

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»

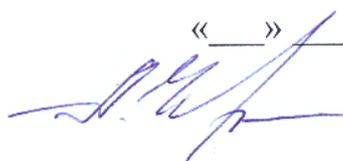
Факультет физико-математических и естественных наук  
Кафедра физической и коллоидной химии

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой физической и коллоидной химии

д.х.н., профессор А.Г. Чередниченко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.



**Курсовая работа на тему:**

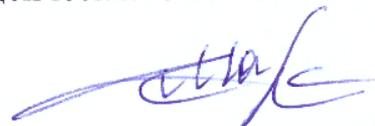
«Сравнение адсорбционной способности активированных углей различных марок по отношению к ЛОС»

04.03.01 - «Химия»

Выполнила

Студент группы НХ-Мбд-01-20

Студенческий билет № 1032201209



Крутая Мария

Руководитель

д.х.н., зав. кафедры физической химии

Чередниченко Александр Генрихович

г. Москва 2023г.



ЗБ(А) опел

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Литературный обзор.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Структура, получение и свойства активированных углей .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Классификация активированных углей .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.1. Активный древесный дробленый уголь БАУ-А.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.2. Древесный активный уголь ДАК-5.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.3. Гранулированный активный уголь АГ-3.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Адсорбционная способность активированного угля .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Экспериментальная часть.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Исследуемые вещества, реагенты и оборудование .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Методика эксперимента по изучению адсорбции паров бутанола-1 активированными углями БАУ, АГ-3, ДАК-5 .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Обсуждение результатов.....</b>	<b>14</b>
<b>4. Выводы.....</b>	<b>29</b>
<b>5. Список литературы .....</b>	<b>30</b>

## Введение

Активная техногенная деятельность человека пагубно влияет на окружающую среду, серьезно загрязняя атмосферу планеты, водные ресурсы и почву [1]. В связи с экологической напряженностью проблема получения и поиска новых сорбентов и разработка новых сорбционных технологий, является актуальной. Поэтому в России и за рубежом создано большое количество государственных и международных организаций, целью которых является проведение природоохранных мероприятий, создание современных технологий очистки воды и воздуха от промышленных загрязнений [2].

Особый интерес представляют многотоннажные производства, такие как, например, предприятия лесоперерабатывающей, лесохимической, пищевой, нефтехимической и химической промышленности. Этот интерес объясняется двумя причинами. С одной стороны, технологии этих производств обременены значительными отходами, которые требуется утилизировать. С другой – используемые на этих предприятиях компоненты, природные соединения являются сырьем для получения различных сорбентов, причем уникальным сорбентом является древесный активированный уголь [3].

Активированный уголь — это результат обжига различных углеродсодержащих органических веществ (древесины, скорлупы орехов, маслин, других плодовых культур, каменноугольного кокса) с последующей его активационной обработкой. Полученное вещество содержит огромное количество пор и поэтому обладает очень большой удельной поверхностью на единицу массы и, как следствие, высокой адсорбцией.

В пористой структуре активированного угля осуществляется поглощение любых типов органических микропримесей за счет сил поверхностного взаимодействия. Именно наличие пор, их количество и размер влияют на адсорбционные свойства угля. Формирование структуры активного угля происходит в технологическом процессе его производства за счет использования определенного исходного сырья и режимов термообработки.

Активированный уголь имеет довольно широкую сферу применения в топливно-энергетической, нефте- и газоперерабатывающей, пищевой и медицинской промышленности. Он применяется в металлургической промышленности, используется в золотодобывающей отрасли и при получении редкоземельных металлов, таких, как молибден и уран. В химической промышленности активированный уголь применяется, как носитель при производстве катализаторов, а во многих реакциях сам может выступать в роли катализатора. Активированные угли также используются для решения вопросов охраны окружающей среды в качестве средства очистки вод от бытовых и промышленных загрязнений [4].

# 1. Литературный обзор

## 1.1. Структура, получение и свойства активированных углей

Активированный (или активный) уголь – это вещество с высоко развитой пористой структурой, которое получают из различных углеродсодержащих материалов органического происхождения, таких как древесный уголь, каменноугольный кокс, нефтяной кокс, скорлупа кокоса, грецкого ореха, косточки абрикоса, маслины и других плодовых культур, пластиковых и бытовых отходов [5].

Активный уголь имеет пористую структуру и поэтому обладает очень большой удельной поверхностью, вследствие чего проявляет высокие адсорбционные свойства. Именно высокие показатели пористости и низкая стоимость делают активированный уголь наиболее востребованным адсорбентом. Увеличение пористости активного угля происходит во время специальной обработки – активации, которая значительно увеличивает адсорбирующую поверхность.

В активированных углях по размеру различают макро-, мезо- и микропоры. В зависимости от размеров молекул, которые нужно удержать на поверхности угля, должен изготавливаться уголь с разными размерами пор. Для адсорбции в микропорах, соизмеримых по размерам с адсорбируемыми молекулами, характерен главным образом механизм объемного заполнения. Аналогично происходит адсорбция также в промежуточной области между микропорами и мезопорами. В этой области свойства микропор постепенно вырождаются, свойства мезопор усиливаются. Механизм адсорбции в мезопорах заключается в последовательном образовании адсорбционных слоев, которое завершается заполнением пор по механизму капиллярной конденсации. Микропоры особенно хорошо подходят для адсорбции молекул небольшого размера, а мезопоры - для адсорбции более крупных органических молекул. Определяющее влияние на структуру пор активированных углей оказывают исходное сырье, из которого их получают. Активные угли на основе скорлупы кокоса характеризуются большей долей микропор, а

активированные угли на основе каменного угля - большей долей мезопор. Большая доля макропор характерна для активированных углей на основе древесины. В активном угле, как правило, существуют все разновидности пор и дифференциальная кривая их распределения по размерам имеет 2–3 максимума [6].

В порах активного угля существует межмолекулярное притяжение, которое приводит к возникновению адсорбционных сил, действующих на молекулярном уровне. Эти силы вызывают реакцию, подобную реакции осаждения, при которой адсорбируемые вещества могут быть удалены из водных или газовых потоков. Молекулы удаляемых загрязнителей удерживаются на поверхности активированного угля межмолекулярными силами Ван-дер-Ваальса. Таким образом, активированные угли удаляют загрязнители из очищаемых веществ и сред. Химические реакции также могут возникать между адсорбируемыми веществами и поверхностью активированного угля. Эти процессы называются химической адсорбцией или хемосорбцией. Однако, в основном, именно процесс физической адсорбции происходит при взаимодействии активированного угля и адсорбируемого вещества. Хемосорбция широко применяется в промышленности для очистки газов, дегазации, разделения металлов, а также в научных исследованиях. Физическая адсорбция обратима, то есть адсорбируемые вещества могут быть отделены от поверхности и возвращены в их первоначальное состояние при определенных условиях. При хемосорбции, адсорбируемое вещество связано с поверхностью посредством химических связей, изменяя его химические свойства. Хемосорбция имеет не обратимый характер.

Процесс получения активированного угля можно свести к двум стадиям: карбонизация и активация. Для производства активированного угля используют печи различного типа и конструкции. Сначала углеродсодержащее сырье измельчают до размера частиц 3-5 см, затем подвергают карбонизации (пиролизу) - обжигу при высокой температуре в инертной атмосфере без доступа воздуха для удаления летучих веществ.

Однако, полученный карбонизированный уголь обладает плохими адсорбционными свойствами, поскольку размеры его пор невелики и внутренняя площадь поверхности очень мала. Поэтому карбонизат подвергают активации для получения специфической структуры пор и улучшения адсорбционных свойств. Сущность процесса активации состоит во вскрытии пор, находящихся в углеродном материале в закрытом состоянии. Также активный уголь получают термическим разложением синтетических полимеров [7]. Это направление является очень перспективным, т.к. позволяет получать уникальные сорбционные материалы.

Один из главных факторов, влияющих на способность продуктов к активированию, является доля выделяющихся летучих компонентов. Если эта доля очень мала, то активирование можно не проводить, т.к. эта стадия не приведет к существенному увеличению удельной поверхности. В качестве примера можно привести гранулированный активированный уголь АГ-3.

Далее активированный уголь охлаждают и подвергают предварительной сортировке и рассеву, где отсеивается шлам, затем в зависимости от необходимости получения заданных параметров, активированный уголь подвергают дополнительной обработке: отмывка кислотой, импрегнирование (пропитка различными химическими веществами), измельчение и сушка.

Обычный активированный уголь является химически активным соединением, которое способно к окислению кислородом воздуха, водяным паром, либо углекислым газом и озоном. Окисление в жидкой фазе проводят при помощи таких реагентов, как  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Сорбционные, а также другие свойства окисленного угля могут значительно отличаться от первоначального продукта [8]. Это связано с тем, что на поверхности окисленного угля образуется большое количество кислотных групп. Своими сорбционными свойствами уголь обязан пористой структуре частиц: площадь активированного угля резко увеличивается за счет огромного количества пор малых размеров. Адсорбция вещества происходит за счет образующихся водородных, ионных и межмолекулярных связей. Известно, что

адсорбционная способность активированного угля по отношению к разным веществам разная. АУ хорошо адсорбирует на себя большинство органических соединений и некоторых неорганических соединений. Однако соли легко подвергающиеся диссоциации (хлориды натрия, калия и другие), сильные кислоты и щелочи, ряд металлов (железо, калий, литий, натрий, магний) плохо адсорбируются активированным углем [9].

