УДК: 628.35:66.081.3:661.183.2:678.742.2

РОЛЬ ОДНОВРЕМЕННОЙ АКТИВАЦИИ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНОГО КАРБОНИЗАТА

Умматов Обиджон Олимжонович – *самостоятельный соискатель*
obidzonummatov@gmail.com
Очилов Голибжон Мамаюнусович – *кандидат химических наук, профессор*
Кокандский государственный университет

ЁҒОЧ КАРБОНИЗАТИ БАЗАСИДА МЕТАЛЛ САҚЛОВЧИ ҒОВАКЛИ КОМПОЗИТЛАР ОЛИШДА БИР ВАҚТДА ФАОЛЛАШТИРИШ ВА МОДИФИКАЦИЯЛАШНИНГ РОЛИ

Умматов Обиджон Олимжон ўғли – *мустақил тадқиқотчи*
Очилов Ғолибжон Мамаюнусович – *кимё фанлари доктори, профессор*
Қўқон давлат университети

ROLE OF SIMULTANEOUS ACTIVATION AND MODIFICATION IN OBTAINING METAL-CONTAINING POROUS COMPOSITES BASED ON WOOD CARBONIZATE

Ummatov Obidjon Olimjonovich – *independent researcher*
Ochilov Golibjon Mamayunusovich – *Candidate of Chemical Sciences, Professor*
Kokand State University

Таянч сўзлар: ёғоч карбонизати, металл сақловчи композитлар, бир вақтда фаолаштириш ва модификациялаш, темир (III) хлорид, мис (II) хлорид, рух хлорид, ғовакли структура, рентгенфаза таҳлили.

Резюме. Мақоланинг мақсади – ёғоч чиқиндилари карбонизати асосида темир (III), мис (II) ва рух хлоридлари иштирокида кимёвий фаоллаштириш ва модификациялашни бир вақтда, бир босқичда амалга ошириб, металл сақловчи ғовакли композит сорбентлар олиш қонуниятларини аниқлашдан иборат.

Ключевые слова: древесный карбонизат, металлсодержащие композиты, одновременная активация и модифицирование, хлорид железа (III), хлорид меди (II), хлорид цинка, пористая структура, рентгенофазовый анализ.

Резюме. Цель статьи – выявить закономерности получения металлсодержащих пористых композитных сорбентов на основе карбонизата древесных отходов в одну стадию путём одновременной химической активации и модифицирования хлоридами железа(III), меди (II) и цинка.

Key words: wood carbonizate, metal-containing composites, simultaneous activation and modification, iron(III) chloride, copper(II) chloride, zinc chloride, porous structure, X-ray phase analysis.

Summary. The aim of this work was to establish the regularities of one-step production of metal-containing porous composite sorbents from wood-waste carbonizate by simultaneous chemical activation and modification with iron(III), copper(II) and zinc chlorides.

Введение. Активные угли и другие углеродные сорбенты широко применяются для очистки сточных вод, однако даже при развитой пористой структуре исходная поверхность угля неодинаково эффективно извлекает разные загрязнители [1-3]. Одни органические и неорганические соединения хорошо адсорбируются на угольной поверхности, тогда как другие удерживаются слабо из-за несоответствия заряда поверхности или отсутствия комплементарных функциональных групп. Свойства получаемого угля зависят от природы сырья, условий карбонизации и способа активации [4, 5], поэтому для целенаправленного изменения химии поверхности и пористой структуры, а также для создания на основе углеродных материалов металлсодержащих пористых композитов применяют различные способы модифицирования [6, 7].

Основная цель модифицирования – создание на поверхности угля новых активных центров, изменение её заряда, гидрофильности и кислотно-основных свойств. Для этого используют кислоты, щёлочи, окислители, азот- и серосодержащие реагенты, полимеры и соединения металлов [6]. Выбор способа определяется природой адсорбата и задачей очистки. Обработка кислотами и солями металлов приводит к вскрытию части ранее закрытых пор, изменению химического состава поверхности и росту числа функциональных групп. При этом избыток модификатора может снижать удельную поверхность, но компенсировать это ростом числа химически активных центров [7].

