

Адсорбция препарата «Вольтарен» на пористых углеродных материалах в статических и динамических условиях

Ж.М. Жандосов^{1,2}, А.Ж. Байменов^{1,3}, А.Н. Сабитов^{1,4*}, Е.О. Досжанов^{1,2},
Д.И. Ченчик¹, А.Р. Керимкулова^{1,3}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богдабай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114/1, Алматы, Казахстан

ARTICLE INFO

Получено
17.02.2026

Получено в исправленном виде
11.03.2026

Принято
31.03.2026

Ключевые слова:

диклофенак; пористые углеродные материалы; рисовая шелуха; химическая активация; модель псевдотортого порядка; статическая и динамическая модель; модель Томаса

АННОТАЦИЯ

В статье исследована адсорбция диклофенака (чистой активной фармацевтической субстанции и в составе препарата «Вольтарен») на пористых углеродных материалах, полученных из рисовой шелухи методами химической активации (H_3PO_4 , K_2CO_3 , KOH), а также на синтетическом углероде из ксерогеля. В статических и динамических условиях проведена сравнительная оценка сорбционной емкости и кинетики процесса. Установлено, что образец, активированный KOH ($S_{\text{бэт}} = 2610 \text{ м}^2/\text{г}$), обладает наибольшей микропористостью и демонстрирует максимальную адсорбционную емкость (до 956 мг/г в статике и до 1016 мг/г в колонке с неподвижным слоем). Кинетические данные хорошо описываются моделью псевдотортого порядка ($R^2 > 0,99$), а динамическая адсорбция – моделью Томаса ($R^2 = 0,998$), что позволяет прогнозировать эффективность сорбентов в проточных системах. Существенного влияния вспомогательных компонентов лекарственной формы на процесс сорбции не выявлено. Установленные закономерности указывают на преимущественное взаимодействие молекулы диклофенака с микропористой углеродной матрицей посредством π - π -взаимодействий и электростатических эффектов. Полученные результаты подтверждают перспективность щелочно-активированных углеродных материалов на основе биомассы для разработки эффективных энтеросорбентов при интоксикациях нестероидными противовоспалительными препаратами.

1. Введение

Лекарственно-индуцированные поражения печени (ЛИПП) при передозировке нестероидными противовоспалительными препаратами (НПВП), такими как диклофенак и парацетамол, происходят чаще всего при суицидальной попытке, реже – при обезболивании, особенно в комбинации с опиоидами, а также на фоне приема алкоголя [1]. В Англии первое место в этиологии фульминантной (молниеносной) печеночной недостаточности занимает НПВП, оттесняя на второй план острые вирусные гепатиты [2]. В США ежегодно острые отравления НПВП, требующие госпитализации, регистрируются с частотой 29 на 100000 населения, в Израиле – 57, в Великобритании – 200. Смертность при токсических гепатопатиях достигает 5%, а при отравлениях НПВП даже в невысоких дозах – 19% [3]. В связи с этим проблема профилактики и коррекции интоксикации при острых отравлениях, в том числе такими препаратами как диклофенак, является актуальной.

Материалы из активированного угля, включая пористые гранулы и сферы, широко используются в медицине для энтеросорбции при лечении острых отравлений и выведении лекарственных препаратов или токсинов из желудочно-кишечного тракта. Они действуют как неселективные адсорбенты с высокой биосовместимостью, часто используемые для адсорбции лекарственных препаратов, бактериальных токсинов и других ксенобиотиков [4-6].

*Corresponding author: A.N. Sabitov; E-mail address: aitugans@mail.ru

Эффективность углеродных сорбентов в отношении фармацевтических препаратов и их производных зависит от удельной площади поверхности, структуры пор (мезопористых/микропористых), морфологии частиц и химической структуры фармацевтического препарата. В этом отношении молекула диклофенака, 2-[(2,6-дихлорфенил)амино]-бензолуксусная кислота, являясь органической молекулой с небольшими размерами, а также соединением с ароматическими кольцами и функциональными группами, которые в зависимости от pH могут быть заряжены как положительно, так и отрицательно, являются наиболее подходящим объектом для сорбции углеродными материалами (рис. 1).

Амино группа диклофенака может химически взаимодействовать с карбоксильными/карбонильными группами углеродных материалов, полученных в ходе пиролиза биорганических соединений. Бензольные кольца диклофенака хорошо взаимодействуют с графитовыми и графеновыми структурами активированного угля за счет гидрофобных взаимодействий с фенильными группами. Небольшие параметры молекулы диклофенака позволяют препарату хорошо проникать в микропоры сорбента в результате диффузии [7].

В работах ранее были изучены результаты сорбции диклофенака на активированных углях, полученных из шелухи айнкорна, кокосового ореха, древесины, косточек оливок, водорослей, косточек аргона, полиэтилена, графита [8-15].

Целью настоящего исследования является сравнительный кинетический анализ сорбции диклофенака, входящего в состав лекарственного средства «Вольтарен», на активированных образцах углерода, полученных карбонизацией рисовой шелухи кислотными и щелочными методами,

а также на образце из карбонизованного ксерогеля. Для анализа кинетических параметров сорбции были выбраны кинетическая модель псевд второго порядка, а также динамическая модель Томаса. Научная новизна настоящего исследования заключается в комплексном сравнительном анализе адсорбции диклофенака как в форме активной фармацевтической субстанции, так и в составе коммерческого лекарственного препарата в физиологически релевантных условиях (pH 7,4) на углеродных сорбентах, полученных из рисовой шелухи различными методами активации и образца ксерогеля.

2. Экспериментальная часть

2.1. Материалы

В статье исследовали препарат диклофенак в виде:

а) чистая активная фармацевтическая субстанция (АФС) – диклофенак натрия (2-[(2,6-дихлорфенил)амино]-бензолуксусная кислота, моноватриевая соль) от Cayman Chemical (США);

б) в составе лекарственного средства «Вольтарен» (капсулы пролонгированного действия) 50 мг.

Использованные в ходе активации углеродных образцов химические реактивы H_3PO_4 , HCl , HNO_3 , KOH , K_2CO_3 , а также буферные компоненты NaH_2PO_4 и Na_2HPO_4 были категории х.ч. (ТОО «Лабхимпром», г. Алматы).

2.2. Методика получения активированных углеродных сорбентов из рисовой шелухи

Активированные образцы углеродного сорбента из рисовой шелухи были получены методом химической активации.

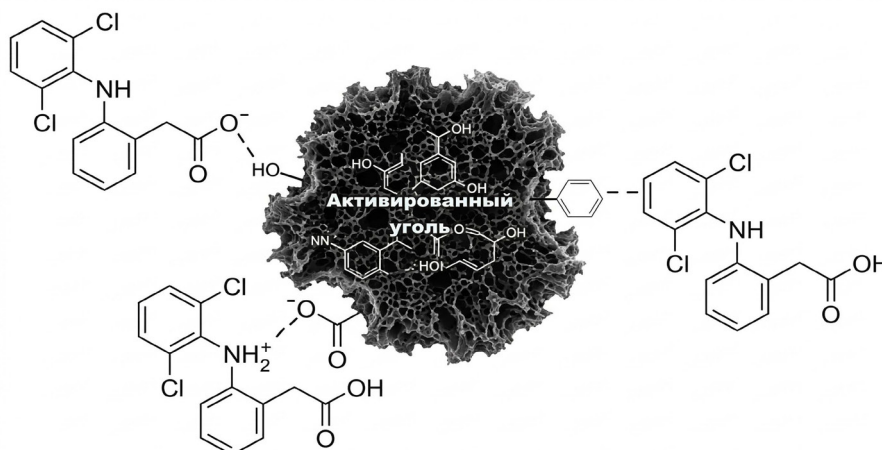


Рис. 1. Схема взаимодействия диклофенака с активированным углем.