## **1.2. Классификация активированных углей**

В настоящее время в мире не принят единый стандарт классификации активированных углей. Поэтому при выборе активированных углей для тех или иных целей рассматривают их свойства: гранулометрический состав, объем и тип пор, природу и строение, наличие примесей и модификаторов.

Активированные угля классифицируют:

- по размеру пор (супермикропоры, микропоры, мезопоры, макропоры)
- по типу сырья (скорлупа орехов, бурый уголь, древесина, плодовые косточки, торф, каменный уголь, синтетические полимеры, органические отходы и другие продукты)
- по области применения (угли газового типа, рекуперационные угли, осветляющие угли)
- по форме (порошковые, гранулированные, дробленные)

Выбор марки активных углей для решения определенных задач проводится в результате анализа:

- гранулометрического состава;
- площади внутренней поверхности (объем пор);
- сорбционных свойств;
- природы, состава и содержания примесей;

- распределения пор по размерам.

Качественные характеристики активного угля регламентируются рядом государственных стандартов (ГОСТ). Промышленные предприятия часто производят активированный уголь в соответствии с разработанными и зарегистрированными техническими условиями (ТУ).

### **1.2.1. Активный древесный дробленый уголь БАУ-А**

Активированный уголь БАУ-А представляет собою пористый материал, который состоит в большей степени из углерода. Он обладает сильно развитой общей пористостью, широким диапазоном пор и значительной величиной удельной поверхности. Все эти характеристики дают возможность эффективного использования активированного угля БАУ-А для очистки жидких сред от широкого спектра примесей (от самых малых, соизмеримых с молекулами йода, до молекул жиров, масел, нефтепродуктов) [10].

### **1.2.2. Древесный активный уголь ДАК-5**

Активированный уголь ДАК – это широко востребованный адсорбент, изготовленный из древесного угля сырца согласно ГОСТ 6217-74. Этот сорбент активно используется в разных сферах народного хозяйства для очищения жидких сред. Активный уголь ДАК обладает уникальными свойствами, такими как высокая пористость, наличие открытых пор, что обуславливает его хорошую способность к сорбции. Отмечено, что этот материал может работать в качестве биологического фильтра, обеспечивая очистку водных сред от патогенных микроорганизмов.

### **1.2.3. Гранулированный активный уголь АГ-3**

Этот сорбент получают в виде гранул из каменноугольной пыли и связующих веществ методом обработки водяным паром при температуре 800-950°C. Благодаря своей структуре (микро- и макропоры) является универсальным для адсорбции различных соединений из жидких и газовых сред. Его используют в фильтрах и адсорберах в качестве фильтрующе-

сорбирующей загрузки. Обладает высокой механической прочностью. Активированный уголь АГ-3 может подвергаться термической регенерации с восстановлением исходных свойств при минимальных потерях массы [11].

### **1.3. Адсорбционная способность активированного угля**

Адсорбция — самопроизвольный процесс увеличения концентрации растворенного вещества у поверхности раздела двух фаз вследствие нескомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия на разделе фаз. Адсорбцию можно определить как процесс выравнивания химических потенциалов компонентов между поверхностью и объемом, приводящий к изменению концентрации на поверхности [12]. Адсорбция играет важную роль во многих природных и производственных процессах. Именно благодаря процессу адсорбции, выполняется первая стадия поглощения тех или иных веществ из окружающей среды клетками и тканями биологических систем, первые этапы взаимодействия ферментов с субстратом, осуществляются защитные реакции против токсичных веществ. Некоторые адсорбенты (например, активированный уголь, каолин) действуют, как лекарственные средства против отравления различными ядами, способствуя извлечению из организма опасных веществ.

Адсорбенты обычно обладают большой удельной поверхностью (от сотен до нескольких тысяч  $\text{м}^2/\text{г}$ ) [13]. На сегодняшний день процесс адсорбции является основой многих технологических операций и широко используется в промышленном производстве и научных исследованиях. К наиболее важным из них относятся: очистка, выделение и разделение различных веществ, адсорбционная газовая и жидкостная хроматографии. Активированный уголь является самым распространенным и широко применяемым адсорбентом в различных областях науки и техники. Чем больше поверхность твердого вещества (активного угля), тем выше его сорбционная емкость.

## **2. Экспериментальная часть**

### **2.1. Исследуемые вещества, реагенты и оборудование**

В ходе выполнения работы были использованы следующие вещества, реагенты и оборудование:

- Активированные угли марок БАУ, АГ-3, ДАК-5 российского производства;
- Бутанол-1 (бутиловый спирт) «Ч»;
- Эксикатор стеклянный с притертой крышкой;
- Сушильный шкаф с программируемым управлением «Binder»;
- Бюксы с притертой крышкой;
- Автоматические аналитические весы «Ohaus» с погрешностью измерений 0,0001 г.

### **2.2. Методика эксперимента по изучению адсорбции паров бутанола-1 активированными углями БАУ, АГ-3, ДАК-5**

В эксикатор объемом 3,0 литра заливали 250 мл бутанола-1 (бутилового спирта) и плотно закрывали его крышкой. Исследования проводили при комнатной температуре ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ). Образец активированного угля массой около 0,9 – 1,4 г взвешивали на аналитических весах, помещали в открытый бюкс и предварительно выдерживали 3 часа при температуре  $150^\circ\text{C}$  в сушильном шкафу при атмосферном давлении. Затем бюкс с образцом закрывали крышкой и охлаждали до комнатной температуры. Для проведения эксперимента в чистый бюкс помещали около 0,9-1,4 г высушенного образца активированного угля, закрывали бюкс крышкой и определяли общую массу на аналитических весах с точностью  $\pm 0,0001$  г., Затем открытый бюкс помещали в эксикатор с органическим растворителем на опорную решетку, избегая контакта с жидкой фазой, крышку эксикатора закрывали и начинали отсчет времени. Количество адсорбируемого растворителя в исследуемом активированном угле определяли гравиметрическим методом. Для этого через определенные интервалы времени эксикатор открывали, бюкс с образцом

закрывали крышкой, доставали из эксикатора и быстро взвешивали на аналитических весах. Полученный результат фиксировали, а бюкс с образцом опять помещали в эксикатор, открывали крышку и продолжали эксперимент. Последнее измерение, соответствующее состоянию равновесия, проводили через длительный промежуток (не менее 72 часов) времени после начала эксперимента.

Для расчета удельного количества адсорбированного вещества в расчете на 1 г сорбента (г/г) использовали формулу (1):

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (1)$$

где  $q_t$  – количество адсорбированного бутанола – 1, г/г;

$m_0$  и  $m_t$  – масса бюкса с АУ в начале эксперимента и в текущий момент времени, г.

Для проверки воспроизводимости полученных результатов некоторые эксперименты повторялись несколько раз. Во всех случаях наблюдалось хорошее совпадение полученных значений.

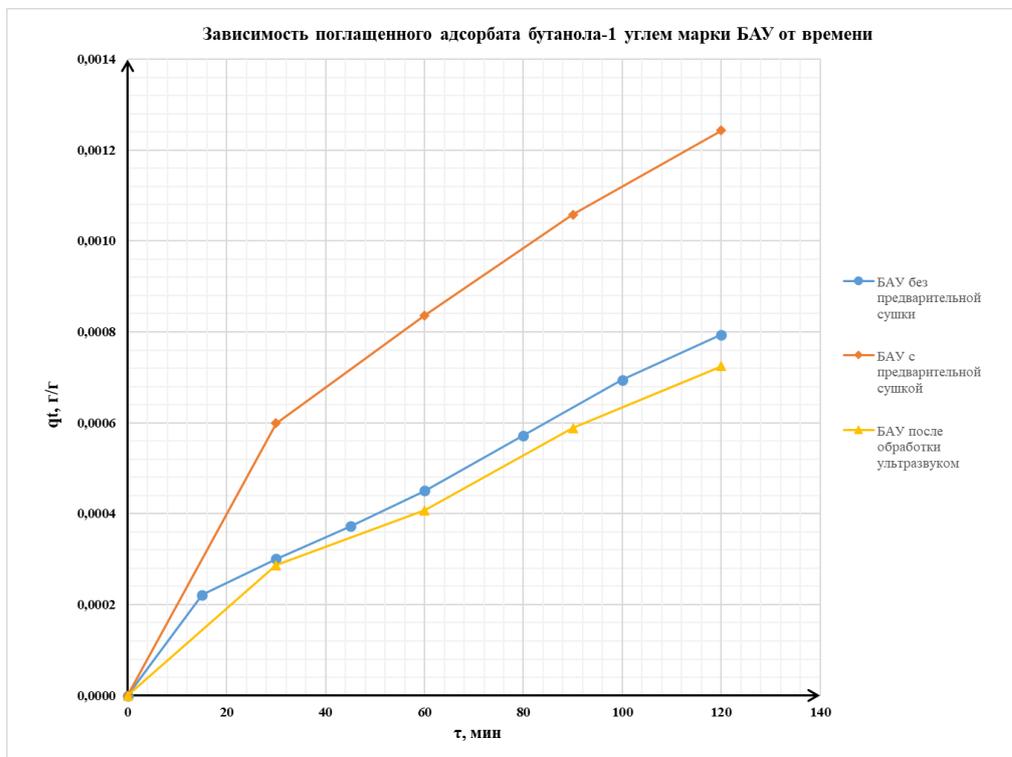


Рис. 1. Общий график кинетики адсорбции бутанола – 1 активированным углем марки БАУ при комнатной температуре.