Введение соединений металлов придаёт углю не только адсорбционные, но и каталитические и магнитные свойства. Магнитный активный уголь из отходов сосновых плодов эффективно удаляет тетрациклин и парацетамол из воды [8]; железосодержащие наночастицы изменяют поверхностные и поровые характеристики угля и создают дополнительные координационные центры [9]; ферроцен-модифицированный активный уголь показал более высокую ёмкость по фенолу, чем исходный [10]; углерод, инкапсулирующий оксид железа, обеспечивает одновременное фентоновское разложение и адсорбцию катионных и анионных красителей [11]. Для соединений меди важную роль играют кислородсодержащие функциональные группы поверхности, определяющие связывание ионов Cu(II) [12]. Хлорид цинка, в свою очередь, традиционно применяют как активирующий реагент при получении активных углей из древесины [3].

В качестве сырья для таких сорбентов всё чаще используют древесные и другие растительные отходы – опилки, кожуру цитрусовых, скорлупу арахиса, растительную биомассу [13-15], что снижает себестоимость и решает проблему их утилизации. Параметры химической активации, включая дозу активатора, существенно влияют на адсорбционные характеристики угля из древесных отходов [16]. Однако традиционные многостадийные способы (получение активного угля, последующая пропитка солью металла и высокотемпературное прокаливание) требуют больших затрат энергии, времени и реагентов. Поэтому актуально совмещение химической активации карбонизата и введения металлсодержащей фазы в одной технологической стадии и изучение влияния такого совмещения на свойства композитов.

Научная новизна работы состоит в комплексном сопоставлении влияния природы соли (Fe, Cu, Zn) и её дозы на выход, зольность, содержание металла, пористую структуру, элементный и фазовый состав композитов, получаемых из древесного карбонизата в одну стадию.

Цель исследования – изучить роль одновременной химической активации и модифицирования при получении металлсодержащих пористых композитов на основе древесного карбонизата и установить основные закономерности этого процесса.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1) получить серию композитов с использованием $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ и $ZnCl_2$ при трёх массовых соотношениях соль : карбонизат;

2) определить выход продукта, зольность и содержание металла в композитах;

3) для образцов с соотношением 1:1 охарактеризовать пористую структуру, адсорбционную активность, элементный и фазовый состав.

Материалы и методы.

Исходное сырьё и реагенты. *Исходным материалом служил карбонизат, полученный при 500°C из местных древесных отходов с ограничением кислорода. Карбонизат измельчали и рассеивали до однородной фракции. В качестве реагентов, одновременно выполняющих функции активатора и источника металла, использовали гексагидрат хлорида железа(III) ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), дигидрат хлорида меди(II) ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) и безводный хлорид цинка ($ZnCl_2$) аналитической чистоты. Для создания инертной атмосферы применяли аргон высокой чистоты, растворы готовили на дистиллированной воде.*

Методика синтеза композитов.

Пропитка. Массовые соотношения соль: сухой карбонизат составляли 0,5:1,0; 1,0:1,0 и 2,0:1,0. Навеску соли растворяли в минимальном объёме воды и смешивали с карбонизатом до получения однородной пасты. Для равномерного проникновения реагента в поры смесь выдерживали при комнатной температуре 12 ч.

Сушка и термическая активация. Пропитанные образцы сушили при 105 ± 2°C до постоянной массы, помещали в кварцевый трубчатый реактор и продували аргоном для удаления кислорода. Нагрев проводили в токе аргона со скоростью 10°C/мин до 600°C с выдержкой при этой температуре 60 мин.

Отмывка. После охлаждения в инертной атмосфере до температуры ниже 90°C композиты промывали кипящей дистиллированной водой для удаления свободных хлоридов и непрореагировавшей соли. Промывку продолжали до отсутствия хлорид-ионов в фильтрате (качественная проба с 0,1 М раствором $AgNO_3$ по отсутствию белого осадка AgCl). Затем образцы сушили при 105°C и хранили в герметичных стеклянных ёмкостях.

Образцы обозначены как М-х, где М – металл соли (Fe, Cu, Zn), х – массовое соотношение соль: карбонизат (0,5; 1,0; 2,0). Исходный карбонизат обозначен С-500.

Методы исследования.

