

УДК 676.164

DOI: 10.15372/KhUR2024525

EDN: WAPBBO

Свойства сорбентов из коры сосны, активированной механохимическими способами

Е. В. ВЕПРИКОВА¹, М. Ю. БЕЛАШ¹, О. П. ТАРАН^{1,2}¹Институт химии и химической технологии СО РАН ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск (Россия)E-mail: veprikova2@mail.ru²Сибирский федеральный университет, Красноярск (Россия)

(Поступила 06.07.2023; после доработки 07.11.2023)

Аннотация

Исследовано влияние условий предварительной активации коры сосны – 1) в планетарной мельнице АГО-2; 2) водяным паром в условиях взрывного автогидролиза (ВАГ) – на сорбционную активность полученных сорбентов в отношении метиленового синего и желатина. Показано, что взрывной автогидролиз является более эффективным способом активации коры сосны и при определенных условиях приводит к увеличению сорбции метиленового синего и желатина не менее чем в 1.8 и 3.8 раза соответственно по сравнению с сорбентом из неактивированной коры. Активирующая обработка коры сосны в планетарной мельнице позволяет увеличить сорбцию метиленового синего и желатина не более чем в 1.3 и 1.2 раза соответственно. Получена математическая модель, описывающая влияние условий взрывного автогидролиза (давления водяного пара и продолжительности обработки коры сосны) на сорбционные свойства получаемых сорбентов. Определены оптимальные условия, обеспечивающие максимальную сорбцию метиленового синего получаемым сорбентом: температура 155 °С; давление водяного пара 2.62 МПа; продолжительность обработки 58.6 с. Экспериментальным способом подтверждены сорбционные свойства сорбента, прогнозируемые математической моделью. Сорбенты из коры сосны, активированной взрывным автогидролизом, по способности сорбировать метиленовый синий и желатин превосходят промышленный энтеросорбент “Полифепан” из гидролизного лигнина, что свидетельствует о перспективности их применения в качестве энтеросорбентов в медицине и ветеринарии. Результаты проведенных исследований позволяют считать кору сосны альтернативным сырьем, способным заменить гидролизный лигнин при получении эффективных энтеросорбентов.

Ключевые слова: кора сосны, активация, планетарная мельница, взрывной автогидролиз, сорбент, метиленовый синий, желатин

ВВЕДЕНИЕ

Сосна относится к основным лесообразующим породам деревьев в сибирском регионе. В комплексной переработке лесных ресурсов утилизация коры является самым слабым звеном – в России перерабатывается не более 20 % образующейся коры. Основная часть отходов коры сжигается или вывозится в отвалы, что

приводит к техногенному загрязнению окружающей среды. Кора сосны служит ценным, возобновляемым сырьем для получения продуктов различного функционального назначения, например: плитных материалов, сорбентов для очистки сточных вод от тяжелых металлов, нефтесобираателей [1–3]. Химическая переработка сосновой коры позволяет получать разнообразные экстрактивные вещества – дубильные ве-

щества, проантоцианидины, флавоноиды, пектин, β -ситостерин и др. [4–7].

В литературе описаны способы получения различных материалов из коры сосны, включающие ее механохимическую активацию. Так, получение гуминового удобрения из коры сосны основано на предварительной кавитационной механоактивации исходного сырья [8]. Для получения эффективной теплозвукоизолирующей засыпки кору сосны предложено модифицировать обработкой в планетарной шаровой мельнице [9]. Модификация коры сосны методом взрывного автогидролиза (ВАГ) была использована при создании плитных материалов [10]. В работе [11] исследовано влияние активации коры сосны ВАГ и механической обработкой в барабанной мельнице на выход и свойства смолистых и пектиновых веществ, а также β -ситостерина. Показано, что ВАГ является наиболее эффективным способом активации коры сосны.

Известно, что активация отходов коры березы в условиях ВАГ приводит к существенному увеличению сорбционной активности получаемых сорбентов в отношении метиленового синего (МС) и желатина [12]. Авторами данной работы определены условия активации, позволяющие получать сорбент, который по своим сорбционным свойствам превосходит промышленный энтеросорбент “Полифепан” из гидролизного лигнина. Поэтому представляло интерес применить такой способ активации для коры сосны с целью получения сорбентов с высокой сорбционной активностью по МС и желатину. Существенные различия физико-химических свойств коры деревьев разной породы определяют новизну и актуальность исследований, посвященных определению влияния условий ВАГ коры сосны на свойства сорбентов.

В связи с сокращением объемов гидролизных производств задача поиска новых видов сырья, способных заменить гидролизный лигнин при получении энтеросорбентов, является актуальной. Особенно важно это для ветеринарии, где возможность масштабного применения энтеросорбентов во многом зависит от доступности и стоимости исходного сырья. Поэтому разработка способов получения сорбентов из древесной коры с высокой сорбционной активностью практически значима.