Образец F-Na получали в две стадии. На первом этапе промытую рисовую шелуху карбонизовали при температуре 475 °С в течение 30 мин, а затем деминерализовали 1,5 М раствором соляной кислоты. На втором этапе деминерализованные образцы углерода подвергали окислительной активации концентрированной азотной кислотой при температуре 80-85 °С в течение 3 ч. После чего образцы промывали деминерализованной водой до достижения нейтрального pH [16].

Образец CRH-H₃PO₄ получали в три этапа. На первом этапе промытую рисовую шелуху смешивали с 85% фосфорной кислотой в массовом соотношении 1:2 и проводили предварительную карбонизацию при температуре 200 °С в течение 12 ч. После карбонизации температуру повышали до 450-500 °С и проводили процесс активации в течение 1 ч. На последнем этапе активированные образцы промывали водой до нейтрального pH и затем проводили обесшламливание материала 1 М раствором гидроксида натрия. Наконец, образец промывали кипящей деионизированной водой до достижения pH 7-8 и сушили при 105 °С в течение 12 ч [17].

Образец CRH-K₂CO₃ получали в три этапа. На первом этапе проводили карбонизацию и деминерализацию рисовой шелухи по аналогии с образцом F-Na. На втором этапе карбонизированные образцы смешивали с карбонатом калия в массовом соотношении 1:4 и проводили активацию в инертной атмосфере аргона при 950 °С на протяжении 1 ч. После охлаждения сорбент промывали 12% раствором KOH для обесшламливания, а затем дистиллированной водой до достижения pH ~7,0 [18].

Образец CRH-KOH получали аналогичным методом, как и образец CRH-K₂CO₃. Отличие заключается в том, что активирование проводили щелочью (KOH) при 850 °С на протяжении 2 ч. Этапа обесшламливания при такой активации не требуется.

Для получения образца CX5.8 сначала готовили раствор ксерогеля. Водно-органический гель синтезировали путем поликонденсации резорцина с формальдегидом в воде. Резорцин (99%) производства VWR International EuroLab S.L. (Барселона, Испания) сначала растворяли в деионизированной воде в герметичной колбе при магнитном перемешивании. Формальдегид (растворитель: 37 мас.% воды и 10-15 мас.% метанола) добавляли в смесь при магнитном перемешивании и выдерживали при перемешивании до получения однородного раствора. Гель синтезировали с использованием молярного соотношения резорцина к

формальдегиду, равного стехиометрическому значению (0,5), и фиксированного коэффициента разбавления, равного 5,7.

Раствор помещали в печь при температуре 85 °С на 72 ч для гелеобразования и выдержки. Полученный гель затем высушивали выпариванием без какой-либо предварительной обработки в той же печи при температуре 150 °С в течение 24 ч. После сушки гель подвергали пиролизу в трубчатой печи в потоке азота при температуре 800 °С с применением следующей программы нагрева: 1) медленное повышение температуры от 1 до 150 °С и далее прогрев в течение 15 мин; 2) нагрев до температуры 400 °С с последующей выдержкой в течение 60 мин; 3) повышение температуры до 800 °С с последующей выдержкой в течение 120 мин; 4) медленное охлаждение до комнатной температуры. Полученный образец был обозначен как CX5.8 [19].

Сорбционные характеристики всех углеродных сорбентов, такие как удельная поверхность, общий объем пор, объем микро/мезопор, рассчитывали на основании изотерм адсорбции азота при -196 °С по методу БЭТ. Изотермы адсорбции получали на приборе «Сорбтометр-М».

2.3. Метод изучения сорбции диклофенака на углеродных образцах

Были приготовлены исходные растворы диклофенака натрия и препарата «Вольтарен» с концентрацией АФС 2,5 г/л в фосфатном буфере (NaH₂PO₄/Na₂HPO₄, pH ~7,4). Данное значение соответствует физиологическим условиям тонкого кишечника (pH 7-8), где преимущественно происходит всасывание диклофенака в организме человека. Указано, что при pH 7,4 диклофенак находится преимущественно в анионной форме (учитывая значение pK_a), что позволяет моделировать реальные условия энтеросорбции [20].

Эксперименты в статических условиях проводились в конической колбе из полипропилена объемом 50 мл. Колбы с плотно закрытыми крышками содержали по 80 мг адсорбента и 40 мл раствора адсорбата требуемой концентрации. Растворы с адсорбентом перемешивали со скоростью 150 об/мин в орбитальном шейкере, выдерживали при температуре 37 °С; в определенные моменты времени жидкую и твердую фазы разделяли фильтрацией и/или центрифугированием. Для исследования кинетики адсорбции использовали растворы с начальной концентрацией 1000 мг/л и оценивали влияние времени

контакта на поглощение диклофенака при перемешивании по истечении 15, 30, 60, 90, 120, 240, 360 мин и далее свыше 50 ч.

Концентрацию диклофенака в фильтрате определяли с помощью УФ-спектрофотометра (Jenway 6705, Cole-Parmer, Великобритания) при длине волны 276 нм, используя калибровочную кривую, полученную в диапазоне от 0 до 85 мг/л. Все эксперименты проведены в трех повторах и результаты представлены в виде усредненных значений.

Для исследования адсорбционного равновесия растворы с различными концентрациями адсорбата готовили путем соответствующего разбавления исходного раствора. Для экспериментов по адсорбции было установлено время перемешивания в 24 ч, достаточное для достижения равновесия [21].

2.4. Кинетическая модель псевдвторого порядка

Модель псевдвторого порядка основана на равновесной адсорбции и определяется уравнением (1):

$$\frac{dq}{dt} = k_1 \cdot (q_e - q)^2 \quad (1)$$

где: q – адсорбционная емкость; t – время; k_1 – константа скорости адсорбции псевдвторого порядка; q_e – адсорбционная емкость в равновесии; q_t – адсорбционная емкость в момент времени t .

Интегрируя уравнение (1), применяя пределы $q = 0$ к $t = 0$ и $q = q_t$ к $t = t$, получим

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} \cdot t \quad (2)$$

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

Уравнение (2) выражено в линейной форме, в то время как уравнение (3) – в нелинейной, оба уравнения соответствуют модели псевдвторого порядка.

2.5. Статическая модель

Работа колонн с неподвижным слоем описывается на основе концепции, называемой кривой разрыва, где время работы и форма кривой являются ключевыми характеристиками, определяющими свойства адсорбционной колонны [22].

Кривая разрыва дает информацию, необходимую для определения количества адсорбата, удерживаемого сорбентом, которая представляется в виде зависимости нормализованной концентрации, определяемой как отношение концентрации на выходе к концентрации на входе (C/C_i), от времени или объема эфлюента при фиксированной высоте слоя. Объем эфлюента, обрабатываемого в колонне, может быть определен с помощью уравнения (4):

$$V_{ef} = Q \cdot t_s \quad (4)$$

где: V_{ef} – объем эфлюента до насыщения; Q – поток через колонну; t_s – время насыщения.

Площадь под кривой разрыва отражает производительность колонки или, что то же самое, общее количество адсорбата, удерживаемого в адсорбенте, при заданной концентрации на входе. Это слагаемое может быть определено интегрированием, как показано в уравнении (5).

$$q_{total} = Q \cdot \int_{t=0}^{t=t_s} C_R dt \quad (5)$$

где: q_{total} – общее количество удерживаемого адсорбата или емкость колонны; C_R – концентрация удерживаемого адсорбата.

