УДК 661.183

# РЕГЕНЕРАЦИЯ ПОРИСТОГО ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО УГЛЕРОДНОГО АДСОРБЕНТА В ПЛАЗМЕННО-КАТАЛИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ, СТИМУЛИРОВАННЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

## © 2021 г. А. В. Чистяков<sup>1,\*</sup>, Е. Ю. Либерман<sup>2</sup>, В. И. Пасевин<sup>1</sup>, Г. Н. Бондаренко<sup>1</sup>, О. В. Арапова<sup>1</sup>, М. В. Цодиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, 119991 Россия <sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047 Россия \*E-mail: chistyakov@ips.ac.ru

> Поступила в редакцию 28 ноября 2020 г. После доработки 24 февраля 2021 г. Принята к публикации 18 марта 2021 г.

Представлены результаты по двухстадийной технологии переработки модельного органического загрязнителя – *м*-крезола, адсорбированного в порах железосодержащего углеродного адсорбента (удельная поверхность 616 м<sup>2</sup>/г) под действием микроволнового излучения (МВИ). На первой стадии в плазменно-каталитическом режиме, стимулированным микроволновым излучением при индуцированной температуре 600°С, осуществлялось разложение крезола на водородсодержащий газ и углеродный остаток. Полное превращение крезола достигается за 25 мин облучения. Вторая стадия заключалась в регенерации адсорбента путем его обработки в токе  $CO_2$  под действием МВИ с целью удаления углеродных остатков крезола с последующим термическим ударом путем разложения предварительно адсорбированного гидроксида аммония. После регенерации величина удельной поверхности составляла 500 м<sup>2</sup>/г. Регенерированный адсорбент проявляет практически такую же адсорбционную способность по поглощению крезола, как и исходный.

Ключевые слова: микроволновое излучение, очистка воды, водород, плазменно-каталитический процесс

**DOI:** 10.31857/S0028242121030114

Углеродные пористые материалы широко применяются в промышленности в качестве адсорбентов и носителей катализаторов [1-5]. Главным образом они служат для очистки промышленных газов и воды от примесей органических соединений, используются в медицине и различных защитных средствах [3–5]. Область использования в значительной степени зависит от сырьевых источников получения адсорбентов. Одним из важных и перспективных возобновляемых сырьевых источников углеродных пористых материалов является лигнин, на базе которого могут быть получены высокоочищенные пористые адсорбенты, используемые в пищевой, медицинской промышленности, а также для адсорбционной очистки воздуха от токсичных компонентов [6-8].

Ранее нами был разработан подход к получению высокопористого адсорбента из углеродных остатков углекислотного риформинга смешанного лигнина древесного происхождения [9, 10]. Основные стадии получения пористого адсорбента – обработка диоксидом углерода в плазменно-каталитическом режиме, стимулированным МВИ, с последующей стадией кратковременного термического удара при температуре 450°С, при котором происходило разложение предварительно адсорбированного 30%-ного раствора гидроксида аммония. В результате был получен адсорбент, обладающий удельной поверхностью 580–600 м<sup>2</sup>/г и однородным распределением пор по эффективным размерам с максимумом – 3.8 нм. Исходный углеродный остаток содержал на поверхности наноразмерные частицы оксида железа(III), нанесенные ранее в качестве катализатора для процесса углекислотного риформинга лигнина в синтез-газ под действием МВИ, которые характеризуются большими диэлектрическими потерями [10]. При облучении железосодержащего адсорбента бегущей волной МВИ с частотой 2.45 гГц генерируется плазма и процесс обработки углекислым газом происходит при индуцированной средней температуре 600–620°С в течение 30 мин.

Было установлено, что в процессе адсорбции крезола активные центры поверхности адсорбента вступают в химическую реакцию с адсорбатом с выделением воды и образованием на поверхности сильных эфирных связей: АЦ–О–R, где АЦ – активный центр поверхности, R – фенильный радикал [11]. Адсорбционная емкость по *м*-крезолу составила 2.53 г крезола на 1 г адсорбента.

