийся на едином описании кинетики и равновесия адсорбции (a unified approach model). Предложенная модель основывается на необходимости учета как адсорбционного, так и десорбционного процессов. Причем динамическое равновесие между ними описывается моделью Ленгмюра (5), где кон-

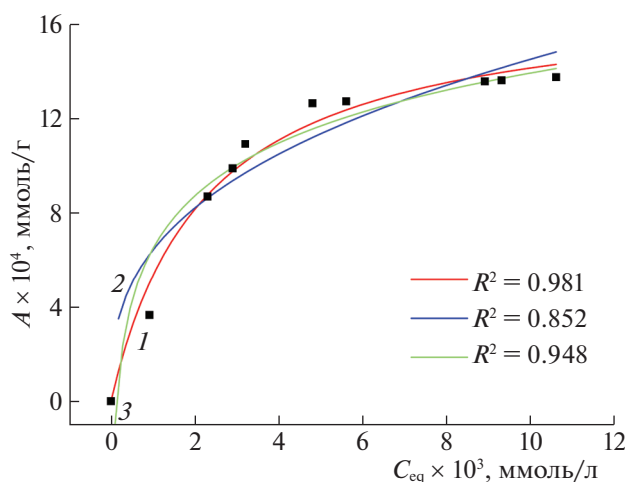


Рис. 3. Изотерма адсорбции МГ на галлуазите/магнетите. Экспериментальные данные (■) и различные фитирующие кривые: 1 – модель Ленгмюра, 2 – модель Фрейндлиха, 3 – модель Темкина.

Таблица 3. Параметры изотерм адсорбции МГ на композите галлуазит/магнетит, рассчитанные с использованием различных математических моделей

| Параметр модели | Значение параметра |
|-------------------|---|
| Модель Ленгмюра | |
| A_m | 17.312×10^{-4} ммоль/г |
| K_L | 0.445×10^3 л/ммоль |
| R^2 | 0.981 |
| Модель Фрейндлиха | |
| $1/n$ | 0.354 |
| K_F | $6.418 \times 10^{-4} \frac{\text{ммоль}^{1-1/n} \text{ л}^{-1/n}}{\text{г}}$ |
| R^2 | 0.852 |
| Модель Темкина | |
| B_T | 3.231×10^{-4} ммоль/г |
| K_T | 7.427×10^3 л/ммоль |
| R^2 | 0.948 |

станта K_L связана с константами скорости адсорбции (k_{ads}) и десорбции (k_{des}) соотношением:

$$K_L = \frac{k_{ads}}{k_{des}} \tag{8}$$

Кроме того, в любой момент времени скорость адсорбции зависит как от концентрации красителя в растворе, так и от количества незанятых адсорбционных центров на адсорбенте. Исходя из этих предположений, в [24] было получено основное уравнение единой модели, описывающее временную зависимость количества адсорбированного красителя в виде:

$$A(t) = (\alpha - \beta) \frac{(\beta/\alpha) e^{a(\beta-\alpha)k_{ads}t}}{(\beta/\alpha) e^{a(\beta-\alpha)k_{ads}t} - 1} + \beta, \tag{9}$$

где $\alpha = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, $\beta = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, $a = w_a$ (модуль), $b = C_0 + w_a A_m + 1/K_L$, $c = A_m C_0$.

Анализируя соотношение (9), можно получить, что при $t \rightarrow \infty$, $A(t) \rightarrow A_{eq} = \beta$.

В настоящей работе уравнение (9) было использовано для моделирования кинетики адсорбции МГ на галлуазит/магнетите при следующих значениях параметров: $w_a = 10$ г/л; $C_0 = 5.6 \times 10^{-3}$, 11.1×10^{-3} и 13.9×10^{-3} ммоль/л; $A_m = 17.312 \times 10^{-4}$ ммоль/г; $K_L = 0.445 \times 10^3$ л/ммоль, где значения A_m и K_L были найдены путем аппроксимации изотерм адсорбции с использованием модели Ленгмюра (табл. 4).

Необходимо подчеркнуть важную особенность единой модели. В отличие от моделей псевдопервого и псевдovторого порядков, этот подход позволяет прогнозировать равновесную концентрацию красителя в фазе адсорбента (A_{eq}) без использования экспериментальных данных по кинетике процесса адсорбции. Необходимы лишь значение модуля (w_a), начальная концентрация сорбата (C_0) и параметры изотермы Ленгмюра (A_m и K_L). Рассчитанные таким образом величины A_{eq} для сорбции МГ на галлуазит/магнетите приведены в табл. 4.

Кроме того, в табл. 4 представлены значения констант адсорбции и десорбции, которые были определены при обработке экспериментальных данных по кинетике процесса с использованием уравнения (9). Как видно, при изменении начальной концентрации красителя от 5.6×10^{-3} до 13.9×10^{-3} ммоль/л значение k_{ads} изменяется незначительно (в пределах 7.7–8.7 л/(ммоль мин)). В то время как при использовании модели кинетики псевдопервого порядка значения константы скорости, рассчитанные для этих значений начальной концентрации, различаются в 7 раз, а для модели кинетики псевдovторого порядка – в 5 раз (табл. 2). Это является несомненным преимуществом единой модели. Однако следует отметить, что в случае $C_0 = 13.9 \times 10^{-3}$ ммоль/л прогнозируемые значения A_{eq} были заметно ниже экспериментальных, а корреляция была хуже (рис. 3 и табл. 4).