Цель данной работы – определение влияния механохимической активации коры сосны в планетарной мельнице или водяным паром в условиях ВАГ на сорбционную активность получен-

ных сорбентов, а также определение возможной области их применения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кора сосны обыкновенной, используемая для получения сорбентов, была отобрана из отходов лесопиления в г. Красноярске в августе 2022 г. Отобранный материал не содержал гнилых и загрязненных частей, а также остатков древесины и посторонних включений. Кора была высушена до воздушно-сухого состояния при комнатных условиях и хранилась в сухом помещении в закрытой таре. На момент проведения экспериментов срок хранения коры составил 1 месяц. Для получения сорбентов использовали воздушно-сухую кору сосны (остаточная влажность 8.1 %, содержание луба не более 1 мас. %) следующего фракционного состава, мас. %: 1–2 мм – 17.7; 2–3 мм – 33.3; 3–5 мм – 45.6; 5–7 мм – 3.4. Кору измельчали на роторной ножевой мельнице РМ 120 (Россия) и фракционировали с помощью виброгрохота ГР 30 (Россия).

Процесс получения сорбентов включал механохимическую активацию коры сосны и обработку активированных образцов 2 % водным раствором NaOH.

Активацию коры сосны осуществляли двумя способами: 1) обработкой в планетарной мельнице АГО-2 (Россия); 2) методом ВАГ.

Взрывной автогидролиз проводили на установке периодического действия с объемом реактора 0.8 л, описанной в работе [13]. Температуру процесса варьировали от 120 до 185 °С, давление перегретого водяного пара – от 1.5 до 3.5 МПа, продолжительность обработки – от 30 до 90 с. Для поддержания давления на заданном уровне в реактор дополнительно подавали водяной пар. После завершения процесса активации производился быстрый сброс давления в реакторе путем открытия шарового крана в течение 1 с в целях создания эффекта “взрыва”. Автогидролизованную кору сосны сушили при 50±5 °С.

Механохимическую обработку коры сосны проводили в планетарной мельнице АГО-2 в водной среде (значение гидромодуля 6 и 12) при центробежном ускорении 60g. Продолжительность обработки варьировали от 5 до 45 мин. Условия механохимической обработки выбраны по аналогии с работой [14], в которой на примере древесины осины установлено их влияние на надмолекулярную структуру и выход водо-

растворимых веществ. Можно предположить, что подобные изменения могут оказать влияние на сорбционные свойства сорбентов из коры сосны, активированной при аналогичных условиях. Активированные образцы коры сосны отделяли от воды и сушили при 50 ± 5 °С.

Активированную указанными способами кору сосны обрабатывали 2 % раствором NaOH при температуре 70 ± 5 °С по методике, приведенной в работе [12]. Образцы сорбентов сушили при 50 ± 5 °С и измельчали до размера частиц менее 250 мкм.

Сорбционную активность полученных сорбентов в отношении МС и желатина (марка П-140, тип Б) определяли по методике [15].

Инфракрасные спектры сорбентов из коры сосны получены на ИК-Фурье спектрометре IR Tracer-100 (Shimadzu, Япония) в области волновых чисел $4000\text{--}400$ см⁻¹. Образцы готовили в виде таблеток в матрице KBr. Масса образца составляла 3 мг на 1000 мг KBr. Исследования сорбентов из коры сосны методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проводили на электронном растровом микроскопе ТМ-1000 (Hitachi, Япония). Анализ полученных СЭМ-изображений выполнен с помощью программы Image-Pro Plus ver. 3.0.

Статическую обменную емкость коры сосны по NaOH определяли согласно методике [16].

Математическое моделирование и оптимизацию процесса ВАГ коры сосны проводили с использованием пакета прикладных программ Statgraphics Plus ver. 5.0 (блок Experimental Design). Уровень значимости составлял 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние различных способов и условий активации коры сосны на сорбционные свойства полученных сорбентов

Для выбора лучшего способа активации приготовлены сорбенты из коры сосны, предварительно активированной в планетарной мельнице АГО-2 или методом ВАГ. При активации в АГО-2 варьировали гидромодуль и время активации, при ВАГ – температуру, давление водяного пара и время обработки. Образцы испытаны на адсорбцию МС и желатина и изучены методами СЭМ и ИК-спектроскопии. При выборе вышеуказанных маркерных веществ авторы руководствовались следующим:

– катионный краситель МС, моделирующий вещества с молекулярной массой до 500 Да (на-

пример, фосфор- и хлорорганические соединения, пестициды, катионные красители подобного типа, креатинин, барбитураты), традиционно применяется для определения сорбционных свойств сорбентов разной природы и позволяет оценить их эффективность для очистки сточных вод и биологических сред;

– желатин, представляющий собой полидисперсную смесь полипептидов с молекулярной массой до 100–300 кДа, обычно применяется для определения сорбционной активности энтеросорбентов в отношении токсинов белковой природы (микроорганизмы и их токсины, кишечные полипептиды и др. [15]), но по величине его сорбции также возможно оценить эффективность сорбента для очистки сточных вод от поллютантов белковой природы.

Сравнение данных табл. 1 выявило менее эффективное влияние активации коры сосны в планетарной мельнице АГО-2 на сорбционные свойства получаемых сорбентов по сравнению с ВАГ. Активация коры в АГО-2, независимо от значений гидромодуля, приводит к увеличению сорбции МС и желатина полученными сорбентами не более чем на 31.5 и 24.5 % соответственно по сравнению с сорбентом из неактивированной коры. По сорбционной активности сорбенты, полученные при значениях гидромодуля 6 и 12, отличаются мало.