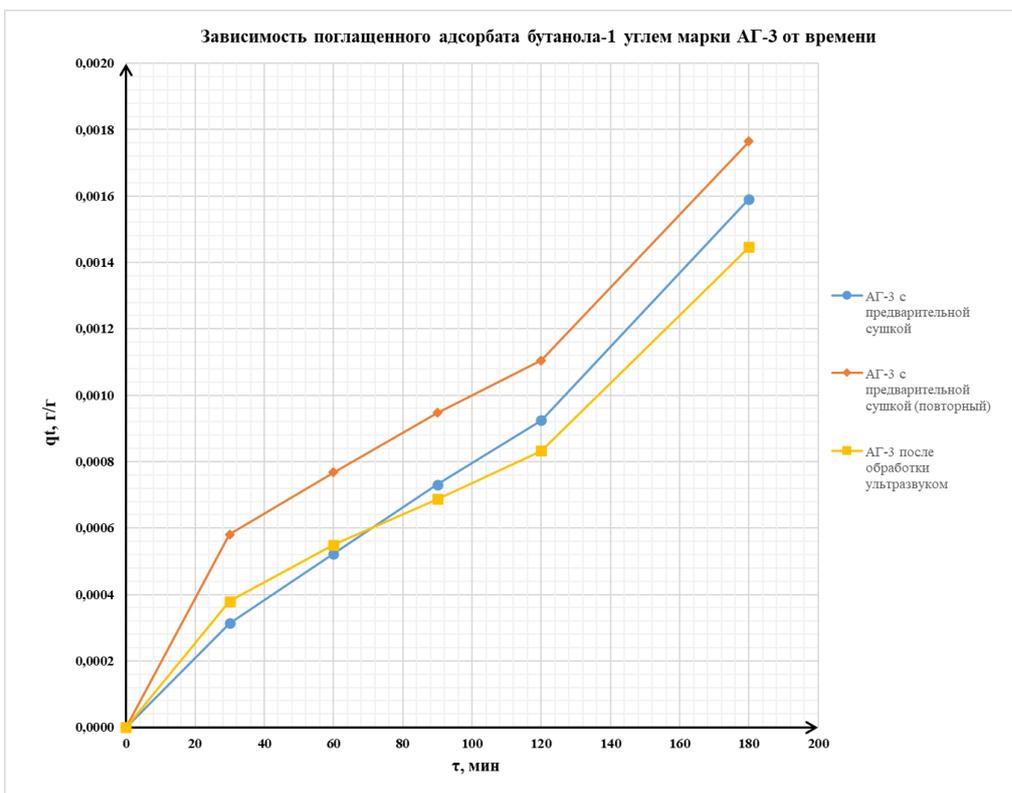


Рис. 2. Общий график кинетики адсорбции бутанола – 1 активированным углем марки АГ-3 при комнатной температуре.

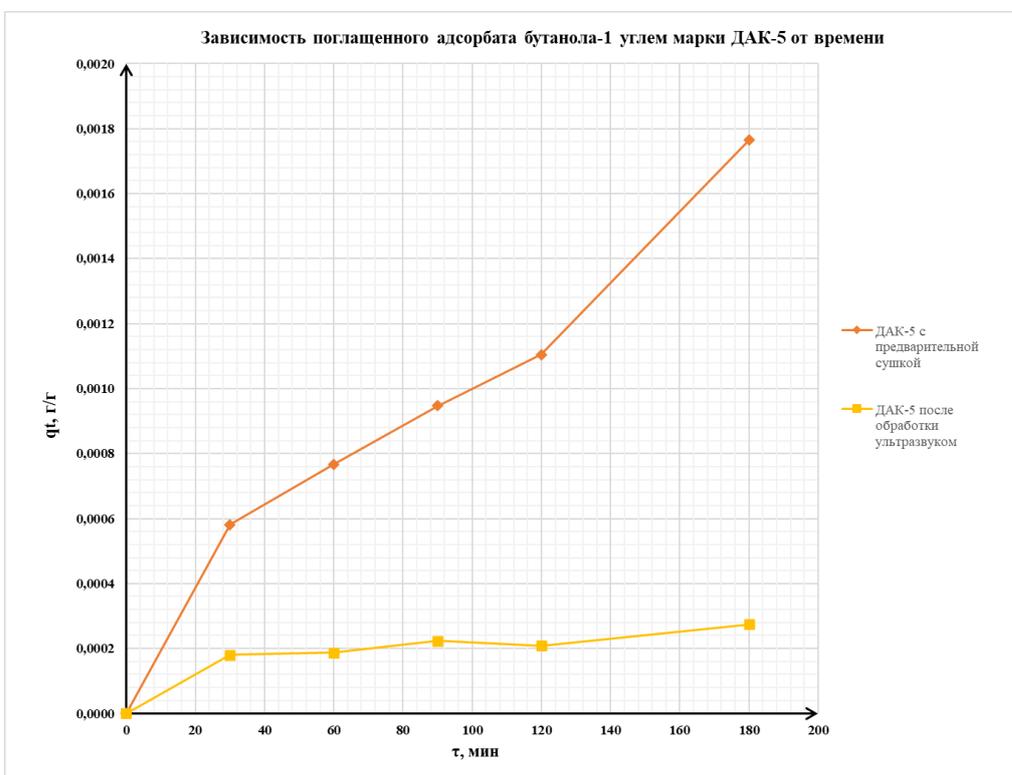


Рис. 3. Общий график кинетики адсорбции бутанола – 1 активированным углем марки ДАК-5 при комнатной температуре.

### 3. Обсуждение результатов

В ходе проведенных исследований был изучен процесс адсорбции паров бутанола–1 различными марками активированных углей отечественного производства. В таблице 1 приведены результаты определения максимальной удельной адсорбционной емкости использованных сорбентов по отношению к алифатическим спиртам при комнатной температуре.

Таблица 1. Результаты определения максимальной удельной сорбционной емкости активированных углей при температуре  $25\pm 1^\circ\text{C}$ .

<b>Марика активированного угля</b>	<b>Величина максимальной удельной сорбционной ёмкости для бутанола–1, г/г</b>
БАУ	0,01979
БАУ уз	0,00727
АГ-3	0,02407
АГ-3 уз	0,00883
ДАК-5	0,00172
ДАК-5 уз	0,00308

Из полученных результатов видно, что наибольшее значение удельной сорбционной емкости в отношении бутанола–1 наблюдалось для российского активированного угля марки АГ-3 (0,024 г/г), а наименьшее для активированного угля марки ДАК-5 (0,0017 г/г) отечественного производства. Полученный результат вполне закономерен и может быть объяснен высокими техническими характеристиками сорбента АГ-3, который в отличие от других марок производится не из древесины, а из продуктов угледобывающей промышленности. Наиболее близким к образцу АГ-3 по эффективности адсорбции паров бутанола–1 оказался уголь БАУ также российского производства (0,020 г/г).

По данным таблицы можно увидеть, что после обработки сорбентов ультразвуком их адсорбционная способность для всех образцов ухудшается. Это можно объяснить нарушением в количественном распределении пор по размерам, в результате деформации поверхности углей и перехода микропор в мезо- и макропоры, из-за чего снижается удельная поверхность активированного угля и его сорбционная способность.

Для изучения динамики процесса поглощения паров бутанола–1 различными углеродными сорбентами была исследована кинетика этого процесса. На основании полученных первичных кинетических данных была проведена их математическая обработка с использованием известных кинетических и диффузионных уравнений. Полученные результаты приведены в таблицах 2 – 11.

При описании кинетики адсорбции паров растворителя образцом активированного угля определенной марки использовали уравнение Лагергрена и уравнения Хо и Маккей моделей псевдопервого (2) и псевдовторого порядков (3) соответственно:

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - \frac{k_1}{2,303} \times t \quad (2)$$

где  $q_e$  и  $q_t$  – адсорбционная емкость в равновесии и в момент времени  $t$ , г/г;  $t$  – время, мин;  $k_1$  – константа скорости псевдопервого порядка, г/г×мин.

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

где  $q_e$  и  $q_t$  – удельная адсорбционная емкость в равновесии и в момент времени  $t$ , г/г;  $t$  – время, мин;  $k_2$  – константа скорости псевдовторого порядка, г/г×мин.

Для определения механизма процесса адсорбции применяли упрощенную модель уравнения Еловича (4) и уравнение Морриса-Вебера (5):

$$q_t = \frac{1}{\beta} \times \ln(\alpha \times \beta) + \frac{1}{\beta} \times \ln t \quad (4)$$

где  $q_t$  – удельная адсорбционная емкость в момент времени  $t$ , г/г;  $\beta$  – константа десорбции, г/г;  $\alpha$  – начальная скорость адсорбции, г/г×мин.

$$q_t = k \times t^{1/2} + C \quad (5)$$

где  $q_t$  – удельная адсорбционная емкость в момент времени  $t$ , г/г;  $t$  – время, мин;  $k$  – константа скорости диффузии уравнения Морриса-Вебера, г/г×мин<sup>1/2</sup>;  $C$  – константа сопротивления массообмену в пограничном слое [14].

Таблица 2. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола–1 активированным углем марки БАУ (без предварительной сушки).