Количество адсорбата в колонне можно рассчитать по уравнению (6).

$$m_{total} = C_i \cdot Q \cdot t_s \quad (6)$$

где: m_{total} – общее количество адсорбата, проходящего через колонну; C_i – концентрация адсорбата на входе.

Общий процент адсорбата, удерживаемого во время работы колонки, может быть рассчитан по уравнению (7).

$$\% \text{Retenido} = \frac{q_{total}}{m_{total}} \cdot 100 \quad (7)$$

При исследовании равновесной адсорбции в колонке необходимо знать адсорбционную способность и концентрацию адсорбата, остающегося в растворе при достижении равновесия, которые могут быть определены с помощью уравнений (8) и (9).

$$q_e = \frac{q_{total}}{m} \quad (8)$$

$$C_e = \frac{m_{total} - q_{total}}{V_{ef}} \quad (9)$$

где: q_e – адсорбционная емкость; q_{total} – общее ко-

личество удерживаемого адсорбата; m – количество адсорбента в колонке.

С помощью уравнения (10) можно рассчитать зону массопереноса (ZTM).

$$ZTM = Z \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_s}\right) \quad (10)$$

где: Z – высота колонки; t_r – время разрыва; t_s – время насыщения.

2.6. Кинетическая модель Томаса

Модель Томаса основана на кинетике второго порядка и предполагает, что адсорбция не ограничивается химической реакцией, а контролируется переносом вещества на границе раздела фаз [23]. Это наиболее часто используемая модель для описания процесса адсорбции в колонках с неподвижным слоем. Модель представлена уравнением (11).

$$\frac{C}{C_i} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{Th}}{Q} \cdot (q_0 \cdot m - C_i \cdot V_{ef})\right)} \quad (11)$$

где: C – концентрация адсорбата на выходе из колонны; C_i – концентрация адсорбата на входе; k_{Th} – константа скорости Томаса; Q – поток через колонну; q_0 – адсорбционная емкость в точке насыщения; m – масса адсорбента; V_{ef} – объем эфлюента до насыщения.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Поверхностные характеристики исследуемых образцов углерода

С целью соотношения кинетических параметров исследуемых образцов предварительно изучены поверхностные характеристики углеродных материалов. Определены такие характеристики, как удельная поверхность $S_{БЭТ}$, объем микропор $V_{\text{микро}}$, объем мезопор $V_{\text{мезо}}$ и общий/суммарный объем пор V_{Σ} (табл. 1).

Согласно данным табл. 1, образец CRH-KOH характеризуется наибольшей удельной поверхностью, которая достигает 2610 м²/г, а наименьшим значением $S_{БЭТ}$ обладает образец CX5-8, полученный из ксерогеля. Наиболее пористыми являются образцы CRH-KOH и CX5-8, а у образца F-Na наименьший показатель – $V_{\Sigma} \sim 0,754$ см³/г. Образцы CRH-H₃PO₄, CX5-8 и CRH-K₂CO₃ обладают сравнимыми значениями микропор от 0,28 до 0,30 см³/г. Наибольший объем микропор $V_{\text{микро}}$ у образца CRH-KOH.

3.2. Исследование адсорбционных характеристик сорбентов в начальном промежутке времени

В связи с тем, что в качестве источника диклофенака выбраны два препарата, один из которых чистая АФС в виде натриевой соли диклофенака, а другой – лекарство «Вольтарен» в виде капсул, необходимо было оценить их сорбцию на сорбентах в начальном отрезке времени. Целью данных экспериментов было определить, как наличие дополнительных компонентов препарата «Вольтарен» влияет на сорбцию основной субстанции – диклофенака – углеродными сорбентами.

На рис. 2а показано как различные пористые углеродные материалы с размерами частиц 100–180 мкм адсорбируют чистый диклофенак при периодических исследованиях в течение 2 ч.

На рис. 2б показаны адсорбционные способности в периодических исследованиях адсорбции для пористых углеродов, отобранных с диклофенаком в капсулах «Вольтарен». В табл. 2 приведены результаты 2-часовой исследований адсорбции АФС в чистом виде, так и в составе препарата «Вольтарен», которые показывают очень схожие результаты. Это означает отсутствие значимого влияния других компонентов препарата «Вольтарен», входящих в лекарства, на процесс сорбции. Это объясняется тем, что: молекулы диклофенака обладают значительно меньшими размерами по сравнению с большинством вспомогательных ве-

Таблица 1. Поверхностные характеристики исследуемых углеродных материалов

Образец углерода	$S_{БЭТ}$, м ² /г	$V_{\text{микро}}$, см ³ /г	$V_{\text{мезо}}$, см ³ /г	V_{Σ} , см ³ /г
F-Na	975	0,197	0,557	0,754
CRH-H ₃ PO ₄	1402	0,297	1,110	1,407
CX5-8	670	0,280	1,440	1,720
CRH-K ₂ CO ₃	1151	0,281	0,629	0,910
CRH-KOH	2610	0,601	1,140	1,741

ществ (целлюлоза микрокристаллическая, крахмал, повидон); неорганические вспомогательные компоненты лекарственной формы имеют ограниченную способность проникать в микропоры углеродного сорбента (тальк, диоксид титана); адсорбция определяется преимущественно взаимодействием функциональных групп диклофенака с поверхностью углеродного материала. Таким образом, влияние вспомогательных веществ на процесс сорбции минимально, что подтверждено экспериментальными данными.

Как видно из табл. 2, наиболее высокой сорбционной емкостью по отношению к диклофенаку, как в чистой АФС, так и в составе препарата «Вольтарен», обладает образец CRH-KOH и достигает 956,45 и 926,32 мг/г, соответственно. Данный результат обусловлен высокими текстурными характеристиками данного углеродного образца ($S_{БЭТ}$, $V_{микро}$, $V_{мезо}$) среди изучаемых сорбентов. Наименьшим значением сорбционной емкости к диклофенаку, как и ожидалось, обладает образец F-Na. Так q_e для чистого АФС у образца F-Na составляет 270,26 мг/г. Образцы CRH- H_3PO_4 , CX5-8, CRH- K_2CO_3 продемонстрировали сопоставимые значения сорбционной емкости в пределах 300-

500 мг/г, что коррелирует с объемными показателями микропор указанных трех образцов (табл. 1). Как известно, микропоры отвечают за физическую сорбцию небольших органических молекул, а большой объем мезопор облегчает диффузию молекул во внутренние каналы и микропоры углеродного образца, тем самым повышают сорбционную емкость сорбента [23].

3.3. Исследование кинетических параметров модели псевдотортого порядка

Анализ изменения концентрации диклофенака в статических условиях показал, что линейные зависимости соотношения t/q_e от времени (уравнение 2) отлично коррелируют для всех пяти образцов углерода (рис. 3).

На рис. 3 и в табл. 3 показаны параметры 72-часовой кинетики для линейной модели псевдотортого порядка. Как можно заметить, коэффициент корреляции R^2 для всех образцов превышает 0,99, что указывает на то, что модель очень хорошо согласуется с экспериментальными данными – все точки отлично ложатся на прямую.