С целью многоразового использования адсорбента возникает задача разработки его эффективной регенерации. Регенерация традиционным методом конвективного термического нагрева мало пригодна для углеродсодержащего адсорбента. Регенерация методом экстракции органическими растворителями также представляется мало пригодной и требующей больших трудоемких и временных затрат, а также утилизации органических растворителей.

В настоящей работе представлены результаты по использованию МВИ и термического воздействия на стадиях приготовления адсорбента с целью эффективной и скоростной его регенерации после адсорбции крезола.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пористый адсорбент готовили из углеродного остатка углекислотного риформинга смешанного лигнина древесного происхождения по методике, представленной в [9–11]. Его суммарную адсорбционную емкость определяли эксикаторным методом [11, 12]. Навеску (0.7 г) предварительно прогретого при 150°С и при вакууме (2 мм рт. ст.) адсорбента помещали в эксикатор совместно с открытым бюксом, наполненным *м*-крезолом, и выдерживали при температуре 20°С до насыщения парами сорбата. Количество адсорбированного крезола определяли весовым методом. Неизменной масса адсорбента становилась после 4-х часов адсорбции паров крезола. Количество поглощенного крезола составило 1.257 г. Суммарная адсорбционная емкость по крезолу составила 1.8 г крезола/ г адсорбента.

Регенерацию адсорбента после адсорбции м-крезола проводили в две стадии. На 1-ой стадии обработку микроволновым излучением проводили на микроволновой установке при потоке СО2 [13, 14]. Кварцевый реактор с объемом 10 см<sup>3</sup> был установлен в волновод микроволновой установки, питающейся от магнетрона M-140 мощностью 540 Вт, генерирующего микроволновое излучение с частотой 2.45±0.05 ГГц и плотностью тока 100-150 мА. Реактор снабжен карманом для измерения температуры в реакционной зоне, входом для подачи СО<sub>2</sub> в низ реактора и выходом из верха реактора газообразных продуктов, которые пройдя через змеевиковый холодильник, подавались в хроматограф для определения состава. Температуру в реакторе определяли согласно описанной ранее методике с помощью вольфрам-рениевой термопары, помещенной в карман реактора [13, 14]. Индуцированную микроволновым излучением температуру при заданной плотности тока поддерживали с помощью автоматического регулятора включения магнетрона. Мощность подаваемого излучения варьировали с помощью регулятора изменения плотности тока. На выходе из реактора остаточное излучение поглощали водой. В типовом эксперименте через реактор с образцами адсорбента, содержащего адсорбированный крезол, со скоростью подачи СО<sub>2</sub> 20 см<sup>3</sup>/мин и при индуцированной температуре 600°С пропускали СО<sub>2</sub> (при атмосферном давлении). Исследовали влияние времени облучения на глубину разложения крезола: время облучения составляло 5, 15 и 25 мин.

С целью развития пористой структуры адсорбента на 2-й стадии на поверхность отвакуумированного образца, после обработки МВИ в течение 25 мин наносили 30%-ный водный раствор гидроксида аммония и затем образец сушили при комнатной температуре. После нанесения и высушивания образец с нанесенным гидроксидом аммония подвергали для разложения термическому удару при 400°С (30 мин), а затем охлаждали до комнатной температуры.