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{г/г}$
0,0002		0,0197	0,9783
Псевдовторого порядка	$K_2, \text{г/г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{г/г}$	$R^2$
	6,5173	0,0014	0,8270
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,00008	0,0001	0,9723
Елович	$\alpha, \text{г/г} \times \text{мин}$	$\beta, \text{г/г}$	$R^2$
	0,000041	3333,3	0,9013

Таблица 3. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола–1 активированным углем марки БАУ (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
		$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{г/г}$

Псевдопервого порядка	0,0007	0,0153	0,9867
Псевдовторого порядка	$K_2, \text{ г/г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{ г/г}$	$R^2$
	0,6662	0,0050	0,6999
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,0002	0,0006	0,9543
Елович	$\alpha, \text{ г/г} \times \text{мин}$	$\beta, \text{ г/г}$	$R^2$
	0,000050	1111,1	0,8646

Таблица 5. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки БАУ после обработки ультразвуком (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1, \text{ мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{ г/г}$
	0,0009	0,0072	0,9885
Псевдовторого порядка	$K_2, \text{ г/г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{ г/г}$	$R^2$
	0,7176	0,0034	0,5042
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,0001	0,0004	0,9436
Елович	$\alpha, \text{ г/г} \times \text{мин}$	$\beta, \text{ г/г}$	$R^2$
	0,000299	163,9344	0,8640

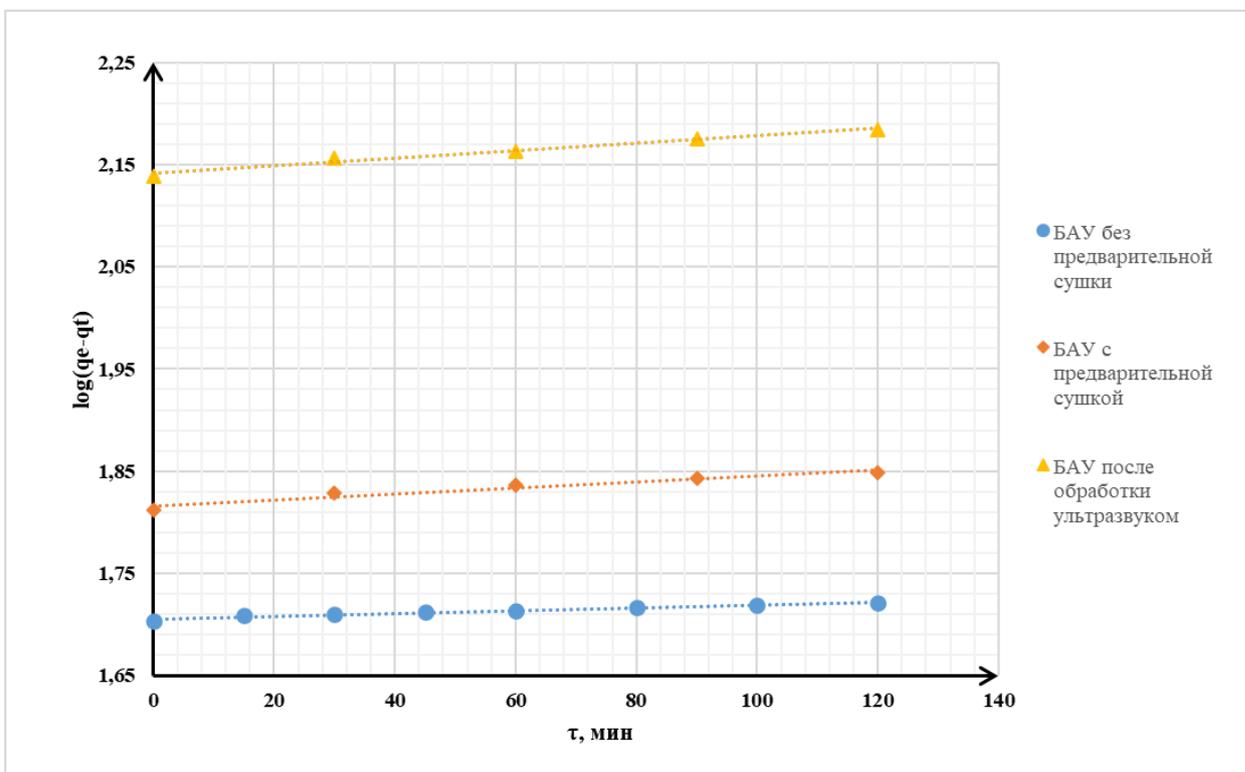


Рис. 4. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем БАУ в координатах уравнения псевдопервого порядка.

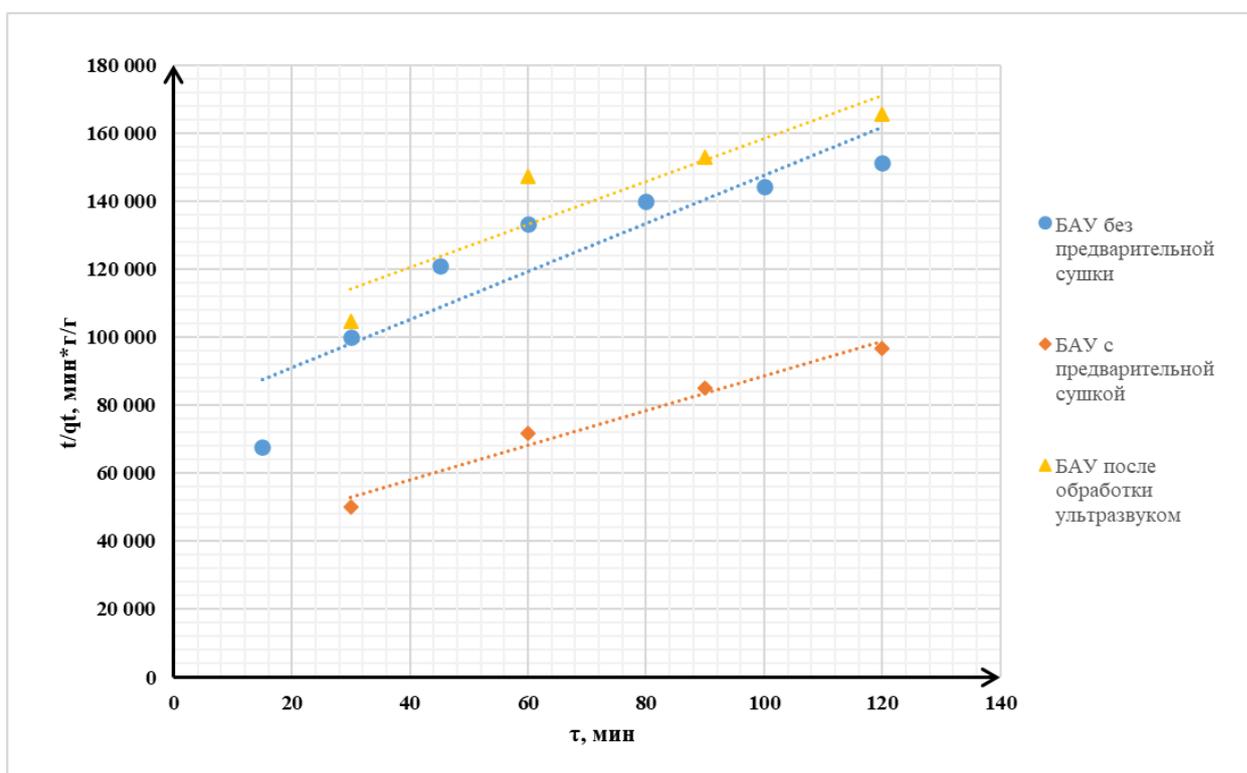


Рис. 5. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем БАУ в координатах уравнения псевдвторого порядка.

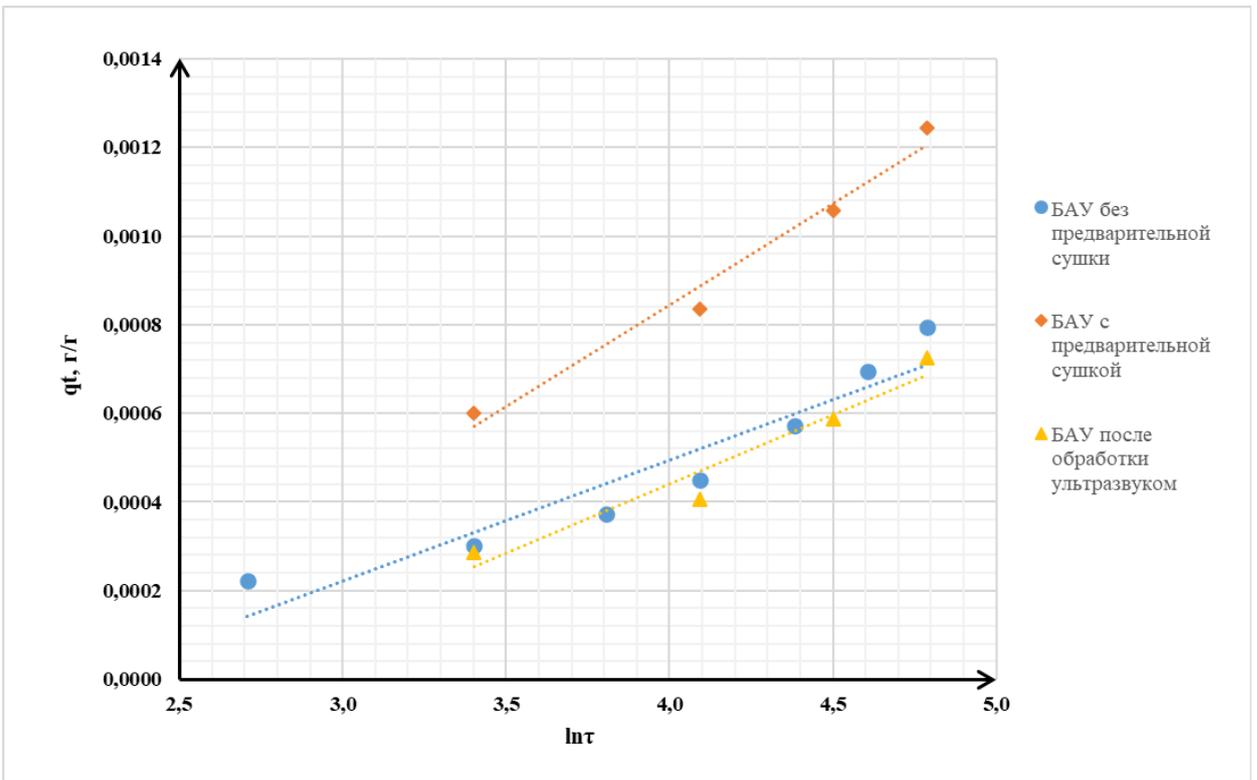


Рис. 6. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем БАУ в координатах уравнения Еловича.