Пористая структура. Удельную поверхность (S_{BET}) и суммарный объём пор (V_{total}) рассчитывали по изотермам низкотемпературной (77 K) адсорбции–десорбции азота.

Элементный состав (C, O, Cl, Fe, Cu, Zn) определяли JEOL JSM-IT200 серийным СЭМ.

Фазовый состав изучали методом порошковой рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 с использованием монохроматического Cu-Kα-излучения (λ = 1,5406 Å) в интервале углов 2θ = 5–80°.

Результаты.

Влияние природы и дозы соли на выход, зольность и содержание металла. ***Основные показатели композитов, полученных при разных соотношениях соль: карбонизат, приведены в таблице 1.***

Таблица 1 – Показатели композитов, одновременно активированных и модифицированных солями металлов (600°C, 60 мин, Ar)

Образец	Соотношение соль: карбонизат	Выход продукта, %	Зольность, %	Содержание металла, %
Fe-0,5	0,5:1,0	72,8	2,9	1,35
Fe-1,0	1,0:1,0	66,1	4,4	2,55
Fe-2,0	2,0:1,0	57,9	6,6	4,15
Cu-0,5	0,5:1,0	74,1	3,1	1,55
Cu-1,0	1,0:1,0	68,3	4,9	2,85
Cu-2,0	2,0:1,0	61,0	7,0	4,60
Zn-0,5	0,5:1,0	76,5	3,5	1,80
Zn-1,0	1,0:1,0	71,2	5,5	3,25
Zn-2,0	2,0:1,0	65,4	7,9	5,10

С увеличением соотношения соль: карбонизат от 0,5:1,0 до 2,0:1,0 выход снижается во всех сериях: для Fe – с 72,8 до 57,9 % (на 14,9 п.п.), для Cu – с 74,1 до 61,0 % (на 13,1 п.п.), для Zn – с 76,5 до 65,4 % (на 11,1 п.п.). Одновременно растут зольность (с 2,9 до 7,9 %) и содержание связанного металла: для Fe – с 1,35 до 4,15 %, для Cu – с 1,55 до 4,60 %, для Zn – с 1,80 до 5,10 %. При любой дозе соли и выход, и зольность, и содержание металла убывают в одном ряду: Zn>Cu>Fe.

Рост содержания металла отстаёт от роста дозы соли: при увеличении соотношения с 0,5 до 1,0 содержание металла возрастает в 1,81-1,89 раза, а с 1,0 до 2,0 – лишь в 1,57-1,63 раза.

Пористая структура и адсорбционная активность. Текстурные характеристики и адсорбционная активность образцов, полученных при соотношении 1:1, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Пористая структура и адсорбционные свойства образцов (600°C, соотношение 1:1)

Образец	S_{BET}, $м^2/г$	V_{total}, $см^3/г$	Активность по йоду, %	Ёмкость по МГ, мг/г
C-500 (исходный карбонизат)	180	0,09	35	45
Zn-1,0	940	0,46	85	230
Fe-1,0	780	0,39	78	195
Cu-1,0	710	0,35	72	180

По сравнению с исходным карбонизатом удельная поверхность композитов возрастает в 3,9-5,2 раза (до 710-940 $м^2/г$), а суммарный объём пор – в 3,9-5,1 раза (до 0,35-0,46 $см^3/г$). Активность по йоду увеличивается с 35 до 72-85 %, ёмкость по метиленовому голубому – с 45 до 180-230 мг/г. Все показатели убывают в одном ряду: Zn > Fe > Cu.

Элементный состав.

Таблица 3 – Элементный состав исходного и модифицированных образцов (EDX), мас.%

Образец	C	O	Cl	Fe	Cu	Zn
C-500	90,842	7,913	–	–	–	–
Fe-1,0	86,028	9,733	0,084	3,215	–	–
Cu-1,0	85,556	10,077	0,093	–	3,386	–
Zn-1,0	84,823	10,304	0,078	–	–	3,932

Углерод остаётся основой всех образцов, однако после модифицирования его доля снижается с 90,842 до 84,823-86,028 мас.%, а содержание кислорода растёт с 7,913 до 9,733-10,304 мас.%. Присутствие металлов подтверждено во всех модифицированных образцах: Fe – 3,215, Cu – 3,386, Zn – 3,932 мас.%. Остаточное содержание хлора не превышает 0,093 мас.% (0,078-0,093 мас.%), что свидетельствует об эффективности отмывки. Значения содержания металла по данным EDX в 1,19-1,26 раза выше интегральных значений таблицы 1 для тех же образцов (2,55; 2,85 и 3,25 %), однако порядок Zn > Cu > Fe сохраняется в обоих случаях.