Содержание водорода, оксидов углерода, метана, образуемых при обработке СО<sub>2</sub> в продуктах реакции, определяли on line методом газовой хроматографии на хроматографе КристалЛюкс 4000М с использованием в качестве детектора катарометра, газа-носителя – аргона высокой чистоты с расходом 10 см<sup>3</sup>/мин и адсорбционной насадочной колонки. Наполнитель колонок - активированный уголь марки СКТ (FERAK, Германия) (длина колонки 1 м, диаметр 3 мм, размер частиц 0.2-0.3 мм). Температуру колонки, детектора и испарителя устанавливали равной 120°С. Малые концентрации монооксида углерода определяли с помощью откалиброванного ИК-спектрометра Riken Keiki Model RI-550А. Параллельно газообразные углеводороды С1-С4 исследовали на хроматографе КристалЛюкс 4000М с использованием пламенно-ионизационного детектора (ПИД) и газа-носителя – гелия; расход газов: гелий – 30 см<sup>3</sup>/мин. водород -35 см<sup>3</sup>/мин, воздух -300 см<sup>3</sup>/мин; хроматографическая колонка HP-PLOT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (длина 50 м, диаметр 0.32 мм, толщина пленки 8.0 мкм), температура колонки 120°С, детектора 230°С, испарителя 250°С. Концентрации продуктов определяли по калибровочным кривым с применением специализированного программного обеспечения NetChrom v2.1.

Исследование текстурных характеристик образцов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе NOVA 2000 (Quantachrome Instruments, США). Предварительную очистку поверхности образцов осуществляли путем вакуумирования при температуре 300°С в течение 2 ч. Расчет удельной поверхности проводили с помощью уравнения БЭТ в интервале относительных давлений  $p/p_s = 0.05-0.3$  [15, 16]. Суммарный объем пор V<sub>Σ</sub> определяли по количеству адсорбированного азота при относительном давлении  $p/p_s = 0.99$ . Распределение объема пор по эффективным размерам определяли на основании кривой десорбции рассчитывали по уравнению Баррета-Джойнера-Халенды (ВЈН) [15, 16]. Объем микропор определяли t-методом, используя при расчетах программное обеспечение, входящее в комплектацию прибора.

Изучение особенностей адсорбции *м*-крезола на поверхности регенерированного адсорбента исследовали методом ИК-спектроскопии на

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 3 2021



**Рис. 1.** Динамика нагрева образца при различном времени МВИ.

ИК-микроскопе HYPERION 2000. Для проведения исследований был отобран образец, прошедший двухстадийную регенерацию. После адсорбции крезола и выдерживания в адсорбированном состоянии 20 ч адсорбент смешивали с КВг и прессовали в таблетки. ИК-спектры образцов лигнина, порошков исходного адсорбента, а также адсорбента, пропитанного крезолом, получали в режиме пропускания для образцов в виде таблеток, прессованных с бромистым калием (IFS-66v/sBruker, paзрешение 2 см<sup>-1</sup>, скан. 30, диапазон 400–4000 см<sup>-1</sup>), в режиме отражения с поверхности (ATR) (кристалл Ge, скан. 100 разрешение 2 см<sup>-1</sup>, диапазон 600-4000 см<sup>-1</sup>). ИК-спектры пропускания и отражения для исследуемых образцов полностью идентичны, однако, в спектрах пропускания из-за гигроскопичности KBr наблюдаются полосы колебаний ОН-группы воды. Эксперименты по изучению динамики хемосорбции крезола в ячейке ИК-спектрометра повторялись дважды.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Адсорбент, содержащий химически связанный *м*-крезол, обладает высокими диэлектрическими потерями и, как видно из рис. 1, при облучении бегущей волной МВИ подвергается быстрому нагреву.

Из рис. 1 видно, что динамика нагрева образца до среднего значения в реакторе температуры 600°С в 3-х экспериментах, проводимых для образца после последовательного облучения в течение 5, 15 и 25 мин, примерно одинаковая и сопровождается появлением свечения. Постоянная температура



**Рис. 2.** Состав основных газообразных продуктов при различном времени облучения МВИ железосодержащего углеродного сорбента с нанесенным *м*-крезолом.