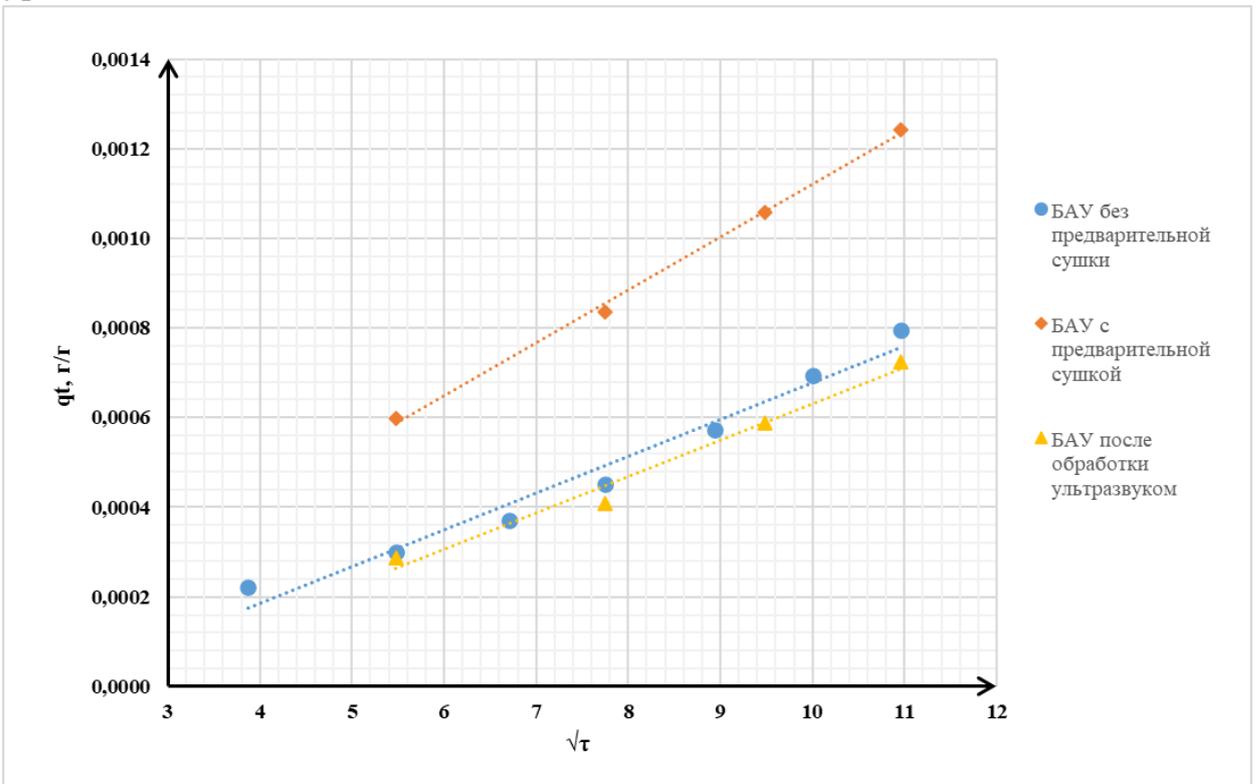


Рис. 7. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем БАУ в координатах уравнения Морриса-Вебера.

При использовании диффузионных моделей для описания этого процесса на угле марки БАУ было отмечено лучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных в случае применения уравнения псевдопервого порядка. Применение модели псевдовторого порядка для описания процесса адсорбции паров бутанола – 1 показало наихудшие результаты.

Аналогичный подход по обработке результатов первичного кинетического эксперимента был использован для описания процесса адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем АГ-3 российского производства. В этом случае лучшие результаты были получены также при использовании уравнения псевдопервого порядка. Высокий коэффициент корреляции свидетельствует о хорошем совпадении экспериментальных и расчетных данных.

Таблица 6. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки АГ-3 (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{Г/Г}$
	0,0005	0,0184	0,9863
Псевдовторого порядка	$K_2, \text{г/Г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{г/Г}$	$R^2$
	0,1094	0,0093	0,2318
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,0002	0,0007	0,9343
Елович	$\alpha, \text{г/Г} \times \text{мин}$	$\beta, \text{г/Г}$	$R^2$
	0,000035	1428,5714	0,8531

Таблица 7. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдвторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки АГ-3 (с предварительной сушкой) повторный.

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{г/г}$
0,0005		0,0240	0,9771
Псевдвторого порядка	$K_2, \text{г/г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{г/г}$	$R^2$
	0,4820	0,0056	0,4582
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,0002	0,0007	0,9130
Елович	$\alpha, \text{г/г} \times \text{мин}$	$\beta, \text{г/г}$	$R^2$
	0,000050	1111,1	0,8094

Таблица 8. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдвторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки АГ-3 после обработки ультразвуком (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{г/г}$
0,0009		0,0088	0,9695
Псевдвторого порядка	$K_2, \text{г/г} \times \text{мин}$	$q_e, \text{г/г}$	$R^2$
	1,0061	0,0033	0,4774
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$

	0,0001	0,0004	0,9009
Елович	$\alpha$ , г/г×мин	$\beta$ , г/г	$R^2$
	0,00002	2000,0	0,8107

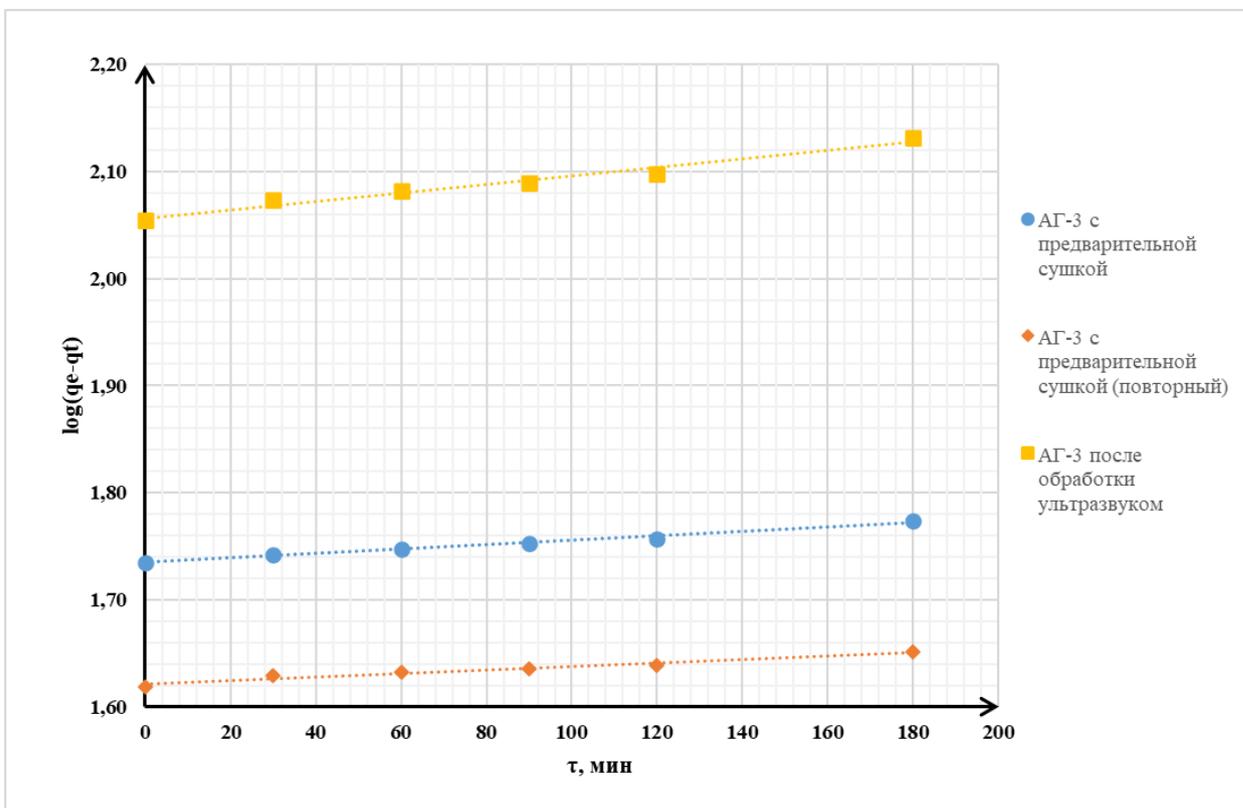


Рис. 8. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем АГ-3 в координатах уравнения псевдопервого порядка.