В результате активации коры сосны методом ВАГ сорбционная активность полученных сорбентов в отношении МС и желатина увеличивается не менее чем в 1.8 и 3.8 раза соответственно по сравнению с сорбентом из неактивированной коры. Значения сорбции этих веществ сорбентами из коры сосны после ВАГ существенно превосходят показатели сорбентов из коры, активированной в АГО-2 (см. табл. 1).

Увеличение времени обработки коры сосны в АГО-2 до 45 мин, независимо от значений гидромодуля, не влияет на сорбцию желатина (рис. 1), но приводит к уменьшению сорбции МС на 15.2 и 23.4 % (гидромодуль 6 и 12 соответственно). Это в сочетании с данными табл. 1 свидетельствует о нецелесообразности активации коры сосны в АГО-2 для получения сорбентов.

Исследование вариации условий ВАГ показало, что активация коры сосны данным способом в интервале температур 150–185 °С и давлении водяного пара 2.5 МПа позволяет получать сорбенты, которые сочетают наибольшую сорбцию МС и желатина по сравнению с сорбентами, полученными при прочих условиях (рис. 2).

ТАБЛИЦА 1

Влияние предварительной активации коры сосны на свойства сорбентов

Сорбент	Условия активации	Сорбция, мг/г	
		МС	Желатин
СКС	Без активации	85.6±2.4	45.3±1.9
Активация в планетарной мельнице АГО-2			
СКС _{АГО} -1	Значение гидромодуля 6, время обработки 25 мин	112.6±2.7	54.2±2.1
СКС _{АГО} -2	Значение гидромодуля 12, время обработки 25 мин	109.3±2.4	56.4±2.2
Активация взрывным автогидролизом			
СКС _{ВАГ} -1	Температура 165 °С, давление водяного пара 1.5 МПа, время обработки 60 с	158.7±3.1	174.4±5.8
СКС _{ВАГ} -2	Температура 155 °С, давление водяного пара 2.5 МПа, время обработки 60 с	195.2±3.7	240.4±6.7
СКС _{ВАГ} -3	Температура 140 °С, давление водяного пара 3.5 МПа, время обработки 60 с	182.5±3.3	238.2±6.3

Примечание. СКС – сорбенты из коры сосны; МС – метиленовый синий.

В исследованном интервале температур понижение давления водяного пара от 2.5 до 1.5 МПа в процессе ВАГ приводит к уменьшению сорбции МС и желатина полученными сорбентами. По своей способности поглощать желатин такие сорбенты существенно уступают сорбентам из коры, автогидролизованной при давлении пара 2.5 и 3.5 МПа. Повышение давления пара от 2.5 до 3.5 МПа в интервале температур 120–150 °С эффективно для увеличения сорбции желатина, но увеличение сорбции МС наблюдается при температуре не выше 145 °С. Наибольшими значениями сорбции выбранных маркерных веществ

характеризуется сорбент из коры сосны, активированной в процессе ВАГ при температуре 155 °С и давлении водяного пара 2.5 МПа (продолжительность обработки 60 с) (см. рис. 2).

Известно, что в процессе ВАГ происходят механическая деструкция частиц древесного материала и термохимические превращения органической массы под действием повышенной температуры и давления в среде водяного пара [17].

Следствием механического разрушения тканей коры сосны в процессе ВАГ является изменение морфологии сорбента из коры, активированной данным способом при температуре 155 °С

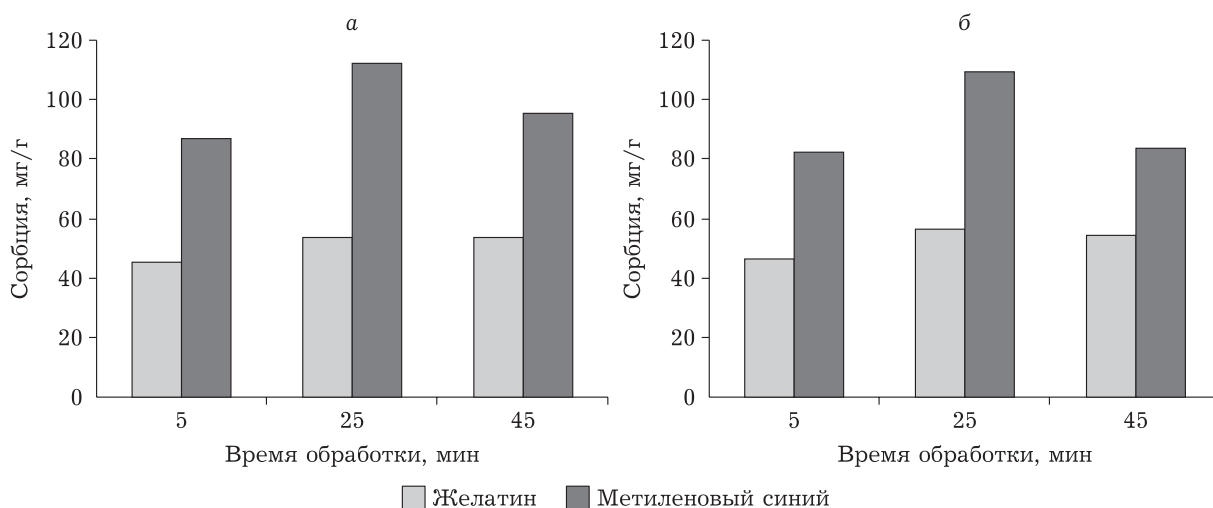


Рис. 1. Сорбция желатина и метиленового синего на сорбентах из коры сосны, активированной в планетарной мельнице АГО-2, при различной продолжительности активации: а – гидромодуль 6; б – гидромодуль 12.