в реакционном объеме поддерживалась регулированием силы тока от 10 до 15 µА при напряжении 2.1-2.5 кВ. Обработка избытком диоксида углерода приводит к его взаимодействию с адсорбированным крезолом и превращению, главным образом, в CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Выход углеводородов C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> не превышал 0.08% от массы нанесенного крезола. В работах [13, 14] было показано, что наноразмерные железосодержащие частицы, нанесенные на поверхность лигнина, характеризуются высокими диэлектрическими потерями, приводящими к быстрому генерированию плазмы при МВИ, и проявляют высокую каталитическую активность в процессе углекислотного риформинга. В этой связи превращение органического субстрата, при микроволновом облучении можно характеризовать, как протекание процесса в плазменно-каталитическом режиме.

ИК-спектральные исследования показали, что полосы валентных колебаний CH<sub>3</sub>-группы молекулы крезола в области 2840–3100 см<sup>-1</sup>, имеют достаточно высокую интенсивность в ИК-спектрах адсорбента, содержащего химически связанный крезол, а после воздействия микроволнового излучения в течении 15 мин полосы в этой области спектра практически не видны, что свидетельствует о химическом превращении метильного фрагмента крезола. В ходе превращения молекулы крезола под действием микроволнового излучения



**Рис. 3.** Изотермы адсорбции-десорбции для исходного адсорбента (*1*), а также адсорбента после первой (*2*) и второй (*3*) стадий регенерации.

основным маршрутом деструкции органической молекулы адсорбата, как нами было установлено ранее, является дегидрирование, а не разрыв связи С–С между метильным фрагментом и фениловым остатком [18]. Таким образом, сопоставление полученных ИК-спектральных данных и обнаруженных ранее закономерностей позволило определить критерий эффективности реакции – выход водорода. Как видно из рис. 2 практически полное прекращение выделения H<sub>2</sub> наблюдалось после 25 мин облучения MBИ.

Результаты исследования изменения текстурных характеристик образцов относительно исходного материала приведены в табл. 1. Представленные данные позволяют констатировать, что проведение двухстадийной регенерации позволяет практически полностью восстановить пористую структуру образца (рис. 3 и 4). Так, сопоставительный анализ изотерм адсорбции-десорбции исходного материала и после проведения 1- и 2- ой стадий регенерации показал, что образцы сохраняют мезопористую структуру. Форма петли гистерезиса относится по классификации Де Бура к типу В, характерному для щелевидных пор (рис. 3). После проведения 1-й стадии регенерации обработкой диоксидом углерода в плазменно-каталитическом режиме, стимулированным МВИ, удельная поверхность образца составляет 476 м<sup>2</sup>/г, а после 2-й стадии термического удара адсорбента, на поверх-

| Образец                             | Удельная<br>поверхность,<br>$S_{yg}$ , м <sup>2</sup> /г | Суммарный объем пор, $V_{\Sigma}$ , см <sup>3</sup> /г | Объем<br>микропор,<br>$V_{\rm MH}$ , см $^{3}/\Gamma$ | Объем<br>мезопор,<br>V <sub>BHJ</sub> , см <sup>3</sup> /г | Диаметр<br>пор, <i>D</i> , нм |
|-------------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------|
| Исходный образец                    | 616  | 0.65   | 0.18  | 0.42   | 3.8                           |
| Адсорбент после 1-й регенерации МВИ | 476  | 0.48   | 0.14  | 0.34   | 3.8                           |
| После термоудара                    | 500  | 0.59   | 0.15  | 0.44   | 3.8                           |

Таблица 1. Величина удельной поверхности, суммарный объем пор, объем микро- и мезопор, эффективный диаметр пор углеродного железосодержащего адсорбента

ность которого предварительно был нанесен 30%ный раствор гидроксида аммония, величина удельной поверхности повысилась до 500 м<sup>2</sup>/г.

На рис. 4а приведен сравнительный график зависимости суммарного объема пор для исследован-



**Рис. 4.** Пористая структура исследованных материалов: (а) суммарный объем пор, (б) распределение пор по эффективным размерам: *1* – исходный образец; *2* – первая регенерация (обработка диоксидом углерода в плазменно-каталитическом режиме, стимулированным МВИ); *3* – 2 стадия регенерации (термический удар при температуре 400°С в течение 30 мин.

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 3 2021

ных материалов, демонстрирующий практически полное восстановление объема пор после проведения 2-ой стадии регенерации (кривые *l* и *3*). Важно отметить, что в процессе регенерации как на 1-й, так и на 2-й стадии восстанавливается мономодальность пористой структуры с формированием, главным образом, пор с эффективным размером 3.8 нм (рис. 4б). Тем не менее при более тщательном рассмотрении видно, что после термической обработки максимум, соответствующий распределению пор расширен, что указывает на более широкое распределение пор в пределах 3.7–3.9 нм.

С целью проверки способности регенерированного адсорбента к химическому взаимодействию с крезолом было проведено ИК-спектроскопическое исследование поверхности адсорбента после адсорбции крезола (рис. 5).



Рис. 5. ИК-спектры адсорбентов: *1* – углеродный железосодержащий сорбент, регенерированный; *2* – *м*-крезол; *3* – сорбент + *м*-крезол (1-й эксперимент, после 2 ч выдерживания); *4* – сорбент регенерированный + *м*-крезол после 20 ч выдерживания.

Из рис. 5 видно, что взаимодействие м-крезола и поверхности адсорбента характеризуется практически полным исчезновением полосы в области 3300-3200 и 1243 см<sup>-1</sup>, относящихся, соответственно, к валентным колебаниям связей О-Н и Рh-О крезола, а также возникновением и ростом интенсивности новых широких полос 1214 и 1061 см<sup>-1</sup>, которые могут быть отнесены к связям Ph-O-С в простых эфирах. После регенерации сорбента (спектр 4) взаимодействие с крезолом происходит также как и в процессе сорбции на свежем адсорбенте: исчезновение полос от гидроксильных групп крезола (3305 см<sup>-1</sup>) и появление новых полос от простых эфирных связей (2014–2010 см<sup>-1</sup>; 1160 см<sup>-1</sup>, плечо). Т.е. происходит хемосорбция с участием OH-группы крезола функциональными группами углеродного материала; при этом возникают новые связи С-О и выделяется вода. Полосы от ароматических колец крезола в спектре сохраняются. Спектр, приведенный на рис. 5 после 2 ч контакта, практически идентичен спектру 4, полученному для образца сорбента, который находился в контакте с крезолом 20 ч.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

методами мессбауэровской Ранее [19] И РФЭ-спектроскопии было показано, что при воздействии МВИ часть железа на поверхности углеродного адсорбента восстанавливается до наноразмерных металлических кластеров Fe<sup>0</sup> и Fe<sup>2+</sup> в кластерах оксидов. После взаимодействия с крезолом все железо было окислено до Fe<sup>3+</sup>. На основании этого результата в данной работе было высказано предположение, что восстановленные кластеры железа, наряду с -С=О-связями поверхности, вероятно, являются активными центрами взаимодействия с крезолом с образованием поверхностных алкоголятов Fe<sup>3+</sup>-O-R. Плазменно-каталитический режим воздействия СО<sub>2</sub> на адсорбент, содержащий хемосорбированный крезол, позволяет за 25 мин практически полностью удалить его путем превращения в СО, Н<sub>2</sub>, метан, воду и небольшое количество углеводородов. На 2-й стадии регенерации путем кратковременного термического разложения предварительно адсорбированного раствора гидроксида аммония достигается повышение удельной поверхности адсорбента и практически полностью восстанавливается его адсорбционная способность.