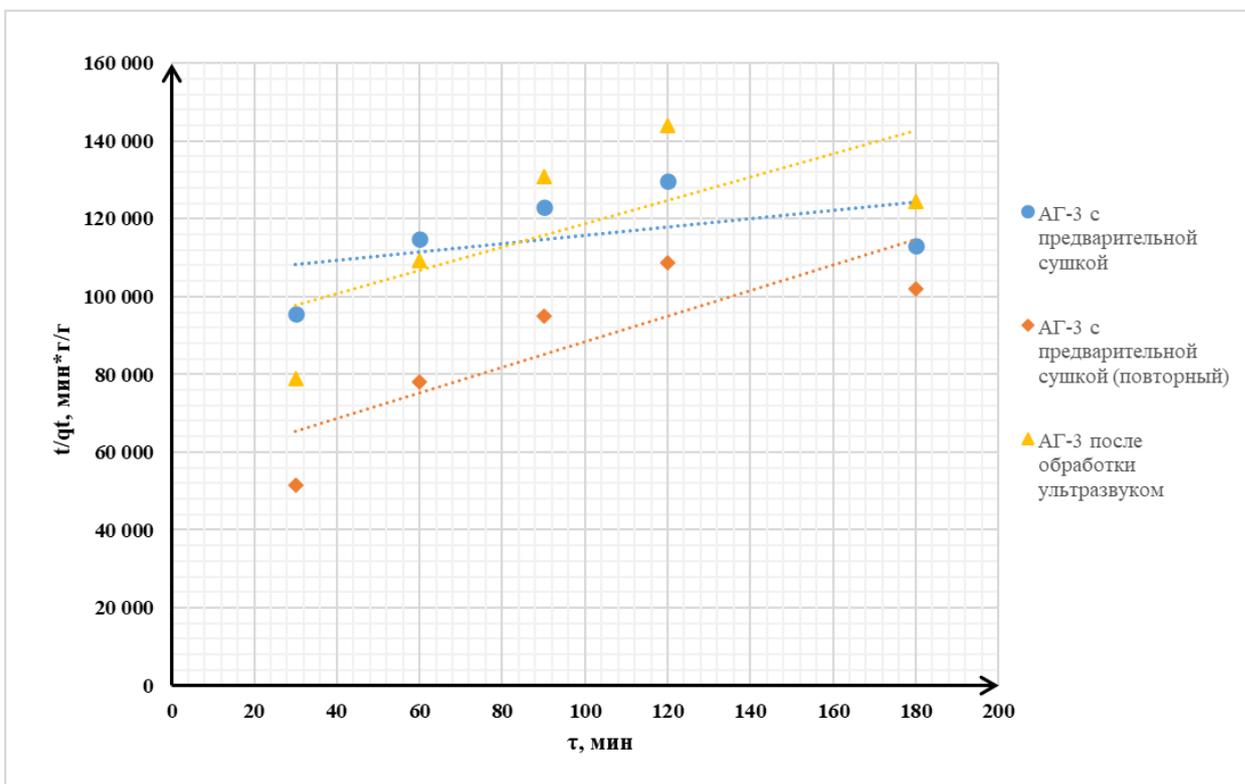


Рис. 9. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем АГ-3 в координатах уравнения псевдвторого порядка.

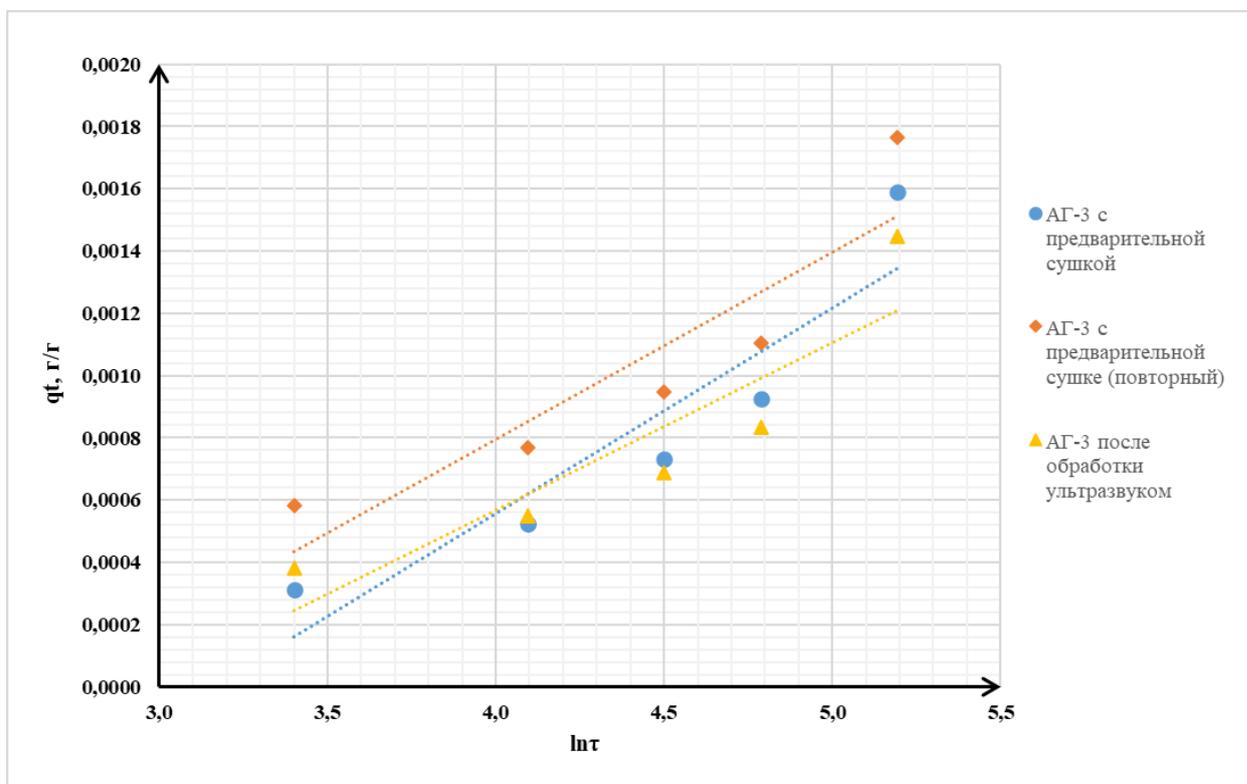


Рис. 10. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем АГ-3 в координатах уравнения Еловича.

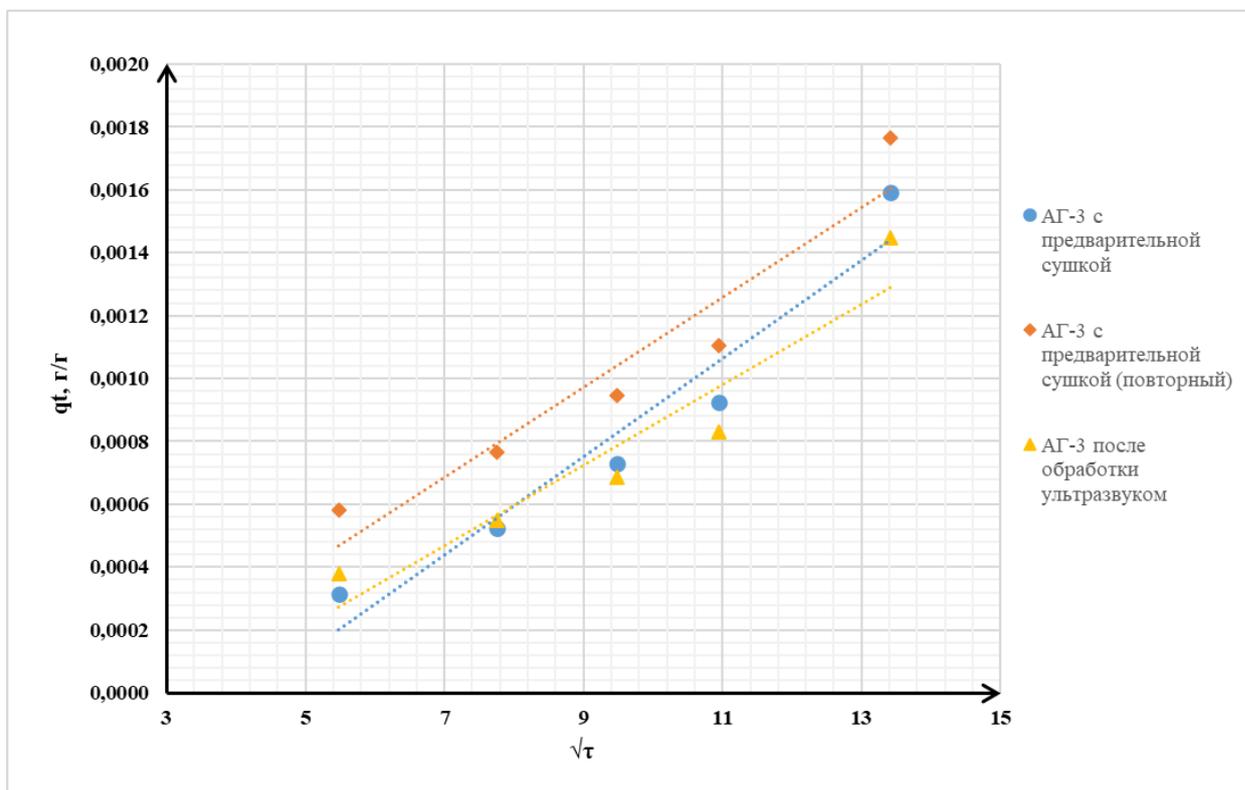


Рис. 11. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем АГ-3 в координатах уравнения Морриса-Вебера.