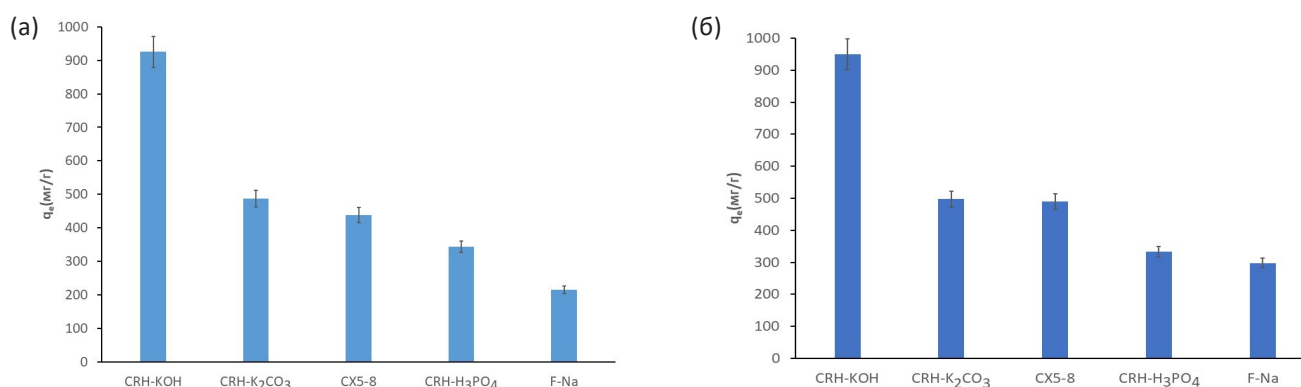


Рис. 2. Исследование сорбционной емкости образцов углеродных сорбентов: (а) чистого АФС натриевой соли диклофенака; (б) диклофенака в составе препарата «Вольтарен».

Таблица 2. Результаты адсорбции чистого диклофенака и препарата «Вольтарен», полученных в экспериментах продолжительностью 2 ч

Образец углерода	q_e (мг диклофенака/г углерода)	
	АФС диклофенак натрия	диклофенак в препарате «Вольтарен»
F-Na	270,26	185,33
CRH- H_3PO_4	306,10	309,61
CX5-8	484,15	388,51
CRH- K_2CO_3	489,54	452,32
CRH-KOH	956,45	926,32

По наклону прямой на рис. 3 (а-г) определяли максимальные значения адсорбционной емкости в равновесии q_e , а по отрезку на оси ординат – значения константы скорости адсорбции псевдодвухго порядка k_2 . Как видно из табл. 3, значения q_e после 72 ч контакта не сильно изменились от соответствующих значений, полученных при 2 ч (табл. 2). Что, возможно, говорит о наступлении адсорбционного равновесия на первых часах контакта сорбента с диклофенаком и достижения максимальной сорбции.

Константа скорости адсорбции псевдодвухго порядка указывает на скорость достижения адсорбционного равновесия, определяемую преимущественно химическими взаимодействиями (хемосорбцией) между сорбентом (углеродным образцом) и сорбатом (диклофенак). Чем выше

значение k_2 , тем быстрее сорбент поглощает вещество до достижения равновесной емкости (q_e) [24]. Сравнение значений k_2 показало, что для образца CRH-Н₃PO₄ данное равновесие достигается быстрее. Наименьшая скорость достижения равновесной емкости у образца F-Na.

На рис. 4 (а-г) и в табл. 4 показаны показатели адсорбционной емкости и параметры кинетики для нелинейной модели псевдодвухго порядка. Как видно, коэффициент корреляции R^2 во всех случаях, кроме одного (F-Na), превышает значения 0,9, что указывает на хорошее соответствие модели экспериментальным данным.

При нелинейной модели адсорбции значения q_e не сильно изменились от соответствующих значений, полученных при линейной модели сорбции. Однако имеются значительные измене-

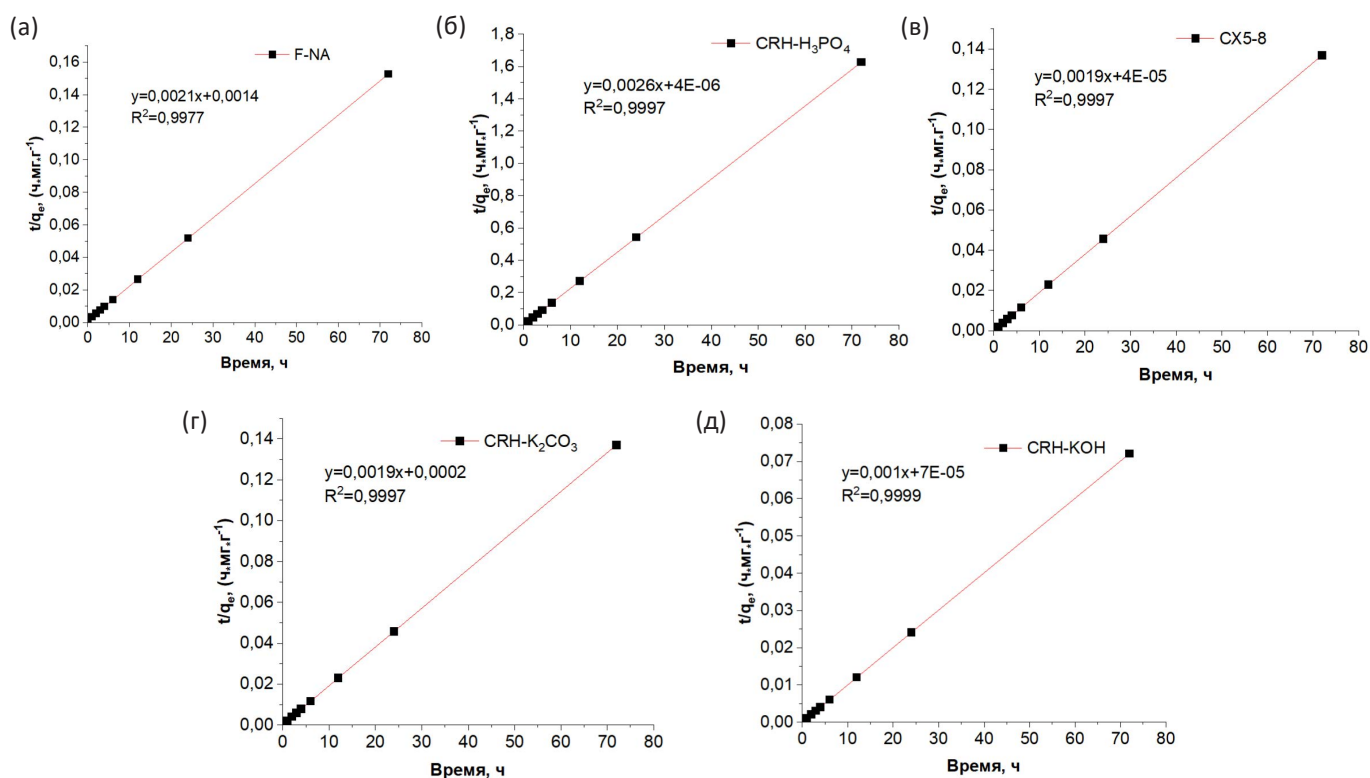


Рис. 3. Корреляция линейного уравнения кинетической модели сорбции АФС диклофенака псевдодвухго порядка на углеродных образцах.

Таблица 3. Параметры линейной модели адсорбции псевдодвухго порядка

Образец углерода	q_e (мг диклофенака/г углерода)	k_2 (г/(мг·ч))	R^2
F-Na	382,27	0,0028	0,9977
CRH-Н ₃ PO ₄	476,95	1,8891	0,9999
CX5-8	536,59	0,0131	0,9997
CRH-K ₂ CO ₃	536,28	0,0203	0,9999
CRH-KOH	989,14	0,0761	0,9999

ния в показателях k_2 . Так, для образца CRH-Н₃PO₄ данный показатель снизился более чем в два раза, а также отмечается значительное повышение константы скорости адсорбции псевдоторого порядка для образцов CRH-K₂CO₃, CX5-8.