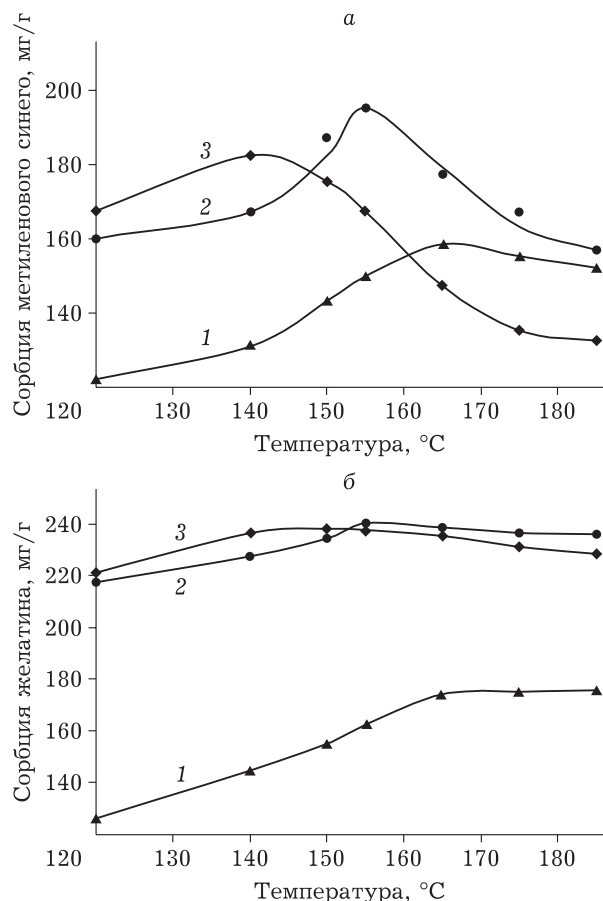


Рис. 2. Влияние условий активации коры сосны взрывным автогидролизом на сорбцию метиленового синего (а) и желатина (б) полученными сорбентами (продолжительность обработки 60 с). Давление водяного пара: 1.5 (1); 2.5 (2); 3.5 МПа (3).

и давлении водяного пара 2.5 МПа в течение 60 с. Сорбенты из исходной (неактивированной) и активированной коры имеют макропористую текстуру. Однако на поверхности сорбента из активированной коры сосны преобладают более мелкие поры размером от 10 до 20 мкм и присутствуют единичные поры размером 3–5 мкм. Поверхность сорбента из исходной коры составлена порами размером 15–50 мкм (рис. 3).

Выявленные изменения текстуры сорбента из коры, активированной при указанных условиях, не могут объяснить наблюдаемое увеличение сорбции МС в 2.3 раза (см. табл. 1). Ранее было отмечено, что ВАГ коры сосны при температурах 130–190 °C (давление водяного пара 2.5 МПа, продолжительность обработки 60 с) позволяет получать сорбенты с высокими значениями статической обменной емкости (СОЕ по NaOH) – 1.3–1.5 ммоль/г [18]. Значение СОЕ по NaOH

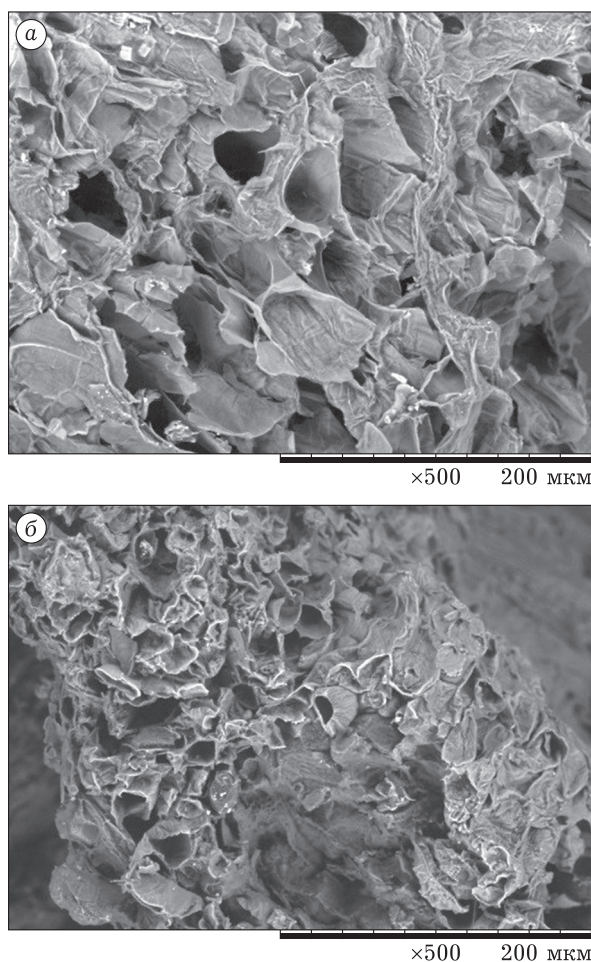


Рис. 3. СЭМ-изображения сорбентов из исходной (неактивированной) коры сосны (а) и коры, активированной взрывным автогидролизом (б). Здесь и на рис. 4, 5: условия взрывного автогидролиза – температура 155 °C; давление водяного пара 2.5 МПа; продолжительность обработки 60 с.