Для описания кинетики процесса адсорбции активированным углем марки ДАК-5 лучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных было отмечено в случае применения диффузионной модели Морриса-Вебера, если рассматривать эксперимент в целом. Для всех моделей показатели корреляции имеют приближенные к единице значения, а значит могут описание любой из моделей будет иметь низкую погрешность.

Таблица 10. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки ДАК-5 (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
	$K_1, \text{мин}^{-1}$	$q_{\text{равн}}, \text{Г/Г}$	$R^2$
Псевдопервого порядка	0,0012	0,0017	0,9959

Псевдовторого порядка	$K_2$ , г/г×мин	$q_e$ , г/г	$R^2$
	1,5691	0,0013	0,9582
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,00004	0,00010	0,9943
Елович	$\alpha$ , г/г×мин	$\beta$ , г/г	$R^2$
	0,000016	5000,0	0,9466

Таблица 11. Константы кинетических уравнений псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Морриса-Вебера и Еловича для адсорбции паров бутанола – 1 активированным углем марки ДАК-5 после обработки ультразвуком (с предварительной сушкой).

Название модели	Кинетические параметры		
	Псевдопервого порядка	$K_1$ , мин <sup>-1</sup>	$q_{равн}$ , г/г
0,0002		0,0030	0,7507
Псевдовторого порядка	$K_2$ , г/г×мин	$q_e$ , г/г	$R^2$
	54,4510	0,0004	0,9456
Моррис-Вебер	$K$	$C$	$R^2$
	0,00001	0,00009	0,9041
Елович	$\alpha$ , г/г×мин	$\beta$ , г/г	$R^2$
	0,000026	16666,7	0,8163

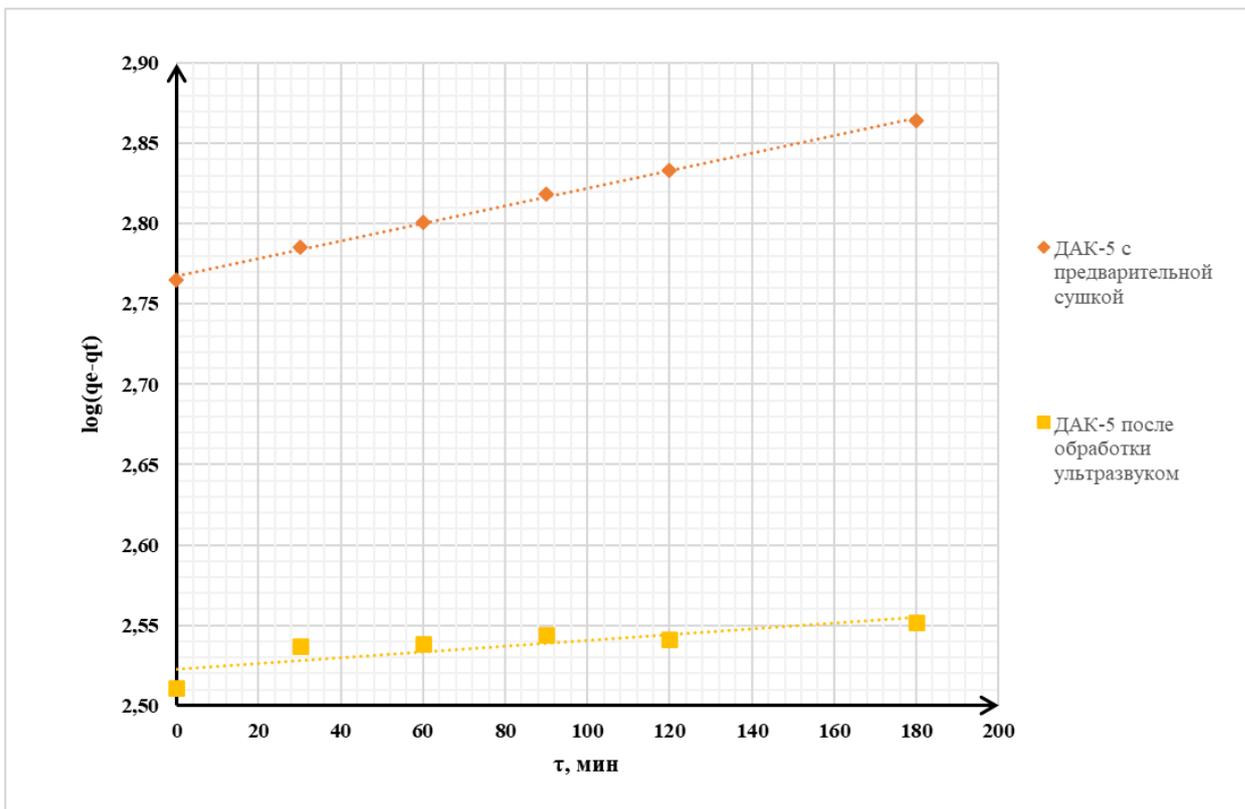


Рис. 12. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем ДАК-5 в координатах уравнения псевдопервого порядка.

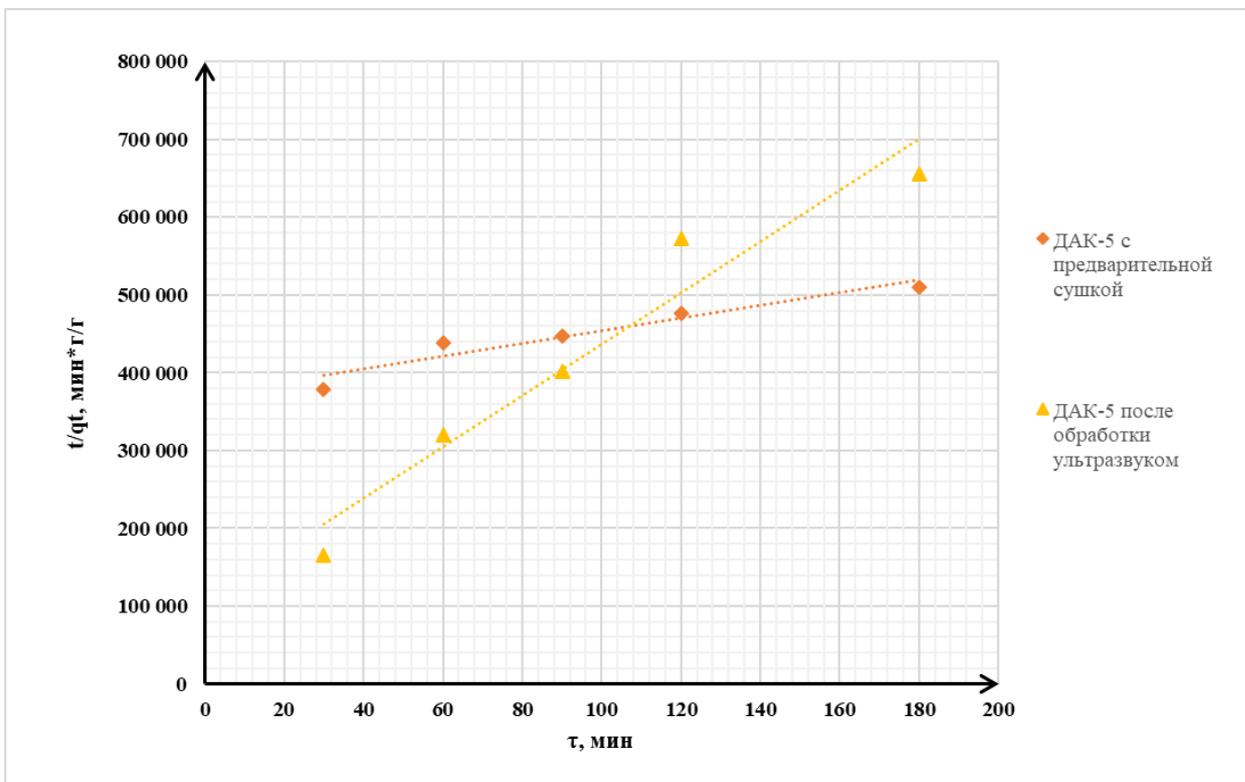


Рис. 13. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем ДАК-5 в координатах уравнения псевдовторого порядка.