Ранее методом колебательной спектроскопии было показано, что рентгеноаморфный адсорбент, полученный из углеродного остатка углекислотной переработки лигнина, имеет графитированную структуру, состоящую из слоев ароматического строения [18]. При этом интенсивность графитоподобных структур, выраженных наличием в Raman-спектре полосами G и D [18], существенно выше в адсорбенте по сравнению с их интенсивностью в углеродном остатке переработки лигнина, из которого адсорбент был получен. Ароматические углеводороды, адсорбированные на поверхности в высокотемпературных эндотермических реакциях являются предшественниками углеродных отложений. Данными настоящего исследования методом ИК-спектроскопии было показано, что м-крезол может координироваться ароматическим кольцом с концевыми ароматическими кольцами плоских графитоподобных частиц в составе адсорбента.

Мономодальная структура пор, формирующаяся как в процессе приготовления адсорбента из углеродного остатка переработки лигнина, так и на стадиях регенерации в области пор с эффективным размером 3.8 нм, по всей вероятности, может относиться к порам, формирующимся в межплоскостном пространстве графитированной структуры. Использование плазменно-каталитического режима, стимулированного МВИ, в процессе обработки диоксидом углерода с последующим кратковременным термическим воздействием позволяет провести селективную регенерацию пористой структуры поверхности адсорбента и восстановить его адсорбционную способность.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чистяков Андрей Валерьевич, ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-4443-7998

Либерман Елена Юрьевна, ORCID: https://orcid. org/0000-0002-3387-9248

Бондаренко Галина Николаевна, ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-3826-1009

Арапова Ольга Владимировна, ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-3397-5539

Цодиков Марк Вениаминович, ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-8253-2945

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 3 2021

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Аналитический центр проблем глубокой переработки нефти и нефтехимии» ИНХС РАН.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kuznetsov B.N., Chesnokov N.V., Ivanov I.P., Veprikova E.V., Ivanchenko N.M. Methods of porous materials obtaining from lignin and wood bark // J. of Siberian Federal University. Chemistry. 2015. V. 2. № 8. P. 232– 255. Https://doi.org/10.17516/1998-2836-2015-8-2-232-255
- Kuznetsov B.N., Chesnokov N.V., Ivanov I.P., Veprikova E.V., Ivanchenko N.M. Porous carbon materials produced by the chemical activation of birch wood // Solid Fuel Chemistry. 2016. V. 50. № 1. P. 23–30. https:// doi.org/10.3103/S0361521916010067
- 3. *Николаев В.Г., Стрелко В.В.* Гемосорбция на активных углях. Киев : Наукова Думка, 1979. 286 с.
- Haq I., Mazumder P., Kalamdhad A.S. Recent advances in removal of lignin from paper industry wastewater and its industrial applications. A review // Bioresource Technology. 2020. P. 123636–123647. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2020.123636
- Rabinovich M.L., Fedoryak O., Dobele G., Andersone A., Gawdzik B., Lindström M.E., Sevastyanova O. Carbon adsorbents from industrial hydrolysis lignin: The USSR/ Eastern European experience and its importance for modern biorefineries // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 57. P. 1008–1024. https://doi. org/10.1016/j.rser.2015.12.206
- Munoz M., Nieto-Sandoval J., Álvarez-Torrellas S., Sanz-Santos E., Calderón B., de Pedro Z.M., Casas J.A. Carbon-encapsulated iron nanoparticles as reusable adsorbents for micropollutants removal from water // Separation and Purification Technology. 2020. V. 257. P. 11797–11780. https://doi.org/10.1016/j. seppur.2020.117974
- Duan C., Ma T., Wang J., Zhou Y. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review // J. of Water Process Engineering. 2020. V. 37. P. 101339–101351. https://doi.org/10.1016/j. jwpe.2020.101339
- 8. Zhao W., Tian Y., Chu X., Cui L., Zhang H., Li M., Zhao P. Preparation and characteristics of a magnetic