Изменения значений k_2 связаны с особенностями линеаризации уравнения: в уравнении (3) параметр q_e находится в знаменателе во второй степени и по величине намного больше k_2 , вследствие чего систематические ошибки эксперимента могут нивелироваться за счет деления. Это также подтверждается лучшими показателями корреляции R^2 по сравнению со значением нелинейной модели.

Для оценки эффективности сорбентов при остром отравлении диклофенаком построены графики нелинейной модели для временных отрезков менее 1 ч (рис. 5).

Из рис. 5 (а-г) видно, что значения q_e всех образцов углерода, кроме F-течение 15-20 мин

от начала эксперимента. Это говорит о том, что образцы CRH-Н₃PO₄, CX5-8, CRH-K₂CO₃ и CRH-КОН являются отличными сорбентами при остром отравлении препаратом диклофенак.

Из рис. 5 (а-г) видно, что значения q_e всех образцов углерода, кроме F-Na, достигают максимального значения плато в течение 15-20 мин от начала эксперимента. Это говорит о том, что образцы CRH-Н₃PO₄, CX5-8, CRH-K₂CO₃ и CRH-КОН являются отличными сорбентами при остром отравлении препаратом диклофенак.

3.4. Исследование кинетических параметров модели Томаса

Для исследования на колонках с неподвижным слоем были выбраны те же образцы углерода, что и для статических моделей кинетики, с гранулометрической фракцией 0,100-0,180 мм. Различные параметры адсорбции на колонках с неподвижным слоем приведены в табл. 5.

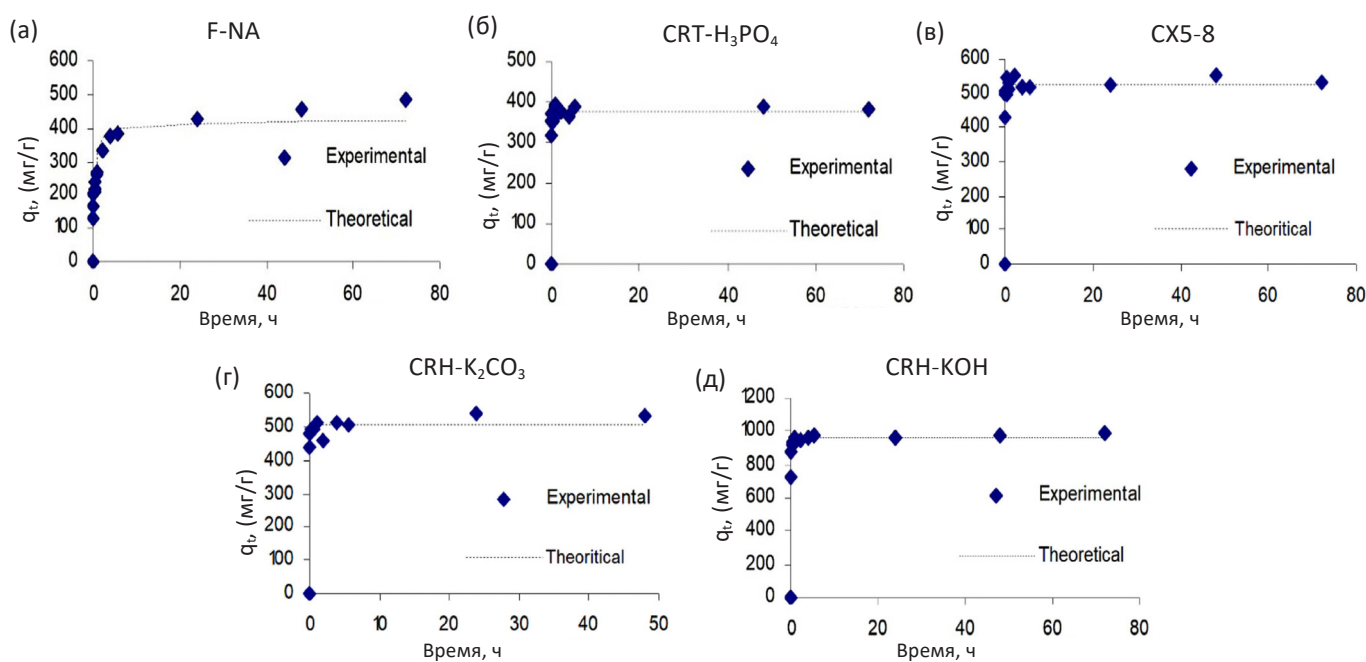


Рис. 4. Корреляция нелинейного уравнения кинетической модели сорбции АФС диклофенака псевдоторого порядка на углеродных образцах: (а) F-Na; (б) CRH-Н₃PO₄; (в) CX5-8; (г) CRH-K₂CO₃; (д) CRH-КОН.

Таблица 4. Параметры нелинейной модели адсорбции псевдоторого порядка

Образец углерода	q_e (мг диклофенака/г углерода)	k_2 (г/(мг·ч))	R^2
F-Na	377,66	0,0086	0,8961
CRH-Н ₃ PO ₄	419,18	0,7832	0,9893
CX5-8	526,31	0,5005	0,9850
CRH-K ₂ CO ₃	503,16	0,7412	0,9804
CRH-КОН	960,10	0,1754	0,9939

Отличительной характеристикой динамической модели колонки с неподвижным слоем является возможность оценки процента адсорбата, удерживаемого во время работы колонки (%R), который характеризует эффективность связывания диклофенака углеродными материалами и его удерживание без обратной десорбции в раствор. Как видно из данных табл. 5, самым эффективным углеродным сорбентом среди изученных образцов является образец CRH-KOH, который удерживает до 85,6% диклофенака и не позволяет адсорбату обратно диффундировать в рабочий раствор. Другие углеродные сорбенты, F-Na, RH- H_3PO_4 , CX5-8, CRH- K_2CO_3 , при данных экспериментальных условиях связывают лишь от 41 до 60% диклофенака. Хотя и данные показатели приемлемы для использования в качестве препаратов от острого отравления диклофенаком, учитывая, что разовая доза диклофенака для взрослых по данным центра экспертизы не должно превы-

шать значения 150 мг [25]. Табличные данные показывают, что значения q_{total} (общее количество удерживаемого адсорбата) сопоставимы с приведенными показателями или их превышают.

Модель Томаса основана на кинетике второго порядка и предполагает, что адсорбция не ограничивается только химической реакцией, а также управляется процессом переноса вещества через границу раздела фаз. Данная модель является наиболее часто используемым инструментом для описания адсорбционных процессов в системах с неподвижным слоем. В табл. 6 приведены параметры адсорбции диклофенака на углеродных образцах и видно, что все экспериментальные данные с корреляцией в 0,98 и более совпадают с рассчитанными.

Константа адсорбции Томаса (k_{Th}) – это кинетический параметр в модели, характеризующий скорость массопереноса адсорбата из жидкой фазы в твердую при динамической сорбции. Чем

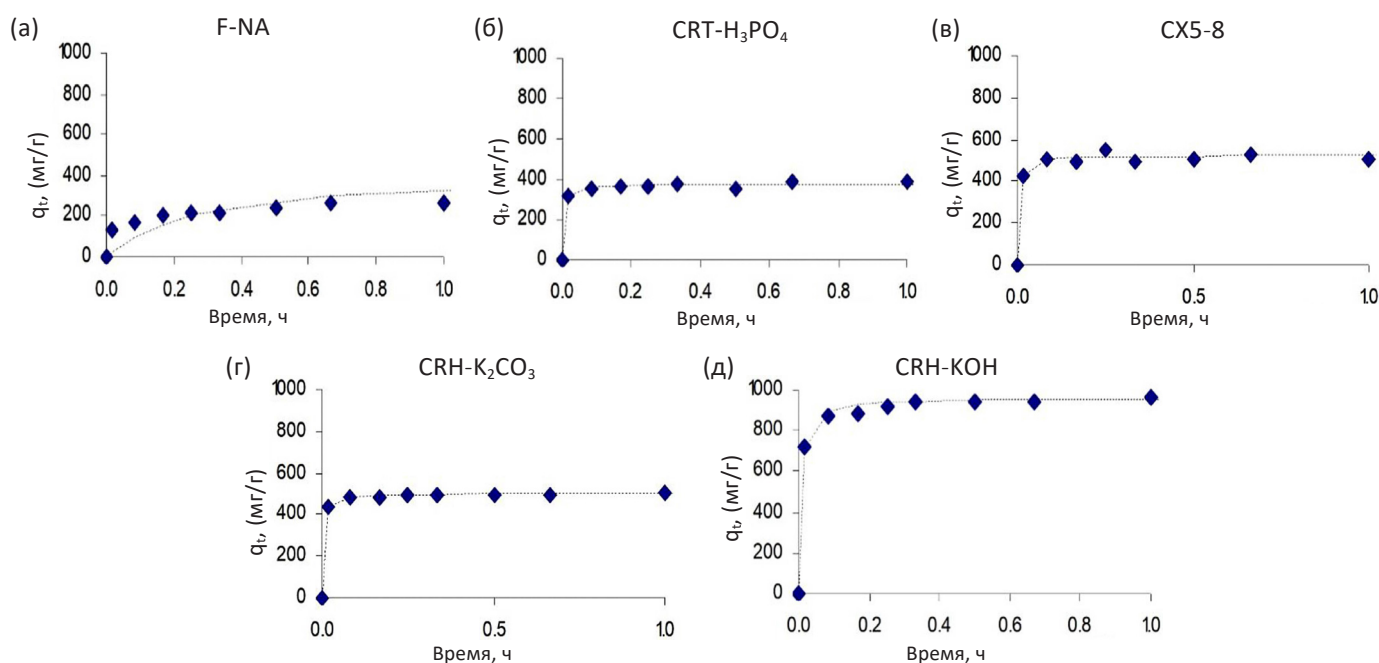


Рис. 5. Кинетические кривые адсорбции диклофенака на углеродных образцах (увеличенный масштаб) при нелинейной кинетической модели: а) F-Na; б) CRH- H_3PO_4 ; в) CX5-8; г) CRH- K_2CO_3 ; д) CRH-KOH.

Таблица 5. Параметры адсорбции диклофенака на колонках с неподвижным слоем

Образец	Условия проведения	Z (см)	t_r (мин)	t_s (мин)	V_{eff} (мл)	m_{total} (мг)	ZTM (см)	m_{ads} (мг)	q_{total} (мг·г ⁻¹)	%R
F-Na		3,2	21,3	152,0	455,9	42,4	2,75	17,4	174,2	41,0
CRH- H_3PO_4	$C_0 = 100\text{мг/л}$	2,1	17,6	185,6	556,8	52,7	1,30	31,6	310,6	59,9
CX5-8	$m_{\text{углерод}} = 0,1\text{ г}$	3,2	11,2	239,8	719,4	66,6	1,72	30,4	298,2	45,7
CRH- K_2CO_3	$T = 37\text{ °C}$	2,2	12,2	326,9	980,6	91,1	1,38	51,9	515,0	56,9
CRH-KOH	$Q = 3\text{ мл/мин}$	4	32,3	430,7	1292,2	119,3	0,99	102,1	1016,2	85,6

выше значение константы Томаса, тем быстрее сорбент поглощает адсорбат из раствора [26]. Основываясь на результатах табл. 6, можно сделать вывод о том, что в динамической модели сорбции наиболее быстро диклофенак сорбируется образцами CRH-Н₃PO₄, CRH-K₂CO₃ и CRH-KOH, k_{Th} образцов составляет от 0,644 до 0,694 мл/(мин·мг). Чуть меньшие значения констант Томаса у образцов F-Na и CX5-8.

Полученные в работе значения равновесной адсорбционной емкости сопоставимы или превышают показатели, приведенные в ряде современных исследований по адсорбции диклофенака на биомассовых активированных углях. В литературе для углеродных сорбентов на основе растительных отходов величины q_e обычно варьируются в диапазоне: -80-200 мг/г для стандартных активированных углей, до 250-300 мг/г – для материалов с высокой степенью KOH-активации [8-15]. Полученные в настоящем исследовании значения находятся в верхней части данного диапазона, что свидетельствует о высокой эффективности выбранной методики активации и оптимальной развитости микропористой структуры. Следует отметить, что многие опубликованные работы посвящены удалению диклофенака из водных систем при нейтральном pH, тогда как в данном исследовании процесс рассмотрен в физиологически релевантных условиях, что придает результатам дополнительную прикладную значимость.

4. Заключение

В настоящей работе проведен сравнительный анализ адсорбции диклофенака (в виде чистой АФС и в составе лекарственного препарата «Вольтарен») на пористых углеродных материалах, полученных различными методами химической активации рисовой шелухи, а также на синтетическом углероде из ксерогеля. Исследования выполнены в статических и динамических условиях с применением кинетической модели псевдвто-

рого порядка и модели Томаса.

Анализ текстурных характеристик показал, что наибольшей удельной поверхностью (S_{БЭТ} = 2610 м²/г) и развитой микропористостью обладает образец CRH-KOH, что предопределило его высокую адсорбционную активность. Между величинами S_{БЭТ}, объемом микропор и сорбционной емкостью установлена прямая корреляция: увеличение доли микропор способствует росту q_e за счет эффективной физической адсорбции молекул диклофенака и их диффузии в структуру углеродного материала.

В статических условиях максимальная сорбционная емкость достигнута для образца CRH-KOH (926-956 мг/г), что в 2-3 раза превышает показатели образцов F-Na и CRH-Н₃PO₄. При этом различия между сорбцией чистой АФС и диклофенака в составе препарата «Вольтарен» оказались незначительными, что свидетельствует об отсутствии выраженного влияния вспомогательных компонентов лекарственной формы на процесс адсорбции.

Кинетический анализ показал, что экспериментальные данные хорошо описываются линейной формой модели псевдвторого порядка (R² > 0,99), что указывает на существенный вклад хемосорбционного механизма взаимодействия между функциональными группами диклофенака и поверхностью углеродных материалов. Нелинейная модель также продемонстрировала удовлетворительную корреляцию (R² > 0,98 для большинства образцов), однако показала различия в значениях констант скорости, обусловленные математическими особенностями линеаризации.

Особенно важно, что для большинства образцов (CRH-Н₃PO₄, CX5-8, CRH-K₂CO₃ и CRH-KOH) равновесная емкость достигается в течение первых 15-20 мин контакта. Это указывает на их высокую эффективность при моделировании условий острого отравления, когда скорость связывания токсиканта является критическим параметром.

В динамических условиях (колонка с неподвижным слоем) наилучшие показатели проде-

Таблица 6. Параметры адсорбции диклофенака – модель Томаса

Образец	Условия проведения	k _{Th} (мл / (мин·мг))	q _{total} (мг/г)	R ₂
F-Na		0,402	162,3	0,992
CRH-Н ₃ PO ₄	C ₀ = 100мг/л	0,694	304,4	0,998
CX5-8	m _{углерод} = 0,1 г	0,470	464,3	0,989
CRH-K ₂ CO ₃	T = 37 °C	0,672	505,7	0,993
CRH-KOH	Q = 3 мл/мин	0,644	1016,2	0,998

монстрировал образец CRH-KOH: $q_{\text{total}} \approx 1016$ мг/г, %R = 85,6%, высокая корреляция модели Томаса ($R^2 = 0,998$).