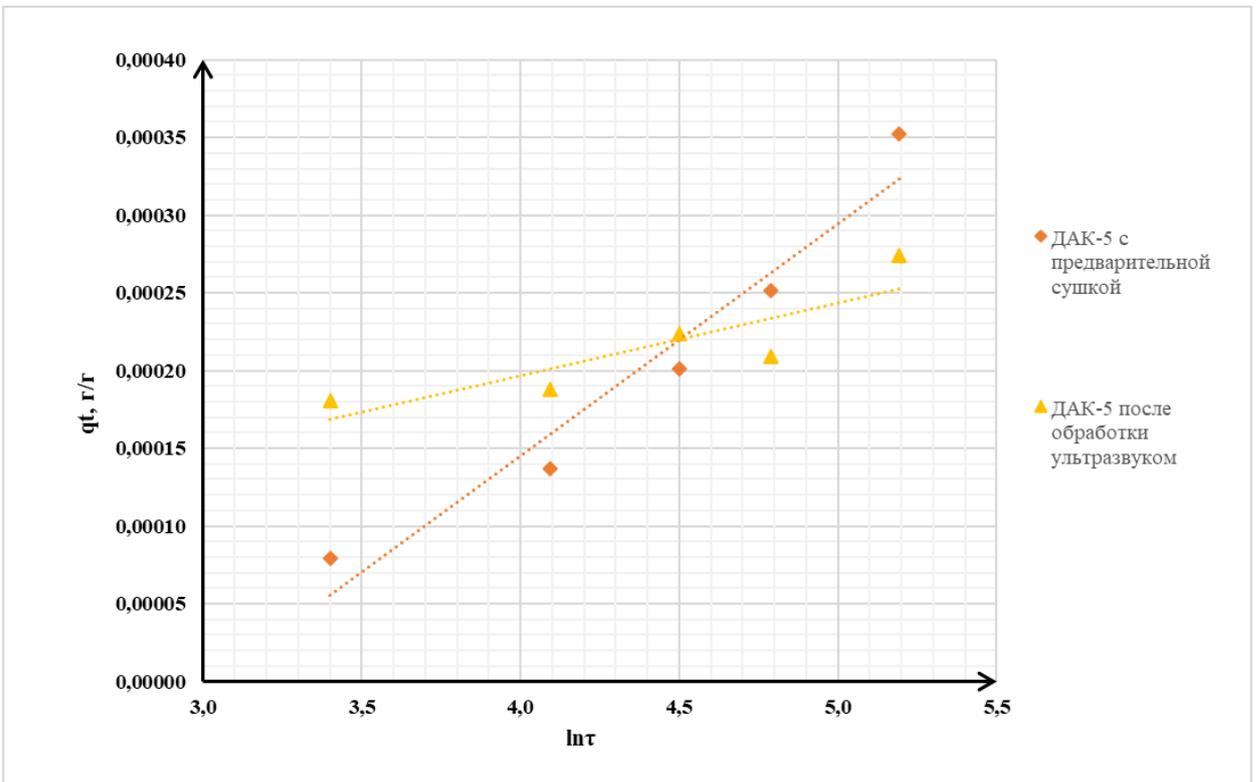


Рис. 14. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем ДАК-5 в координатах уравнения Еловича.

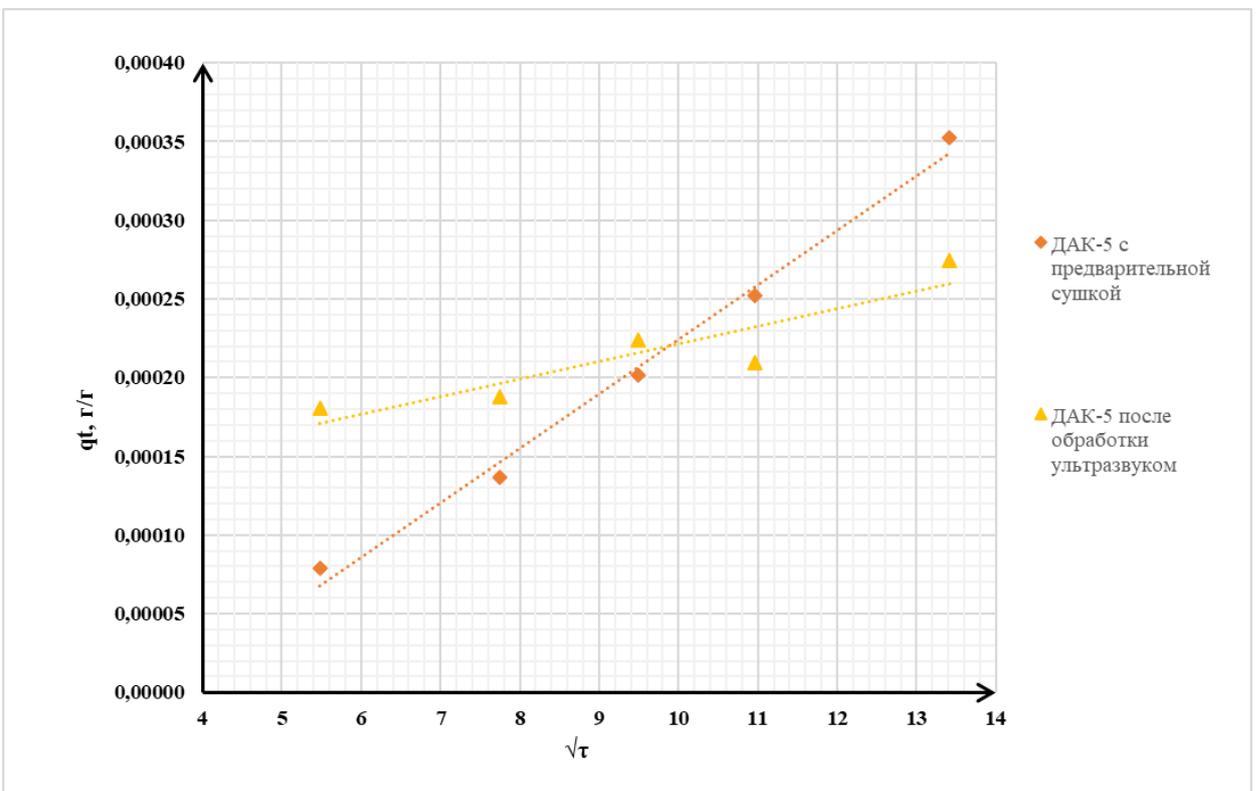


Рис. 15. Описание кинетики адсорбции бутанола – 1 углем ДАК-5 в координатах уравнения Морриса-Вебера.

В результате проведенных исследований было проведено изучение процесса адсорбции паров бутанола – 1 различными активированными углями российского производства. Кинетика процесса адсорбции бутанола – 1 во всех случаях хорошо описывается кинетическим уравнением псевдопервого порядка и диффузионной моделью Морриса-Вебера, что свидетельствует об идентичности механизмов исследованного процесса. Используемые уравнения не являются кинетическими, так как не относятся к химическим реакциям. Это формальная кинетика, переложенная на процесс адсорбции. Адсорбция паров протекает с лимитирующей стадией взаимодействия поверхности адсорбата с адсорбентом. Так же имеет место процесс диффузии. При этом разница в сорбционной емкости сорбентов объясняется различиями в их свойствах, связанных с величиной удельной поверхности и наличием микропор.

## 4. Выводы

1. В ходе выполнения работы был проведен анализ литературных данных по вопросам получения и применения активированных углей. Показано, что основные различия в сорбционных характеристиках активированных углей связаны с условиями их получения, которые влияют на величину удельной поверхности и распределение пор по размеру.
2. Определены значения сорбционной емкости активированных углей трех российских марок без обработки и после обработки ультразвуком (БАУ, АГ-3, ДАК-5).
3. Наибольшую удельную сорбционную емкость по отношению к бутанолу–1 в ходе проведенных исследований показал активированный уголь марки АГ-3; а наименьшую – российский сорбент ДАК-5.
4. Исследовано влияние ультразвуковой обработки на сорбционную способность активированных углей и показано, что для всех образцов сорбентов эффективность поглощения паров бутанола-1 уменьшается.
5. Закономерности протекания процесса адсорбции паров алифатических спиртов для всех исследованных активированных углей хорошо описываются уравнением Лангергрена (псевдопервого порядка) и диффузионной моделью Морриса-Вебера, что свидетельствует о протекании процесса адсорбции преимущественно в переходной области с постоянным значением содержания паров адсорбата в газовой фазе.

## 5. Список литературы

1. Индекс качества воздуха (AQI) и загрязнение атмосферы PM2.5 в Москва // <https://www.iqair.com/ru/russia/moscow>
2. Гольберг В.М., Зверев В.М., Арбузов А.И. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия // М: Наука, 2001. – 125 с.
3. Кинле Х., Базер Э., Активные угли и их промышленное применение. Л., 1984. 215 с.
4. Беляев Е. Ю. Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях // Химия растительного сырья. 2000.
5. Белецкая М. Г. Технология углеродных адсорбентов. Физико-химический анализ активных углей: учебное пособие к лабораторному практикуму / М. Г. Белецкая, Н. И. Богданович, Н. А. Макаревич; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск: САФУ, 2015. – 96 с.
6. Дубинин М. М. Адсорбция и пористость: учеб. пособие. – М.: Изд-во ВАХЗ, 1972. – 172 с.
7. Братчиков Г.Г., Братчикова И.Г. Промышленная экология: учебник: в 2 ч.// Москва: РУДН, 2014. Ч. II: Охрана гидросферы. – 2017. – 567 с.
8. Активные угли. Эластичные сорбенты. Катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе: Каталог/Под общ. ред. В.М. Мухин. Москва: Издательский дом «Руда и металлы». 2003. 18-128 с.
9. Дубинин М.М. Пористая структура и адсорбционные свойства активных углей. – Москва: Химия, 1965.- 72 с.
10. Активированный уголь БАУ-А ГОСТ 6217-74
11. Активированный уголь АГ-3 ГОСТ 20464-75
12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / пер. с англ. А.П.Карнаухова. Изд. 2-е. – Москва: Мир, 1984. – 306 с.

13. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid system with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) // Pure Appl. Chem. – 1985. – V. 57, N 4. – 603-619 p.
14. Онисифору Перса, Мамедова Чичак Байрам Кызы, Касаткин Евгений Михайлович, Ахмедова Луиза Сулейман Кызы, Чередниченко Александр Генрихович ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПАРОВ ЭТАНОЛА АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ БАУ-А, МОДИФИЦИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОМ // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №6 (229).