Единая модель была также нами использована для анализа адсорбционных данных, приведенных в литературе. В табл. 5 представлены экспериментальные значения равновесной концентрации МГ ($A_{eq,exp}$), которые были получены для адсорбции на химически активированном

Таблица 4. Кинетические параметры адсорбции МГ на композите галлуазит/магнетит, рассчитанные с использованием единой модели (уравнение (9))

| Параметр модели | $C_0 = 5.6 \times 10^{-3}$ моль/л | $C_0 = 11.1 \times 10^{-3}$ моль/л | $C_0 = 13.9 \times 10^{-3}$ моль/л |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $A_{eq} \times 10^4$, моль/г | 7.2 | 8.785 | 12.010 |
| k_{ads} , л/(ммоль мин) | 8.729 | 7.890 | 7.7 |
| $k_{des} \times 10^{-2}$, мин ⁻¹ | 1.962 | 1.773 | 1.730 |
| R^2 | 0.967 | 0.961 | 0.943 |

Таблица 5. Сравнение литературных данных по равновесной адсорбции МГ на активированном галлуазите с рассчитанными по единой модели

| Литературные данные [19] | | Рассчитано по единой модели |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|
| C_0 , мг/л | $A_{eq,exp}$, мг/г | A_{eq} , мг/г |
| 50 | 25 | 24 |
| 100 | 48 | 47 |
| 300 | 85 | 87 |

галлуазите [19]. Также в табл. 5 приведены значения A_{eq} , рассчитанные с помощью единой модели с учетом параметров Ленгмюра, указанных в этой статье. Как видно, значения A_{eq} , предсказанные единой моделью, близки к наблюдаемым экспериментально в [19]. Это свидетельствует о том, что единая модель может быть использована для математического описания адсорбции МГ на глинистых адсорбентах.

Таким образом, полученные результаты продемонстрировали, что использование единой модели адсорбции позволяет прогнозировать равновесную концентрацию красителя в фазе адсорбента без использования экспериментальных кинетических данных, а также определять истинные константы скоростей адсорбции и десорбции, которые не зависят от начальной концентрации красителя в растворе.

Работа выполнена в рамках госзадания № 01201260483.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Неводные растворы в технике и технологии / Г.А. Крестов, А.Я. Фридман, В.В. Мясоедова и др. М.: Наука, 1991. 232 с.
- Revia R.A., Zhang M. // Mater. Today. 2016. V. 19. Is. 3. P. 157. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.08.022>
- Gawande M.B., Branco P.S., Varma R.S. // Chem. Soc. Rev. 2013. V.42. Is. 8. P. 3371. <https://doi.org/10.1039/c3cs35480f>
- Dong L., Qi Z., Li M. et al. // J. Envir. Chem. Eng. 2021. V. 9. № 5. P. 104739. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104739>
- Kulal P., Badalamoole V. // J. Envir. Chem. Eng. 2020. V. 8. Is. 5. P. 104207. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104207>
- Chen D., Tang Q., Li X. et al. // Int. J. Nanomed. 2012. V. 7. P. 4973. <https://doi.org/10.2147/IJN.S35140>
- Unal B.O., Bilici Z., Ugur N. et al. // J. Water Process Eng. 2019. V. 32. P. 100897. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100897>
- Mirbagheri N.S., Sabbagh S. // Micropor. Mesopor. Mat. 2018. V. 259. P. 134. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.10.007>
- Kamble R., Ghag M., Gaikawad S., Panda B.K. // J. Adv. Sci. Res. 2012. V. 3. Available online through <http://www.sciensage.info/jasr>.
- Fizir M., Dramou P., Zhang K. et al. // J. Colloid Interf. Sci. 2017. V. 505. P. 476. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.011>
- Santos A.C., Ferreira C., Veiga F. et al. // Adv. Colloid Interface Sci. 2018. V. 257. P. 58. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.007>
- Grylewicz A., Mozia S. // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 256. P. 117827. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117827>
- Alekseeva O.V., Rodionova A.N., Noskov A.V., Agafonov A.V. // Clay Clay Miner. 2019. V. 67. P. 471. <https://doi.org/10.1007/s42860-019-00037-w>
- Lia L., Wanga F., Lva Y. et al. // Appl. Clay Sci. 2018. V. 161. P. 225. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.002>
- Bonetto L.R., Ferrarini F., de Marcoa C. et al. // J. Water Process Eng. 2015. V. 6. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.02.006>
- Zhong S., Zhou C., Zhang X. et al. // J. Hazard. Mater. 2014. V. 276. P. 58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.013>
- Xie Y., Qian D., Wu D., Ma X. // Chem. Eng. J. 2011. V. 168. Is. 2. P. 959. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.031>
- Duan J., Liu R., Chen T. et al. // Desalination. 2012. V. 293. P. 46. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.022>
- Luo P., Zhang B., Zhao Y. et al. // Korean J. Chem. Eng. 2011. V. 28. № 3. P. 800. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0426-x>
- Mashkoor F., Nasar A. // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 500. P. 166408. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166408>
- Rafatullah M., Sulaiman O., Hashim R., Ahmad A. // J. Hazard. Mater. 2010. V. 177. Is. 1–3. P. 70. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
- Kausar A., Iqbal M., Javed A. et al. // J. Molec. Liq. 2018. V. 256. P. 395. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034>
- Albadarin A.B., Mo J., Glocheux Y. et al. // Chem. Eng. J. 2014. V. 255. P. 525. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.029>
- Islam Md.A., Khan Md.M.R., Mozumder Md.S.I. // Chem. Eng. Technol. 2004. V. 27. Is. 10. P. 1095. <https://doi.org/10.1002/ceat.200402084>