для сорбента из неактивированной коры сосны составляет 0.85 ммоль/г. Сопоставление этих значений свидетельствует об увеличении количества функциональных групп, способных к катионному обмену (МС – катионный краситель).

Сравнение ИК-спектров выявило увеличение интенсивности полос поглощения (п. п.) при 3420 см^{-1} (валентные колебания ОН-групп разной природы) и при 1618 см^{-1} (колебания ароматического кольца, связи C=C в алкенах и циклических олефинах, валентные колебания C=O в енольном фрагменте [19]) для сорбента из активированной в процессе ВАГ коры сосны по сравнению с сорбентом из исходной коры (рис. 4). Наличие в спектре сорбента из активированной коры совокупности п. п. 1618 и 1369 см^{-1} обусловлено антисимметричным и симметричным валентным колебаниям связей C–O карбоксилат-аниона COO^- [19].

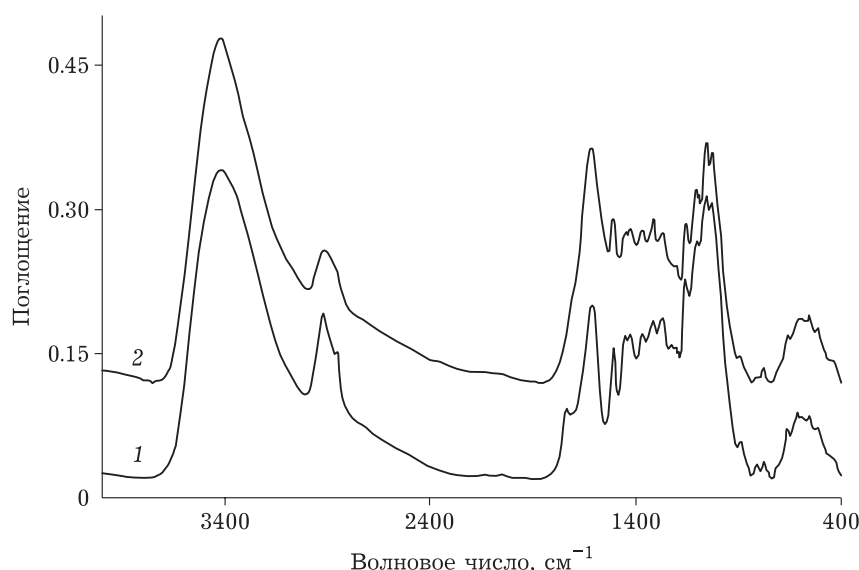


Рис. 4. ИК-спектры сорбентов из исходной коры сосны (1) и коры, активированной взрывным автогидролизом (2). Условия взрывного автогидролиза см. рис. 3.

Сопоставление ИК-спектров сорбента из активированной коры сосны до и после сорбции МС выявило появление п. п., характерных для данного маркерного вещества, например при 1597 см^{-1} (плоскостные валентные колебания $\text{C}=\text{C}$ -связей в ароматическом кольце МС); при 883 и 667 см^{-1} (внеплоскостные деформационные колебания $\text{C}-\text{H}$ -связей ароматического кольца МС [19]). Отмечен низкочастотный сдвиг п. п. при 1618 см^{-1} , присутствующий в ИК-спектре сорбента до взаимодействия с раствором МС, на 21 см^{-1} (рис. 5, а). Это может быть результатом взаимодействия маркерного вещества с карбоксилат-анионами сорбента. Изменения профиля п. п. в спектре сорбента после сорбции МС в области $3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ согласуется со спектральной картиной маркерного вещества (см. рис. 5, а, кривые 2 и 3), что позволяет предположить отсутствие взаимодействия гидроксильных групп сорбента с МС.

После сорбции желатина в спектре сорбента отмечены п. п., характерные для маркерного вещества: при 2922 и 2855 см^{-1} (валентные колебания связей $\text{C}-\text{H}$ в CH_3 - и CH_2 -группах, присоединенных к гетероатомам O , N и S); п. п. с повышенной интенсивностью при 1632 см^{-1} (валентные колебания $\text{C}=\text{O}$ – амид I) и 1512 см^{-1} (деформационные колебания NH – амид II) [19]. Наличие широкой п. п. в области $3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ со сдвигом в низкочастотную область может свидетельствовать об образовании водородных связей OH -групп сорбента с функциональными группами желатина (см. рис. 5, б).

Уменьшение интенсивности поглощения в данной области после сорбции желатина и МС, вероятно, происходит в результате перехода в раствор водорастворимых веществ сорбента, содержащих OH -группы (см. рис. 5). Аналогичное явление наблюдалось при сорбции МС сорбентом из луба коры березы [20].