Фазовый состав (рентгеновская дифракция). На дифрактограмме исходного карбонизата C-500 наблюдаются широкие максимумы при $2\theta \approx 22\text{-}24°$ (плоскость (002)) и 44-46° (направления (100)/(101)), а узких отражений графита нет, т.е. материал имеет аморфно-турбостратную структуру. После модифицирования на фоне широкого углеродного максимума (20-25°) появляются узкие отражения кристаллических фаз, приведённые в таблице 4.

Таблица 4 – Кристаллические фазы в образцах по данным рентгеновской дифракции (интервал 2θ=5–80°)

Образец	Положение Отражений, 2θ, град.	Отнесённая фаза
Fe-1,0	30,2; 35,5; 43,2; 53,6; 57,1; 62,7	оксид железа типа Fe_3O_4
Cu-1,0	35,5; 38,7; 48,7; 53–54; 58–62	оксид меди CuO
Zn-1,0	31,8; 34,4; 36,3; 47,5; 56,6; 62,9; 67,9	оксид цинка ZnO (гексагональная структура)

Отражения отсутствуют на дифрактограммах C-500, поэтому их появление связано с обработкой хлоридами металлов. Среди приведённых отражений линий металлических Fe, Cu и Zn не зафиксировано.

Обсуждение. *Активирующее действие солей и выход продукта.* Снижение выхода при росте дозы соли объясняется усилением дегидратирующего и деструктивного действия хлоридов при 600°C: они ускоряют разрыв поперечных связей органической части, способствуют выделению летучих продуктов и формированию микропор; при большей концентрации реагента активация протекает глубже, а часть углерода уходит в виде газообразных продуктов [3, 5, 16]. Показательно, что при одинаковом массовом соотношении наименьший выход даёт $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, хотя в расчёте на 1 г он содержит наименьшее число молей металла (3,7 ммоль против 5,9 ммоль для $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ и 7,3 ммоль для $ZnCl_2$). Следовательно, потери массы определяются не только количеством катионов, но и природой соли (гидролиз и окислительные свойства Fe(III), наличие кристаллизационной воды). Это предположение требует проверки методами термического анализа.

Развитие пористой структуры. При соотношении 1:1 удельная поверхность возрастает в 3,9-5,2 раза, причём порядок Zn > Fe > Cu не совпадает с порядком выхода (Zn > Cu > Fe): образец Fe-1,0 имеет меньший выход, но большую S_{BET}, чем Cu-1,0, т.е. выход и пористость связаны неоднозначно. Ёмкость по метиленовому голубому, отнесённая к удельной поверхности, практически постоянна для всех образцов (0,24-0,25 $мг/м^2$: у C-500 – 0,25; Zn-1,0 – 0,24; Fe-1,0 – 0,25; Cu-1,0 – 0,25). Это означает, что в условиях испытания прирост ёмкости по катионному красителю определяется прежде всего развитием пористой структуры, а не специфическим вкладом металлических центров. Функциональную роль металлсодержащей фазы (комплексообразование, окислительно-восстановительные и каталитические свойства, магнитная сепарация [8, 9, 11]) в данной работе не оценивали; её необходимо проверить отдельно, в том числе на анионных адсорбатах и в каталитических тестах.

Состав и фазовое состояние металлов. Рост содержания кислорода (на 1,8–2,4 мас.%) согласуется с образованием оксидных фаз, выявленных методом рентгеновской дифракции (Fe_3O_4-тип, CuO, ZnO), и с развитием кислородсодержащих групп на поверхности. Широкий углеродный максимум сохраняется, следовательно, металлсодержащие фазы формируются как отдельные кристаллические частицы на поверхности и

в порах аморфной углеродной матрицы. По одним лишь данным рентгеновской дифракции нельзя утверждать, что катионы Fe^{3+}, Cu^{2+} и Zn^{2+} входят в углеродную решётку, а химическое состояние металлов после термообработки изменяется. Кроме того, магнетит и маггемит трудно различимы лабораторной дифракцией, поэтому железосодержащая фаза указана как «Fe_3O_4-типа». Для уточнения состояния железа целесообразны дополнительные методы (например, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия).