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 3 2021

carbon nanotube adsorbent: its efficient adsorption and recoverable performances // Separation and Purification Technology. 2020. V. 257. P. 117917–117925. https://doi. org/10.1016/j.seppur.2020.117917

- Quesada H.B., de Araújo T.P., Vareschini D.T., de Barros M.A.S.D., Gomes R.G., Bergamasco R. Chitosan, alginate and other macromolecules as activated carbon immobilizing agents: A review on composite adsorbents for the removal of water contaminants // Intern. J. of Biological Macromolecules. 2020. V. 164. P. 2535–2549. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.118
- Чистяков А.В., Цодиков М.В., Бухтенко О.В., Николаев С.А. Способ получения углеродсодержащего адсорбента для удаления ароматических соединений // Патент РФ № 2724252. 2020.
- Tsodikov M.V., Nikolaev S.A., Chistyakov A.V., Bukhtenko O.V., Fomkin A.A. Formation of adsorbents from Fe-containing processing residues of lignin // Microporous and Mesoporous materials. 2020. V. 298. P. 110089–110096. https://doi.org/10.1016/j. micromeso.2020.110089
- Бондаренко Г.Н., Колбешин А.С., Либерман Е.Ю., Чистяков А.В., Пасевин В.И., Цодиков М.В. Особенности хемосрбции крезола на пористом железосодержащем сорбенте, полученном из углеродного остатка переработки лигнина. 1. Пористая структура и адсорбционная способность сорбента // Нефтехимия. 2021. Т. 61. № 1. С. 92–98.
- Гиллебрант В.Ф., Лендель Г.Э., Брайт Г.А., Гофман Д.И. Практическое руководство по неорганическому анализу. М.: Химия. 1966. 654 с.
- Tsodikov M.V., Ellert O.G., Nikolaev S.A., Arapova O.V., Bukhtenko O.V., Maksimov Yu.V., Kirdyankin D.I., Vasil'kov A.Yu. Fe-containing nanoparticles used as effective catalysts of lignin reforming to syngas and hydrogen assisted by microwave irradiation // J. of Nanoparticle Research. 2018. V. 20. № 3. P. 86–101. https://doi.org/10.1007/s11051-018-4185-7
- Tsodikov M.V., Ellert O.G., Arapova O.V., Nikolaev S.A., Chistyakov A.V., Maksimov Yu.V. Benefit of Fecontaining Catalytic Systems for Dry Reforming of Lignin to Syngas under Microwave Radiation // Chemical Engineering Transactions. 2018. V. 65. P. 367–372. https://doi.org/10.3303/CET1865062
- Zharova P.A., Arapova O.V., Konstantinov G.I., Chistyakov A.V., Tsodikov M.V. Kraft lignin conversion into energy carriers under the action of electromagnetic radiation // J. of Chemistry. V. 2019. P. 1–9. https://doi. org/10.1155/2019/6480354

## 404

- Dubinin M.M., Plavnik G.M. Microporous structures of carbonaceous adsorbents // Carbon. 1968. V. 6. P. 183–192. https://doi.org/10.1016/0008-6223(68)90302-3
- Feldman L.C., Mayer J.W. Fundamentals of surface and thin film analysis. Amsterdam: Elsevier Science. 1986. 352 p.
- 19. Tsodikov M.V., Konstantinov G.I., Chistyakov A.V., Arapova O.V., Perederii M.A. Utilization of petroleum residues under microwave irradiation // Chem. Eng.

J. 2016. V. 292. P. 315–320. https://doi.org/10.1016/j. cej.2016.02.028

 Николаев С.А., Максимов Ю.В., Бухтенко О.В., Пасевин В.И., Цодиков М.В. Особенности хемосорбции крезола на пористом железосодержащем сорбенте, полученном из углеродного остатка переработки лигнина. 2. Влияние хемосорбции м-крезола на структурные особенности железосодержащих компонентов // Нефтехимия. 2021. Т. 61. № 1. С. 99–102.