Математическая оптимизация параметров процесса взрывного автогидролиза коры сосны

Известно, что сорбционная активность в отношении МС и желатина сорбентов из коры березы, предварительно подвергнутой ВАГ, зависит не только от температуры и давления водяного пара, но и от продолжительности обработки [12]. Поэтому для оценки влияния продолжительности обработки коры сосны и поиска оптимальных условий ВАГ был запланирован и проведен полный факторный эксперимент типа 3^2 [21]. На основании приведенных выше данных по активации коры сосны методом ВАГ (см. рис. 2) выбрано фиксированное значение температуры – $155\text{ }^\circ\text{C}$. В качестве переменных независимых факторов приняты: X_1 – давление водяного пара в процессе ВАГ, МПа; X_2 – продолжительность обработки, с. Выходной параметр: Y – сорбция МС, мг/г. Выбор сорбции МС при математическом моделировании обусловлен тем, что это вещество традиционно используется для количественной характеристики функциональной активности сорбентов разной при-

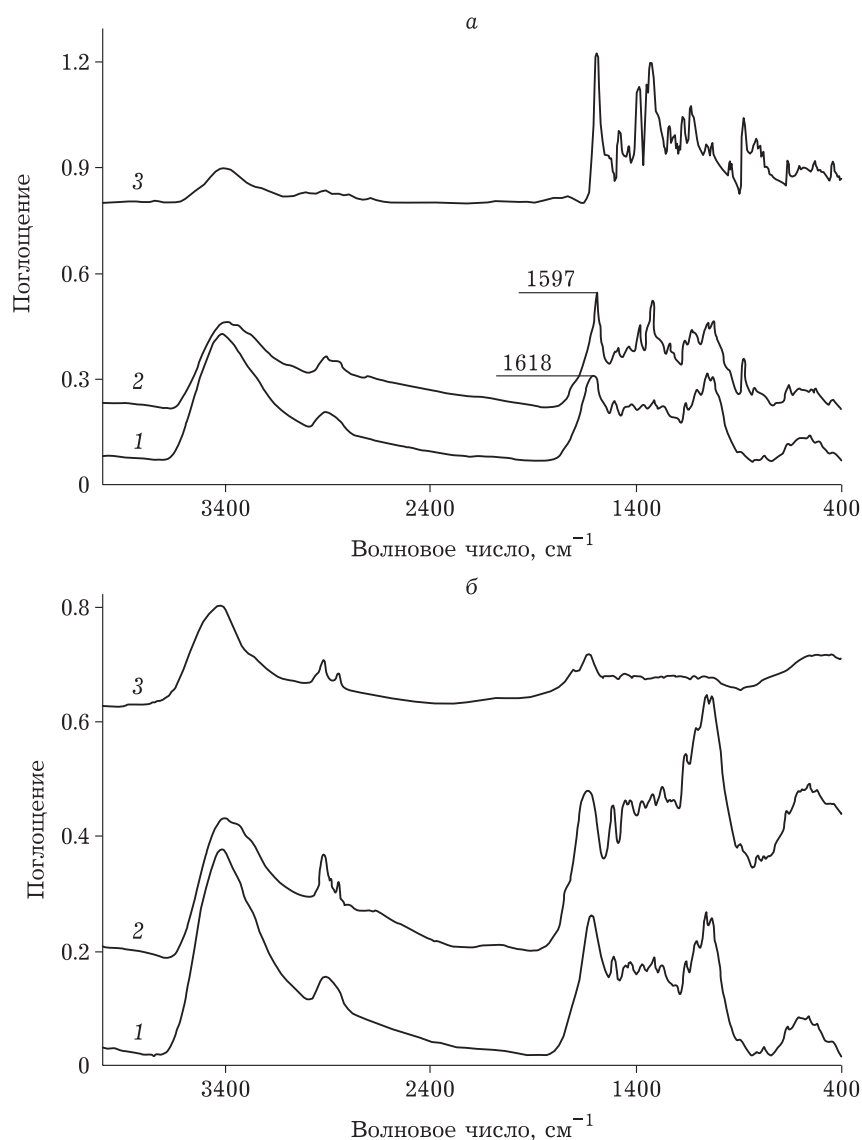


Рис. 5. ИК-спектры сорбента из активированной взрывным автогидролизом коры сосны до и после сорбции метиленового синего (а) и желатина (б): 1 – спектр сорбента до сорбции; 2 – спектр сорбента после сорбции; 3 – спектры метиленового синего (а) и желатина (б). Условия взрывного автогидролиза см. рис. 3.

роды, применяемых в различных сорбционных технологиях.

Данные факторного эксперимента приведены в табл. 2.

Дисперсионный анализ показал, что зависимость сорбции МС сорбентами из коры сосны (Y) от переменных факторов процесса предварительной активации последней (X_1 и X_2) аппроксимируется уравнением регрессии второго порядка с натуральными обозначениями факторов, в которое включены члены с уровнем значимости менее 0.05 [21]:

$$Y = 170.6334X_1 + 3.8208X_2 - 32.5467X_1^2 - 0.0325X_2^2 - 146.2889$$

где Y – сорбция МС, мг/г; X_1 – давление водяного пара в процессе ВАГ, МПа; X_2 – продолжительность обработки, с.

Значение коэффициента детерминации ($R^2 = 94.7\%$) свидетельствует об удовлетворительных прогностических свойствах полученного уравнения регрессии. Значимость критерия Фишера ($F(4, 4) = 17.91$) для данного уравнения составляет 0.0081, что меньше выбранного уровня значимости 0.05. Это подтверждает, что полученная регрессионная модель статистически значима [21]. Поверхность отклика выходного параметра Y при варьировании переменных факторов X_1 и X_2 представлена на рис. 6.

ТАБЛИЦА 2

Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 3^2 для активации коры сосны взрывным автогидролизом

Номер опыта	Переменные факторы в натуральном масштабе		Выходной параметр, Y
	X_1	X_2	
1	1.5	30	122.44
2	1.5	60	139.69
3	1.5	90	125.59
4	2.5	30	160.92
5	2.5	60	195.19
6	2.5	90	152.95
7	3.5	30	138.34
8	3.5	60	167.56
9	3.5	90	129.22

Примечание. X_1 – давление водяного пара в процессе взрывного автогидролиза, МПа; X_2 – продолжительность обработки, с; Y – сорбция метиленового синего, мг/г.

Для полученной регрессионной модели определены оптимальные условия ВАГ коры сосны, позволяющие получать сорбент с максимальной сорбцией МС: температура 155 °С; давление водяного пара 2.62 МПа; продолжительность обработки 58.6 с. Прогнозируемая величина сорбции МС составит 189.7 мг/г.

С учетом технической возможности поддержания и контроля давления пара и времени обработки, был проведен эксперимент по предварительной активации коры сосны путем ВАГ в условиях, близких к оптимальным: давление водяного пара составляло 2.6 МПа при продолжительности обработки 58 с (температура процесса 155 °С). Сорбент, полученный из активированной в этих условиях коры сосны, сорбирует 187.6 мг/г МС. Это с учетом погрешности определения ± 3.4 мг/г близко к значению, рас-

считанному по уравнению регрессии (189.7 мг/г). Значение сорбции желатина для сорбента из автогидролизованной при указанных условиях коры сосны составило 241.3 мг/г.

Представленные в табл. 1, 2 и на рис. 2 данные по сорбции МС и желатина сорбентами из коры сосны, независимо от условий ее активации ВАГ, существенно превышают аналогичные показатели, приводимые в литературе для промышленно выпускаемого энтеросорбента “Полифепан” из гидролизного лигнина (для него значения сорбции МС и желатина составляют 58.3 и 28.6 мг/г соответственно [22]). Остаточное содержание водорастворимых веществ для сорбентов из коры сосны находится в пределах 3.6–2.8 мас. %, что меньше в сравнении с “Полифепаном” (4.2 мас. % [22]). Таким образом, сорбенты из коры сосны, активированной методом ВАГ, могут представлять интерес для применения в качестве энтеросорбентов в медицине и ветеринарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучено влияние двух различных способов и условий активации коры сосны на сорбционную активность сорбентов в отношении МС и желатина. Сравнение полученных результатов показало, что предварительная обработка коры сосны в планетарной мельнице АГО-2 практически не влияет на сорбцию желатина получаемыми сорбентами. Взрывной автогидролиз является более эффективным способом активации коры сосны и приводит к существенному увеличению сорбции маркерных веществ. Активация коры сосны данным способом в интервале температур 150–185 °С и давлении водяного пара 2.5 МПа в течение 60 с

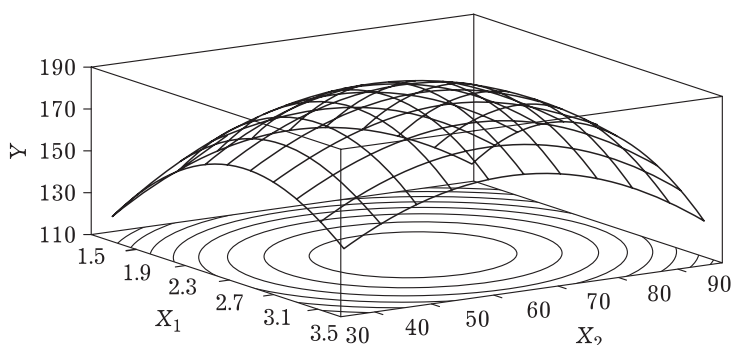


Рис. 6. Поверхность отклика выходного параметра Y (сорбция метиленового синего сорбентами из коры сосны, мг/г) при варьировании переменных факторов взрывного автогидролиза: X_1 (давление водяного пара, МПа) и X_2 (продолжительность обработки, с).

позволяет получать сорбенты, сочетающие наибольшую сорбцию МС (157.1–187.6 мг/г) и желатина (234.6–236.1 мг/г).

Впервые в результате факторного эксперимента получена математическая модель, описывающая влияние условий ВАГ коры сосны на сорбционную активность получаемого сорбента по МС. На основании математической модели определены оптимальные условия ВАГ, обеспечивающие максимальную сорбцию МС получаемым сорбентом: температура 155 °С; давление водяного пара 2.62 МПа; продолжительность обработки 58.6 с. Установлено, что прогнозируемые математической моделью сорбционные свойства сорбента находятся в хорошем соответствии с экспериментальным результатом.