Баланс золы и оксидов; удержание металла. Чтобы проверить согласованность данных таблицы 1, содержание металла было пересчитано на оксиды Fe_3O_4, CuO и ZnO (фазы, выявленные для образцов 1:1) и сопоставлено с зольностью (таблица 5). Разность между зольностью и расчётным содержанием оксида составляет 0,86–1,55 % и не имеет выраженной зависимости от дозы соли; это порядка доли элементов, не учтённых в элементном составе С-500 (≈1,2 %). Это согласуется с тем, что зола композитов образована преимущественно оксидами металлов. Для строгой проверки необходимо определить зольность исходного карбонизата.

Таблица 5 – Сопоставление зольности с расчётным содержанием оксидов (расчёт по данным таблицы 1)

Образец	Содержание металла, %	Расчётное содержание оксида, %	Зольность, %	Зольность – оксид, %
Fe-0,5	1,35	1,87	2,9	1,03
Fe-1,0	2,55	3,52	4,4	0,88
Fe-2,0	4,15	5,74	6,6	0,86
Cu-0,5	1,55	1,94	3,1	1,16
Cu-1,0	2,85	3,57	4,9	1,33
Cu-2,0	4,60	5,76	7,0	1,24
Zn-0,5	1,80	2,24	3,5	1,26
Zn-1,0	3,25	4,05	5,5	1,45
Zn-2,0	5,10	6,35	7,9	1,55

Примечание. Пересчёт выполнен в предположении, что металл присутствует в виде Fe_3O_4 (72,4 % Fe), CuO (79,9 % Cu) и ZnO (80,3 % Zn).

Оценка удержания металла показывает, что при соотношении 1:1 в композите остаётся лишь около 5-8 % введённого металла (Fe ≈ 8 %, Cu ≈ 5 %, Zn ≈ 5 %, при расчёте выхода на массу карбонизата), а основная часть удаляется при отмывке в виде растворимых соединений. Это согласуется с тем, что рост содержания металла отстаёт от роста дозы соли (раздел 3.1): при высоких дозах часть введённой соли не удерживается в композите.

Ограничения работы и перспективы. Текстурные, адсорбционные, элементные и фазовые характеристики получены для образцов с соотношением 1:1, тогда как влияние соотношения 0,5:1,0 и 2,0:1,0 охарактеризовано по выходу, зольности и содержанию металла. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение пористой структуры всей серии, изотерм и кинетики адсорбции (в том числе анионных адсорбатов), морфологии (СЭМ), функциональных групп (ИК-спектроскопия), термического поведения, а также на оптимизацию температуры и времени активации.

Выводы:

1. Реализован одностадийный способ получения металлсодержащих пористых композитов из древесного карбонизата путём одновременной химической активации и модифицирования хлоридами Fe(III), Cu(II) и Zn (соотношение соль : карбонизат 0,5:1,0–2,0:1,0, 600 °C, 60 мин, аргон).

2. С ростом соотношения соль: карбонизат от 0,5:1,0 до 2,0:1,0 выход композитов снижается на 11,1-14,9 п.п. (до 57,9-65,4 %), зольность и содержание металла растут (до 6,6-7,9 % и 4,15-5,10 %); рост содержания металла отстаёт от роста дозы соли в 1,6-1,9 раза при её удвоении. Наибольшее содержание металла достигнуто в образцах Zn-2,0 (5,10 %), Cu-2,0 (4,60 %) и Fe-2,0 (4,15 %).

3. При соотношении 1:1 удельная поверхность увеличивается со 180 до 710–940 $м^2/г$, объём пор – с 0,09 до 0,35-0,46 $см^3/г$, активность по йоду – с 35 до 72-85 %, ёмкость по метиленовому голубому – с 45 до 180-230 мг/г; все показатели убывают в ряду Zn > Fe > Cu.