Это свидетельствует о высокой эффективности удержания диклофенака и минимальной склонности к десорбции. Образцы CRH- H_3PO_4 и CRH- K_2CO_3 также показали хорошие кинетические параметры ($k_{\text{Th}} = 0,644\text{--}0,694$ мл/(мин·мг)), что подтверждает интенсивный массоперенос в динамическом режиме.

Сравнительный анализ статических и динамических данных демонстрирует согласованность результатов: образец CRH-KOH стабильно занимает лидирующее положение как по сорбционной емкости, так и по кинетическим параметрам. Это позволяет рассматривать его как наиболее перспективный материал для создания энтеросорбентов при острых интоксикациях диклофенаком.

Таким образом, полученные результаты подтверждают:

1. Определяющую роль микропористой структуры и удельной поверхности в сорбции диклофенака;

2. Адекватность модели псевдотортого порядка для описания кинетики процесса в статических условиях;

3. Высокую применимость модели Томаса для описания динамической адсорбции в колонках;

4. Перспективность щелочно-активированного углерода (CRH-KOH) как высокоэффективного сорбента для медицинских целей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных углеродных материалов на основе возобновляемой биомассы для создания эффективных средств детоксикации при передозировке нестероидными противовоспалительными препаратами.

Вклад авторов

Жакпар Жандосов: Идея, исследование, написание оригинального варианта, руководство проектом. **Айтуган Сабитов:** Идея, формальный анализ, написание оригинального варианта. **Зулхаир Мансуров:** Методология. **Альжан Байменов:** Методология, исследование. **Нуржамал Жылыбаева:** Валидация, формальный анализ. **Ерлан Досжанов:** Валидация. **Алмагуль Керимкулова:** Валидация. **Дмитрий Ченчик:** Исследование.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-

тересов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по проекту грантового финансирования AP23485436 «Разработка портативных гибридных фильтров для воды на основе модифицированных нанопористых углеродных монолитов сотовой структуры и криогелей, полученных из возобновляемой биомассы».

References

- [1]. J. Wendon, J. Cordoba, A. Dhawan, F.S. Larsen, M. Manns, et al. EASL Clinical Practical Guidelines on the management of acute (fulminant) liver failure. *Journal of Hepatology* 66 (2017) 1047-1081. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2016.12.003>.
- [2]. E. Björnsson, R. Olsson. Outcome and prognostic markers in severe drug-induced liver disease. *Hepatology* 42 (2005) 481-489. <https://doi.org/10.1002/hep.20800>.
- [3]. S. Roy, Z. Shah, G.S. Chakraborty. A brief overview of drug-induced liver damage. *The Egyptian Journal of Internal Medicine* 36 (2024) 56. <https://doi.org/10.1186/s43162-024-00315-7>.
- [4]. I. Mechnou, A. Benabdallah, A. Chham, Y. Rachdi, M. Hlaibi, et al. Activated carbons for effective pharmaceutical adsorption: Impact of feedstock origin, activation agents, adsorption conditions, and cost analysis. *Results in Engineering* 27 (2025) 105966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105966>.
- [5]. J. Jandosov, L. Mikhalovska, C. Howell, D. Chenchik, B. Kosher, et al. Synthesis, morphostructure, surface chemistry and preclinical studies of nanoporous rice husk-derived biochars for gastrointestinal detoxification. *Eurasian Chemico-Technological Journal* 19 (2017) 303-313. <https://doi.org/10.18321/ectj678>.
- [6]. C.Y. Teo, J.S.J. Jong, Y.Q. Chan, W. Oueslati. Carbon-based materials as effective adsorbents for the removal of pharmaceutical compounds from aqueous solution. *Adsorption Science & Technology* 2022 (2022) 3079663. <https://doi.org/10.1155/2022/3079663>.
- [7]. J. Lach, A. Szymonik. Adsorption of diclofenac sodium from aqueous solutions on commercial activated carbons. *Desalination and Water Treatment* 186 (2020) 418-429. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25567>.
- [8]. B. Kocabiyik, O. Üner, Ü. Geçgel. Diclofenac sodium adsorption in aqueous media by activated carbon

- obtained from einkorn (*Triticum monococcum* L.) husk. *Adsorption* 30 (2024) 1033-1046. <https://doi.org/10.1007/s10450-024-00479-2>.
- [9]. G.R. Medeiros, P.R. Lima, C.A. Melo Júnior, M.A. Barbosa, J.H.O. Nascimento, et al. Diclofenac sodium removal by powdered activated carbon of coconut endocarp: Process optimization, kinetics, and isotherms. *Water Practice & Technology* 19 (2024) 4906-4927. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.281>.
- [10]. C.S. Dias, M.A.E. Franco, E.C. Rodrigues, J.L. Ferreira, B.M. Viegas, et al. Diclofenac sodium adsorption on activated carbon: Experimental, modeling and Bayesian statistics. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 96 (2024) e20231110. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420231110>.
- [11]. S. Larous, A-H. Meniai. Adsorption of Diclofenac from aqueous solution using activated carbon prepared from olive stones. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2016) 10380-10390. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.096>.
- [12]. I. Liakh, A. Szewczyk, M. Prokopowicz, M. Narajczyk, A. Aksmann, et al. Investigations of Diclofenac Sorption on Intact and Modified *Chlorella vulgaris* Biomass with pH-Switchable Desorption. *International Journal of Molecular Sciences*. 27 (2026):1413. <https://doi.org/10.3390/ijms27031413>.
- [13]. B. Bouhcain, D. Carrillo-Peña, F. El Mansouri, Y. Ez Zoubi, R. Mateos, et al. Removal of Emerging Contaminants as Diclofenac and Caffeine Using Activated Carbon Obtained from Argan Fruit Shells. *Applied Sciences*. 12 (2022):2922. <https://doi.org/10.3390/app120629225>.
- [14]. Y. Zhang, Q. Ma, , Z. Chen, Y. Shi, S. Chen, et al. Enhanced adsorption of diclofenac onto activated carbon derived from PET plastic by one-step pyrolysis with KOH. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (2023) 113790-113803. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30376-0>.
- [15]. M. Cuccarese, S. Brutti, A. De Bonis. Removal of diclofenac from aqueous solutions by adsorption on thermo-plasma expanded graphite. *Scientific Reports* 11 (2021):3427. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83117-z>.
- [16]. A. Derylo-Marczewska, A. Swiatkowski, G. Trykowski, S. Biniak. The effect of oxidative modification of activated carbon on adsorption of aromatic compounds from aqueous solutions. *Molecules* 30 (2025) 3810. <https://doi.org/10.3390/molecules30183810>.
- [17]. J.M. Jandosov, Z.A. Mansurov, M.A. Bijsenbayev, M.I. Tulepov, Z.R. Ismagilov, et al. Synthesis of microporous-mesoporous carbons from rice husk via H_3PO_4 -activation. *Advanced Materials Research* 602 (2013) 85-89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.85>.
- [18]. J. Jandosov, D. Chenchik, A. Baimenov, J. Silvestre-Albero, M. Bernardo, et al. Assessment of phenolic and indolic compounds removal from aqueous media using lignocellulose-derived surface-modified nanoporous carbon adsorbents: A comparative study. *International Journal of Molecular Sciences* 27 (2026) 804. <https://doi.org/10.3390/ijms27020804>.
- [19]. F. Lufrano, P. Staiti, E.G. Calvo, E.J. Juárez-Pérez, J.A. Menéndez, et al. Carbon xerogel and manganese oxide capacitive materials for advanced supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science* 6 (2011) 596-612. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15019-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15019-X).
- [20]. J.E. Brinck, A.K. Sinha, M.F. Laursen, L.O. Dragsted, J. Raes, et al. Intestinal pH: a major driver of human gut microbiota composition and metabolism. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology* 22 (2025) 639-656. <https://doi.org/10.1038/s41575-025-01092-6>.
- [21]. J. Jandosov, M. Alavijeh, S. Sultakhan, A. Baimenov, M. Bernardo, et al. Activated carbon/pectin composite enterosorbent for human protection from intoxication with xenobiotics Pb(II) and sodium diclofenac. *Molecules* 27 (2022) 2296. <https://doi.org/10.3390/molecules27072296>.
- [22]. R.M.D. Fernandez, R.J.R. Estrada, T.R.B. Tomon, R.G. Jr. Dingcong, R.F. Jr. Amparado, et al. Experimental design and breakthrough curve modeling of fixed-bed columns utilizing a novel 3D coconut-based polyurethane-activated carbon composite adsorbent for lead sequestration. *Sustainability* 15 (2023) 14344. <https://doi.org/10.3390/su151914344>.
- [23]. M.J. Amiri, M. Khozaei, A. Gil. Modification of the Thomas model for predicting unsymmetrical breakthrough curves using an adaptive neural-based fuzzy inference system. *Journal of Water & Health* 17 (2019) 25-36. <https://doi.org/10.2166/wh.2019.210>.
- [24]. P. Lawtae, C. Tangsathikulchai. The use of high surface area mesoporous-activated carbon from longan seed biomass for increasing capacity and kinetics of methylene blue adsorption from aqueous solution. *Molecules* 26 (2021) 6521. <https://doi.org/10.3390/molecules26216521>.
- [25]. M. Kostoglou, T.D. Karapantsios. Why is the linearized form of pseudo-second order

- adsorption kinetic model so successful in fitting batch adsorption experimental data? *Colloids & Interfaces* 6 (2022) 55. <https://doi.org/10.3390/colloids6040055>.
- [26]. G.E. Swan, R. Cuthbert, M. Quevedo, R.E. Green, D.J. Pain, et al. Toxicity of diclofenac to Gyps vultures. *Biology Letters* 2 (2006) 279-282. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2005.0425>.

Сведения об авторах

Ж.М. Жандосов – к.х.н., Институт проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: jandosovj@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4397>

А.Ж. Байменов – к.х.н., Satbayev University, Алматы, Казахстан
E-mail: alzhan.baimenov@alumni.nu.edu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6509-2087>

А.Н. Сабитов – к.х.н., Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан
E-mail: aitugans@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3677-8685>

Е.О. Досжанов – доктор PhD, доцент кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию КазНУ им. аль-Фараби, ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: doszhanov_yerlan@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>

Д.И. Ченчик – к.х.н., Институт проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: dmitriychenichik@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-9982>

А.Р. Керимкулова – к.х.н., Satbayev University, Алматы, Казахстан
E-mail: almusha_84@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-4970>

Н.К. Жылыбаева – к.х.н., Институт проблем горения, ведущий научный сотрудник лаборатории нанобиотехнологии, Алматы, Казахстан
E-mail: icp30@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8047-916X>

З.А. Мансуров – д.х.н., профессор, научный руководитель Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: zmansurov@kaznu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-216X>

Adsorption of Voltaren on Porous Carbon Materials under Static and Dynamic Conditions

J.M. Jandosov^{1,2}, A.Zh. Baimenov^{1,3}, A.N. Sabitov^{1,4*}, Ye.O. Doszhanov^{1,2}, D.I. Chenchik¹, A.R. Kerimkulova^{1,3}, N.K. Zhylybayeva¹, Z.A. Mansurov^{1,2}

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbay Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan

³Satbayev University, Satpayev Str., 22, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol' Str., 114/1, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

The article investigates the adsorption of diclofenac (pure API and as part of the Voltaren preparation) on porous carbon materials obtained from rice husks by chemical activation methods (H_3PO_4 , K_2CO_3 , KOH), as well as on synthetic carbon from xerogel. A comparative assessment of the sorption capacity and the kinetics of the process was carried out under static and dynamic conditions. It was found that the KOH-activated sample ($S_{\text{БЭТ}} = 2610 \text{ m}^2/\text{g}$) has the highest microporosity and demonstrates the maximum adsorption capacity (up to 956 mg/g in static and up to 1016 mg/g in a column with a fixed layer). Kinetic data is well described by a pseudo second-order model ($R^2 > 0.99$), and dynamic adsorption is described by the Thomas model ($R^2 = 0.998$). This allows us to predict the efficiency of sorbents in flow systems. There was no significant effect of the auxiliary components of the dosage form on the sorption process. The established patterns indicate the predominant interaction of the diclofenac molecule with the microporous carbon matrix through π - π interactions and electrostatic effects. The results obtained confirm the prospects of alkaline-activated carbon materials based on biomass for the development of effective enterosorbents for intoxication with nonsteroidal anti-inflammatory drugs.

Keywords: diclofenac, porous carbon materials, rice husk, chemical activation, pseudo-second order model, static and dynamic model, Thomas model

Статикалық және динамикалық жағдайларда кеуекті көміртекті материалдарда Вольтарен препаратының адсорбциясы

Ж.М. Жандосов^{1,2}, А.Ж. Байменов^{1,3}, А.Н. Сабитов^{1,4*}, Е.О. Досжанов^{1,2}, Д.И. Ченчик¹, А.Р. Керимкулова^{1,3}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

³Satbayev University, Сәтбаев к., 22, Алматы, Қазақстан

⁴Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Гоголь к., 114/1, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Мақалада диклофенактың (таза БФС және "Вольтарен" препаратының құрамында) күріш қабығынан химиялық активтендіру әдістерімен (H_3PO_4 , K_2CO_3 , KOH) алынған кеуекті көміртекті материалдарға, сондай-ақ ксерогельден алынған синтетикалық көміртекке адсорбциясы зерттелді. Статикалық және динамикалық жағдайларда сорбциялық сыйымдылық пен процестің кинетикасын салыстырмалы бағалау жүргізілді. КОН-пен ($S_{\text{БЭТ}} = 2610 \text{ m}^2/\text{г}$) белсендірілген үлгінің ең үлкен микрокеуектілігі бар және максималды адсорбциялық сыйымдылық көрсетеді (статикада 956 мг/г дейін және стационарлық қабаты бар бағанда 1016 мг/г дейін). Кинетикалық деректер жалған екінші ретті модельмен жақсы сипатталады ($R^2 > 0,99$), ал динамикалық адсорбция Томас моделіне сәйкес келеді ($R^2 = 0,998$). Бұл ағынды жүйелердегі сорбенттердің тиімділігін болжауға мүмкіндік береді. Дәрілік форманың қосалқы компоненттерінің сорбция процесіне айтарлықтай әсері анықталған жоқ. Белгіленген заңдылықтар π - π өзара әрекеттесуі және электростатикалық әсерлер арқылы диклофенак молекуласының микрокеуекті көміртегі матрицасымен басым әрекеттесуін көрсетеді. Нәтижелер стероидты емес қабынуға қарсы препараттармен интоксикация кезінде тиімді энтеросорбенттерді әзірлеу үшін сілтілі белсендірілген биомасса негізіндегі көміртекті материалдардың перспективасын растайды.

Түйін сөздер: диклофенак, кеуекті көміртекті материалдар, күріш қабығы, химиялық активтендіру, жалған екінші ретті модель, статикалық және динамикалық модель, Томас моделі