По сорбционной активности в отношении МС и желатина сорбенты из коры сосны, активированной ВАГ, превосходят промышленный энтеросорбент “Полифепан” из гидролизного лигнина, что определяет потенциальную возможность их применения в медицине и ветеринарии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (проект FWES-2021-0017, номер регистрации в ЕГИСУ 121031500180-8) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Федосенко И. Г., Дребушевич М. И. Особенности конструирования плитных материалов из коры сосны на минеральных вяжущих // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1. С. 187–193.
- 2 Семенович А. В., Шапченкова О. А., Анискина А. А., Лоскутов С. Р. Извлечение катионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} из водных растворов модифицированной корой древесных пород // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2016. № 11. С. 76–81.
- 3 Дубовик Д. С., Тараканов В. В., Николаева А. В., Дунаева А. С., Хомутова К. Г. Нефлесорбирующие свойства коры древесных растений на примере сосны обыкновенной // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12, № 2. С. 178–188.
- 4 Кузнецов Б. Н., Левданский В. А., Кузнецова С. А. Химические продукты из древесной коры: монография. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2012. 260 с.
- 5 Левданский В. А., Королькова И. В., Левданский А. В., Кузнецов Б. Н. Выделение и изучение проантоцианидинов коры сосны *Pinus sylvestris* L. // Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 227–233.
- 6 Шудегова М. Д., Краснова Ю. В., Бутова С. Н. Определение оптимальных параметров экстракции веществ из коры сосны // UNIVERSUM: технические науки. 2022. № 6 (99). С. 5–9.
- 7 Ionin V. A., Kazachenko A. S., Skripnikov A. M., Veprikova E. V., Belash M. Yu., Taran O. P. Experimental and mathematical optimization of the β -sitosterol extraction from mechanically activated pine bark // Журн. Сибирского федер. ун-та. Химия. 2021. Т. 14, № 3. С. 302–314.
- 8 Дудкин Д. В., Федяева И. М. Механохимическая технология переработки коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в жидкое гуминовое удобрение // АгроЭкоИнфо. 2018. № 2. Ст. 49.
- 9 Данилов В. Е., Айзенштадт А. М. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2019. № 2. С. 111–118.
- 10 Мусько Н. П., Беушева О. С., Саушкина С. С. Плитные материалы на основе модифицированной коры сосны // Ползуновский вестн. 2015. № 2. С. 136–138.
- 11 Веприкова Е. В., Ионин В. А., Белаш М. Ю., Скрипников А. М., Левданский А. В., Таран О. П. Влияние различных способов механической активации на выход экстрактивных веществ из коры сосны // Журн. Сибирского федер. ун-та. Химия. 2020. Т. 13, № 3. С. 430–446.
- 12 Веприкова Е. В., Кузнецова С. А., Чесноков Н. В., Кузнецов Б. Н. Свойства энтеросорбентов, полученных из автогидролизованной коры березы // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 6. С. 673–678.
- 13 Веприкова Е. В., Терещенко, Е. А., Щипко М. Л., Кузнецов Б. Н. Сорбенты для ликвидации нефтяных загрязнений, полученные автогидролизом древесных отходов // Экология и пром-сть России. 2011. № 6. С. 16–20.
- 14 Барышников С. В., Шарыпов В. И., Жижаев А. М., Береговцова Н. Г., Кузнецов Б. Н. Изменения структурной упорядоченности древесины осины в процессе ее механохимической активации и гидролиза // Журн. Сибирского федер. ун-та. Химия. 2010. Т. 3, № 2. С. 120–127.
- 15 Решетников В. И. Оценка адсорбционной способности энтеросорбентов и их лекарственных форм // Хим.-фармацевт. журн. 2003. Т. 37, № 5. С. 28–32.
- 16 Смирнов А. Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
- 17 Гравитис Я. А. Теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы // Химия древесины. 1987. № 5. С. 3–21.
- 18 Веприкова Е. В., Дубов А. В., Чесноков Н. В. Состав и сорбционные свойства коры сосны, активированной методом взрывного автогидролиза // Материалы 6-й Всерос. конф. с междунар. участием “Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья”, Барнаул, 22–24 апреля 2014. С. 74–76.
- 19 Sokrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts. West Sussex: Wiley Sons, 2001. 347 p.
- 20 Веприкова Е. В., Щипко М. Л., Кузнецова С. А., Ковальчук Н. М., Кузнецов Б. Н. Сорбция органических веществ, моделирующих различные факторы интоксикации, энтеросорбентом из луба коры березы // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18, № 3. С. 239–247.
- 21 Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск: Сибирский гос. технолог. ун-т, 2014. 292 с.
- 22 Веприкова Е. В., Кузнецова С. А., Королькова И. В., Мороз А. А., Счисленко С. А., Кузнецов Б. Н., Чесноков Н. В. Изучение сорбционных и лечебно-профилактических свойств энтеросорбента из коры лиственницы // Химия растительного сырья. 2018. № 1. С. 201–209.