4. По данным EDX и рентгеновской дифракции металлы (3,2–3,9 мас.%) присутствуют в виде кристаллических фаз типа Fe_3O_4, CuO и гексагонального ZnO при сохранении аморфно-турбостратной углеродной матрицы; остаточное содержание хлора не превышает 0,093 мас.%.

5. Полученные композиты перспективны как основа многофункциональных сорбентов; соотношение 1:1 может использоваться как базовый режим для дальнейших испытаний. Функциональная роль металлсодержащей фазы в адсорбции и катализе требует отдельного подтверждения.

Литература

1. Muxammadiev B.Q. Technology of Activated Carbons. – Tashkent: «Fan va texnologiya», 2019.

2. Basharatov I.A. et al. Production and properties of carbon adsorbents. // Uzbek Chemical Journal, 2021, № 3. – P. 45-51.

3. Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. – Ленинград: «Химия», 1984.

4. Spencer W., Senanayake G., Altarawneh M., Ibana D., Nikoloski A.N. Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality. // Minerals Engineering, 2024, Vol. 212. – Article 108712.

5. Siipola V., Tamminen T., Källi A., Lahti R., Romar H., Rasa K., Keskinen R., Hyväluoma J., Hannula M., Wikberg H. Effects of biomass type, carbonization process, and activation method on the properties of bio-based activated carbons. // BioResources, 2018, Vol. 13, № 3. – P. 5976-6002.

6. Wang B., Lan J., Bo C., Gong B., Ou J. Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. // RSC Advances, 2023, Vol. 13, № 7. – P. 4275-4302.

7. Kim W.K., Kim K.H., Vellingiri K., Younis S.A., Boukhvalov D.W. Tailoring the adsorption potential and selectivity of microporous carbon through a two-step chemical-thermal modification approach. // Chemical Engineering Journal, 2025, Vol. 518. – Article 164820.

8. Hashemzadeh F., Ariannezhad M., Derakhshandeh S.H. Sustainable removal of tetracycline and paracetamol from water using magnetic activated carbon derived from pine fruit waste. // Scientific Reports, 2024, Vol. 14. – Article 16346.

9. Lompe K.M. et al. The influence of iron oxide nanoparticles upon the adsorption of organic matter on magnetic powdered activated carbon. // Water Research, 2017, Vol. 123. – P. 30-39.

10. Mqehe-Nedzivhe K.C., Ojo B.O., Mabuba N. Tailoring mesoporous ferrocene-modified activated carbon for phenol removal in wastewater. // Adsorption, 2025, Vol. 31. – Article 49.

11. Haris M., Zavabeti A., Khan M.W., Murdoch B.J., Paz-Ferreiro J., Mahmood N., Eshtiaghi N. Carbon encapsulated iron oxide for simultaneous Fenton degradation and adsorption of cationic and anionic dyes from water. // Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, Vol. 10. – Article 108968.

12. Hotová G. et al. The role of the oxygen functional groups in adsorption of copper (II) on carbon surface. // Science of the Total Environment, 2020, Vol. 711. – Article 135436.

13. Dhorabe P.T., Lataye D.H., Ingole R.S. Adsorption of p-nitrophenol onto Acacia glauca sawdust and waste orange peels activated carbon: Application of Taguchi's design of experiment. // SN Applied Sciences, 2019, Vol. 1.

14. Wu H., Chen R., Du H., Zhang J., Shi L., Qin Y., Yue L., Wang J. Synthesis of activated carbon from peanut shell as dye adsorbents for wastewater treatment. // Adsorption Science & Technology, 2019, Vol. 37. – P. 74-85.

15. Moheb M., El-Wakil A.M., Awad F.S. Highly porous activated carbon derived from the papaya plant for superior adsorption of alizarin red S and methylene blue dyes from wastewater. // RSC Advances, 2025, Vol. 15. – P. 7957-7968.

16. Chang J., Lee J.-Y. Machine learning-based prediction of the adsorption characteristics of biochar from waste wood by chemical activation. // Materials, 2024, Vol. 17. – Article 5359.

17. ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия.

18. ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия.