

Адсорбционные исследования химически активированных углей на основе лигноцеллюлозного сырья для элиминации провоспалительных цитокинов

Ж.М. Жандосов¹, Д.И. Ченчик^{1*}, А.Ж. Байменов^{1,2}, Е.О. Досжанов^{1,3},
А.Н. Сабитов^{1,4}, А.Р. Керимкулова^{1,2}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,3}

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

²Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
ул. К.И. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114 к1, Алматы, Казахстан

Информация о статье

Получено
21.08.2025

Получено в исправленном виде
15.09.2025

Принято
10.11.2025

Ключевые слова:

активированный уголь;
текстурные характеристики;
сорбция; провоспалительные
цитокины

АННОТАЦИЯ

В работе исследованы адсорбционные характеристики углеродных материалов, синтезированных из рисовой шелухи, на предмет их элиминационной способности по отношению к провоспалительным цитокинам: фактор некроза опухоли (TNF- α), интерлейкины IL-6 и IL-8. Сорбенты были получены путем химической активации рисовой шелухи, пропитанной фосфорной кислотой в соотношении 2:1 в течение 1 ч при температуре 400–500 °С. Текстурные характеристики образцов были исследованы с использованием низкотемпературной адсорбции-десорбции азота, ртутной порометрии и сканирующей электронной микроскопии. Исследованные образцы угля из карбонизированной рисовой шелухи (КРШ–Р–400А/В, КРШ–Р–500А/В) показали высокие результаты адсорбции воспалительных цитокинов в сравнении с коммерческим мезопористым сферическим углеродом TE7.

1. Введение

Представленная работа является продолжением исследований сорбции уремических токсинов, в том числе из человеческой плазмы, для биомедицинского применения синтезированными образцами углеродных сорбентов [1]. Адсорбционные характеристики углеродных материалов, полученных из рисовой шелухи (РШ), были оценены на предмет их элиминационной способности по отношению к ряду воспалительных цитокинов.

Цитокины – низкомолекулярные вещества, синтезирующиеся системно и местно различными клетками, к числу которых относятся моноциты, макрофаги, Т-клетки, фибробласты, нейтрофилы, кератиноциты и эндотелиоциты. Значительная их часть участвует в иммунных процессах, опосредует воспаление и делится на про- и противовоспалительные. При сепсисе первоначальная защитная реакция организма на за-

ражение усиливается и выходит из-под контроля, что приводит к нарушению регуляции и дисбалансу между про- и противовоспалительными реакциями. Данная активация приводит к чрезмерному выделению цитокинов, хемокинов и других воспалительных регуляторов, часто называемых цитокиновым каскадом, который включает в себя провоспалительные цитокины, такие как фактор некроза опухоли (TNF- α), интерлейкины IL-1, IL-6, IL-12, интерферон и фактор, ингибирующий миграцию макрофагов [2].

В качестве биологических токсинов для исследования были выбраны провоспалительный цитокин «фактор некроза опухоли альфа» (TNF- α) и интерлейкины IL-6, IL-8 (рис. 1) из-за их более избыточного высвобождения и вклада в *синдром системного воспалительного ответа* (SIRS) и сепсис, а также они представляют собой диапазон размеров молекул (от 8 до 51 кДа), по которым оценивается элиминационная способность представленных в работе сорбентов [3].

*Corresponding author: D.I. Chenchik; E-mail address: dmitrychenchik@gmail.com

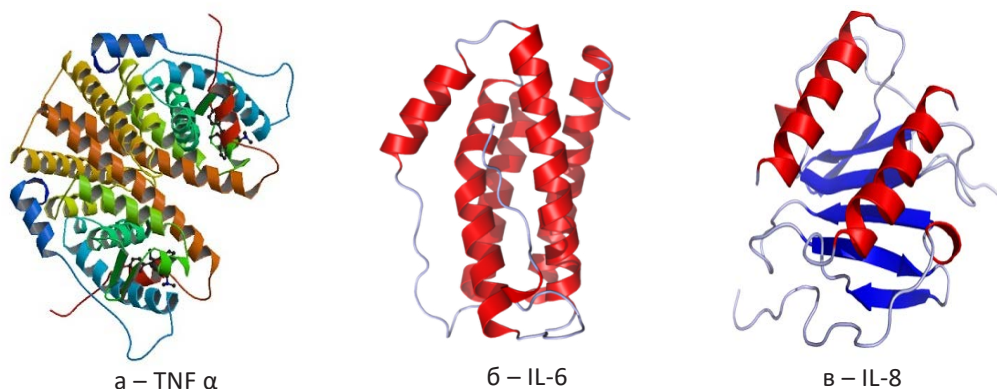


Рис. 1. Модельные изображения молекул цитокинов. Воспроизведено из [4], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.

Фактор некроза опухоли альфа (TNF- α) – это белок с молекулярной массой 17 кДа, который формирует тримеры (51 кДа) и высвобождается из активированных иммунных (макрофаги) и неиммунных клеток, таких как фибробласты, и может образоваться в течение 30 мин в ответ на инфекцию. IL-6 представляет собой гликопротеин с молекулярной массой 21 кДа, продуцируемый различными клетками в ответ на стимуляцию бактериального эндотоксина и TNF- α [5-6]. Повышенный уровень IL-6 достигает пиковой концентрации после первоначального выброса TNF- α и может наблюдаться при различных патологических состояниях, включая ожоги, хирургические вмешательства и сепсис [7]. Интерлейкин-8 (IL-8) представляет собой небольшой гликопротеин, который высвобождается из макрофагов и часто связан с воспалительными состояниями, молекулярная масса – 8,8 кДа [8].

Несмотря на значительный размерный диапазон перечисленных соединений, все они относятся к средномолекулярным токсинам. Как следствие, для некоторых токсинов среднего размера эффективность выведения традиционными мембранными методами остается ограниченной [9]. Одним из распространенных методов элиминации таких токсинов является гемоперфузия. Однако гемоперфузия не обеспечивает контроля водного баланса и способности вывести мочевины. Тем не менее, сочетание обоих методов очистки крови, мембранного и адсорбционного, в перспективе может обеспечить более качественную очистку крови у пациентов с заболеваниями почек [10]. Сорбционная терапия с применением угольных материалов на основе растительного сырья может использоваться для улучшения выведения этих молекул и, таким образом, улучшить неблагоприятный прогноз для пациентов с почечной недостаточностью. Целью

данной работы является исследование текстурных характеристик и адсорбционной способности химически активированных углей из рисовой шелухи в отношении провоспалительных цитокинов TNF- α , IL-6 и IL-8.

2. Экспериментальная часть

2.1. Методика получения углеродных сорбентов

Синтезированные образцы активированных углей КРШ–Р–400А/В, КРШ–Р–500А/В и КРШ–Р–500В/А были получены в результате кислотно-щелочной активации согласно методикам, ранее опубликованным в работах [11].

Краткая методика получения углей.

1. Образцы КРШ–Р–400А/В и КРШ–Р–500А/В получены карбонизацией размолотой РШ фракцией 1-2 мм, пропитанной фосфорной кислотой в соотношении 2:1 в течение 1 ч, в открытом реакторе в атмосфере воздуха при температурах процесса 400 и 500 °С, соответственно. Полученные образцы промывали дистиллированной водой путем чередования процедур кипячения и декантации до нейтральной реакции с последующей сушкой при 90 °С в сушильном шкафу до постоянной массы.

2. Образец КРШ–Р–500В/А был синтезирован следующим образом: исходную РШ пропитывали 2М раствором NaOH и кипятили в течение 30 мин для удаления внутримолекулярного кремния. Остаточный раствор декантировали, а дисилицированную РШ отмывали от остаточного NaOH путем многократной процедуры кипячения-сепарации-декантации до нейтральной реакции. Полученную РШ сушили в среде аргона до постоянного веса. Дальнейший этап карбонизации РШ идентичен процедуре получения образцов КРШ–Р–400А/В и КРШ–Р–500А/В.

2.2. Анализ методом низкотемпературной адсорбции азота

Низкотемпературная адсорбция азота является широко распространенным методом для определения площади поверхности материалов, а также их микро- и мезопористости. Этот метод включает предварительную дегазацию образцов – удаление воздуха и влаги путем нагревания в условиях высокого вакуума. Затем в систему добавляют гелий, который удаляют перед подачей азота в вакуумную систему при постоянной температуре в контролируемом режиме [12]. Данные об изотермах адсорбции газа получают путем регистрации относительного давления при подаче определенных объемов азота. Согласно Международному союзу теоретической и прикладной химии (IUPAC) [13], изотермы адсорбции можно разделить на шесть физико-сорбционных моделей. Для расчета удельной площади поверхности материалов, объема пор и распределения пор по размерам использованы математические модели, такие как теория Ленгмюра, теория Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и расчеты на основе теории функционала плотности (DFT). Для анализа адсорбции азота активированные угли дегазировали в течение 3 ч при 200 °С перед проведением анализа. Анализ углеродных адсорбентов и построение изотерм адсорбции азота проводили на анализаторе Autosorb-1 (Quantachrome Instruments, Великобритания) в диапазоне относительных давлений от 0,005 до 0,991. Данные анализировали с помощью программного обеспечения ASiQWin, Quantachrome Instruments. Удельную площадь поверхности рассчитывали методом БЭТ; распределение пор по размерам, площадь поверхности и объем пор материалов – с использованием модели щелевидных/цилиндрических пор DFT, рекомендованной для активированного угля.

2.3. Анализ методом ртутной порометрии

Метод ртутной порометрии, используемый в основном для количественной оценки мезопористости материалов, также позволяет определить площадь поверхности материала и насыпную плотность. В данном методе ртуть под давлением внедряется в поры материала, причем процесс осуществляется в условиях вакуума. Приложенное давление и количество внедренной ртути используются для расчетов количественной оценки на основе уравнения Уошберна, предпо-

лагающего наличие цилиндрических пор. При определенном давлении зарегистрированный объем внедренной ртути представляет собой объем пор, соответствующий размеру пор, связанному с этим давлением внедрения. Предполагая, что цилиндрические поры открыты с обеих сторон, можно рассчитать площадь поверхности испытываемых материалов. Для анализа методом ртутной порометрии активированные угли дегазировали в течение ночи в вакуумной печи при температуре 150 °С перед проведением анализа. Углеродные адсорбенты анализировали, а изотермы адсорбции ртути определяли с помощью прибора Poremaster (Quantachrome, Великобритания). Данные были проанализированы с помощью программного обеспечения Quantachrome Poremaster для расчета объема мезопор материала (<50 нм).

2.4. Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Метод получения изображений СЭМ использует электронные пучки для сбора информации о морфологии и топографии образца и обеспечивает получение снимков высокого разрешения вплоть до нанометрового диапазона. Для стабилизации электронных пучков и предотвращения скопления мелких частиц на пути электронного луча образцы анализируются в вакууме. Образцы, исследуемые СЭМ, обычно покрывают проводящими материалами, такими как платина или палладий, для снижения поверхностного заряда. Использование вакуума и необходимого покрытия образцов для СЭМ-изображения требует сушки материалов перед исследованием. Для получения изображений в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) образцы устанавливали на держатель и покрывали слоем платины толщиной 4 нм с помощью установки Quorum (Q150TES). Срезы исследовали с помощью полевой эмиссионной пушки Zeiss Sigma (Zeiss NTS) при ускоряющем напряжении 5 кВ.

2.5. Оценка адсорбции воспалительных цитокинов углеродом

Образцы взвешивали по 0,02 г в трехкратной повторности для каждого времени инкубации (9 повторностей) в пробирках Эппендорфа и предварительно уравнивали 800 мкл фосфатно-солевого буфера (PBS) в инкубаторе-шейкере при температуре 37 °С в течение 2 ч. После этого

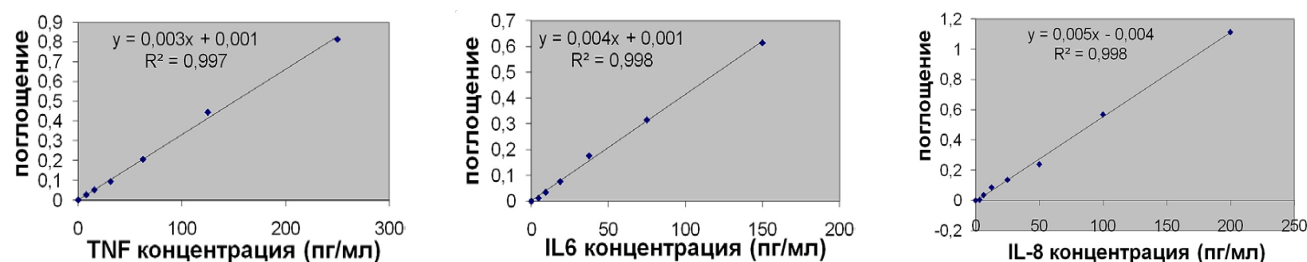


Рис. 2. Калибровочные кривые для воспалительных цитокинов TNF- α , IL-6 и IL-8 в образцах плазмы.

углеродные образцы центрифугировали при 8000 об/мин в течение 3 мин, а надосадочную жидкость удаляли. Затем к углеродным образцам добавляли TNF (300 мкг/мл), IL-6 (1000 мкг/мл) и IL-8 (1000 мкг/мл) (BD Biosciences, UK) и инкубировали в инкубаторе-шейкере при температуре 37 °C в течение 1 ч. Использованное соотношение массы угля к объему раствора составляло 0,02 (мг/мл) для TNF и 0,01 (мг/мл) – для IL-6 и IL-8. В каждом моменте времени образцы центрифугировали при 8000 об/мин в течение 3 мин, а супернатант переносили ($n=3$ для каждого момента времени) в пробирки Эппендорфа и сохраняли при -80 °C. После дальнейшей инкубации в образцы добавляли субстратный реагент 3,3',5,5'-тетраметилбензидин (ТМБ) и давали планшету проявиться, затем добавляли стоп-реагент и измеряли поглощение на микропланшетном ридере (Infinite® F50 Magellan™ Software Magellan Version 6.3 (6.3.0.8) Tecan Austria GmbH Untersbergstr. 1A A-5082 Grödig, Austria), установленном на длине волны 450 нм. Далее неизвестные концентрации образцов рассчитывали с помощью стандартной кривой (рис. 2).

3. Результаты и Обсуждение

3.1. Текстурные характеристики образцов

Методом низкотемпературной адсорбции азота получены изотермы исследуемых образцов (рис. 3). Полимолекулярная адсорбция определяется S-образной формой изотерм, которые по классификации, предложенной С. Брунауэром, Л. Демингом, У. Демингом и Э. Теллером (БДДТ), относятся ко II-му типу, характерному для микропористых материалов [14]. Однако при рассмотрении изотерм адсорбции-десорбции азота, представленных на рис. 3, оказывается, что имеет место капиллярная конденсация, обусловленная наличием мезопор (2–50 нм) в материале образца КРШ–Р–500В/А. Об этом свидетельствует форма гистерезисной петли, образованной адсорбцион-

ной и десорбционной ветвями изотерм, которые по классификации БДДТ относятся к IV-му типу, характерному для микро- и мезопористых материалов.

Для установления микропористости и мезопористости, используя экспериментальные изотермы как непрерывную функцию распределения объема пор от их размера, проведены расчеты по методу DFT с принятием модели щелевых/цилиндрических пор (QSDFT). Сравнение кривых распределения пор в образцах позволяет установить более качественную разницу в характере порового распределения (рис. 4).

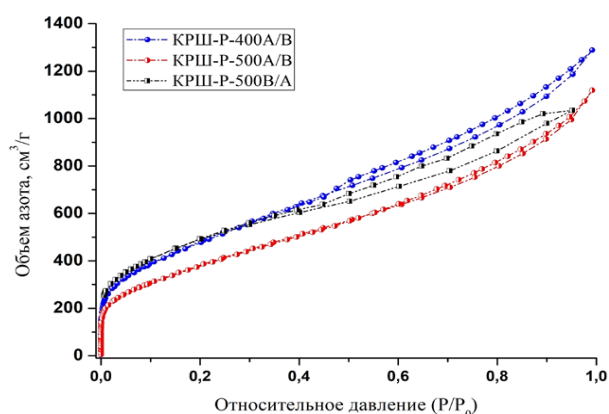


Рис. 3. Изотермы адсорбции азота углеродных адсорбентов.

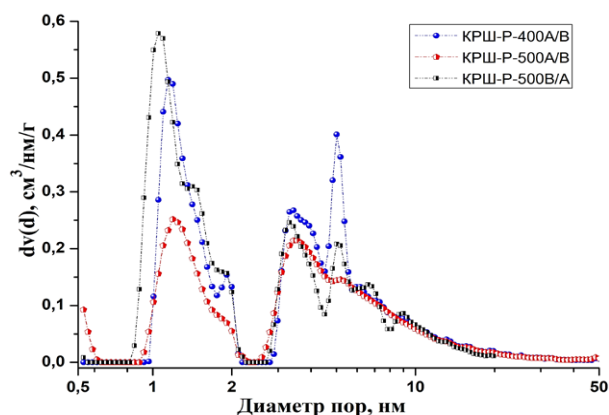


Рис. 4. Дифференциальное распределение пор по размерам в образцах полученных углеродных сорбентов, согласно методу DFT.

Таблица 1. Данные для углеродных адсорбентов, измеренные с помощью низкотемпературной адсорбции азота и ртутной порометрии

Код образца	SБЭТ, (м ² /г)	SDFT, (м ² /г)	VDFT, (см ³ /г)	DDFT, нм	VBJH, (см ³ /г)	DBJH, нм	VDR, (см/г)	DDR, нм	VDR/ VDFT	VMIP, (см ³ /г)
КРШ–Р–400А/В	1791	1372	1,84	1,14	1,46	3,7	0,81	3,1	0,44	0,6006
КРШ–Р–500А/В	1428	1157	1,56	1,2	1,3	3,12	0,6	2,8	0,38	0,5028
КРШ–Р–500В/А	1726	1468	1,51	1,1	1,01	3,8	0,74	2,4	0,49	0,7773

Для образца КРШ–Р–500В/А наибольшее количество пор приходится в районе 1 нм, в то время как пики для образцов КРШ–Р–400А/В, КРШ–Р–500А/В смещены в диапазон 1-2 нм. Во всех образцах также имеется достаточное количество мезопор до 20 нм, а основной объем мезопор приходится на диапазон 3-6 нм (максимум при 3,5 нм). Более того, имеется ряд убывающих максимумов, вплоть до 50 нм. Для образца КРШ–Р–400А/В максимальные пики наблюдаются в диапазонах 3-4 и 5-6 нм. В образце КРШ–Р–500А/В наблюдается плавное распределение пор по размерам с пиками, равными по интенсивности. Текстуры параметры углеродных материалов представлены в табл. 1 и включают: SБЭТ – удельная поверхность по БЭТ, SDFT, VDFT и DDFT – удельная поверхность, объем пор и средний диаметр пор, рассчитанные по методу DFT; VDR и DDR – объем и радиус микропор, рассчитанные по методу Дубинина-Радушкевича (DR); VBJH – объем мезопор, DBJH – средний диаметр пор по методу BJH; VMIP – объем мезопор, рассчитанный на основе данных ртутной порометрии.

Материалы из карбонизированной рисовой шелухи продемонстрировали диапазон удельной площади поверхности SБЭТ от минимального

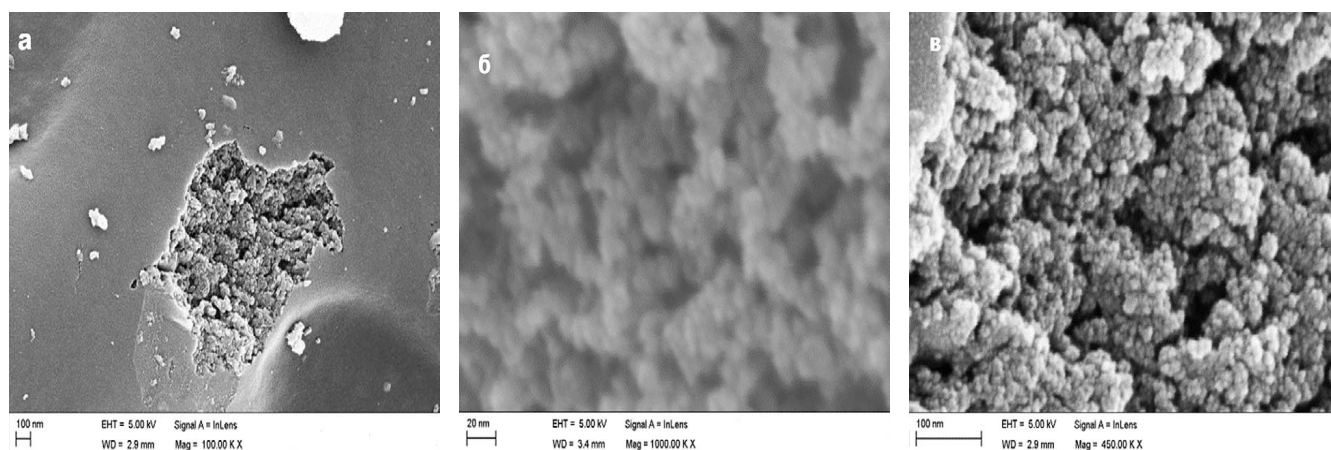
1428 м²/г для КРШ–Р–500А/В до максимального значения 1791 м²/г для КРШ–Р–400А/В.

Данные ртутной порометрии показывают, что объем мезопор для каждого полученного образца лежит в диапазоне 0,5028-0,7773 см³/г.

3.3. Анализ методом СЭМ

СЭМ-микроснимки синтезированных образцов представлены на рис. 5. Согласно данным СЭМ (рис. 5), текстура карбонизированных образцов определяется исходной морфологией РШ, несмотря на химическую обработку.

Активация образцов сопровождалась испарением воды и дегидратацией ортофосфорной кислоты, в результате чего на рыхлой поверхности частиц местами формировался стекловидный слой, имеющий неровности и углубления (рис. 5а). В процессе химической активации образцов сформировалась пористая структура с губчатой поверхностью, характерной для РШ (рис. 5б, в). Поверхность полученных образцов характеризуется наличием большого количества как макро-, так и нанопор, что подтверждается результатами исследования текстурных характеристик образцов (табл. 1).

**Рис. 5.** Снимки образцов (а) – КРШ–Р–400А/В, (б) – КРШ–Р–500А/В и (в) – КРШ–Р–500В/А, полученных методом СЭМ.

3.4. Элиминация провоспалительных цитокинов химически активированными углеродными адсорбентами

Профили степени сорбции TNF- α , IL-6 и IL-8 углеродными адсорбентами в различные промежутки времени представлены на рис. 6–8. Скорость, с которой происходило удаление цитокинов, варьировалась между исследованными углеродными адсорбентами, а также между тремя цитокинами. Наибольшие значения удельной поверхности СБЭТ (1791 м²/г) и объем пор VDFT (1,84 см³/г) образца КРШ–Р–400А/В коррелируют со степенью сорбции TNF- α , IL-6 и IL-8. Образец КРШ–Р–500А/В стабильно снижал концентрацию TNF- α на протяжении всего времени сорбции. Степень сорбции образца КРШ–Р–500В/А составила наименьшее значение по отношению к TNF- α в сравнении со всеми исследуемыми углеродными адсорбентами и углеродом TE7 от MAST Carbon (рис. 6). Согласно литературным данным, адсорбция TNF- α , по-видимому, является наиболее проблематичной в связи с большой молекулярной массой и размерами тримера [15].

Процент удаления IL-6 сравнительно выше для образцов КРШ–Р–400А/В и КРШ–Р–500А/В и имеет подобный характер сорбции, как и для молекулы TNF- α . Для образца КРШ–Р–500В/А также наблюдается слабая сорбция IL-6 в сравнении со всеми исследуемыми образцами и углеродом TE7 от MAST Carbon (рис. 7).

Скорость удаления цитокина IL-8 наибольшая для всех образцов, однако наилучшие показатели у образцов КРШ–Р–400А/В и КРШ–Р–500А/В.

Образец КРШ–Р–500В/А, несмотря на высокую удельную поверхность СБЭТ и другие сопостави-

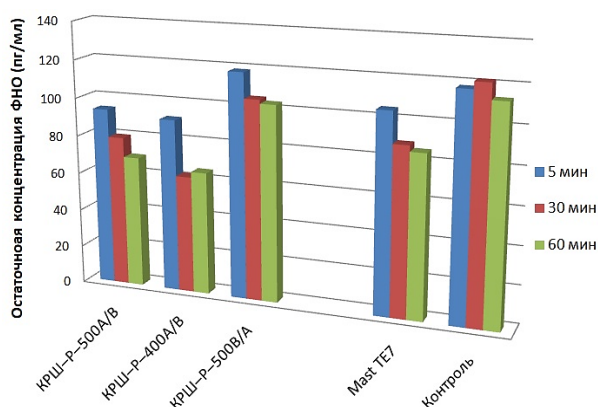


Рис. 6. Остаточная концентрация воспалительного цитокина TNF- α в различные промежутки времени (5, 30, 60 мин) образцами адсорбентов по сравнению с положительным контролем (без адсорбента).

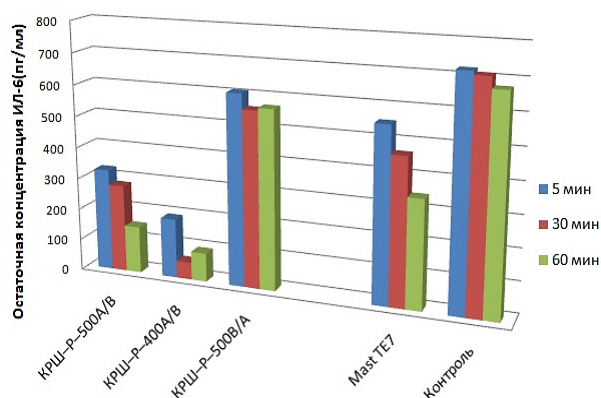


Рис. 7. Остаточная концентрация воспалительного цитокина IL-6 в различные промежутки времени (5, 30, 60 мин) образцами адсорбентов по сравнению с положительным контролем (без адсорбента).

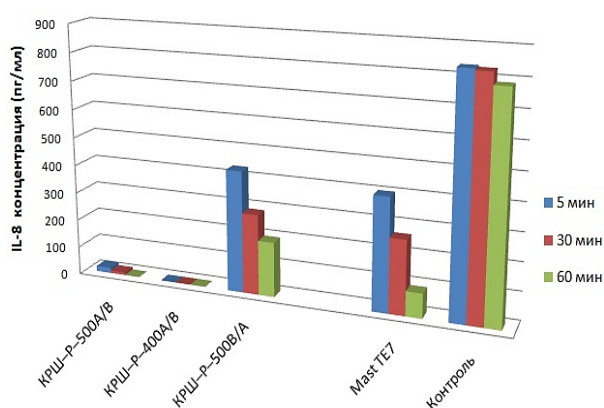


Рис. 8. Остаточная концентрация воспалительного цитокина IL-8 в различные промежутки времени (5, 30, 60 мин) образцами адсорбентов по сравнению с положительным контролем (без адсорбента).

мые текстурные характеристики, имеет самые низкие показатели сорбции. Согласно данным дифференциального распределения пор по размерам (рис. 4), образец характеризуется наибольшим пиком в диапазоне микропор 1 нм, которые очевидно не работают для сорбции крупных соединений цитокинов TNF- α и IL-6, хотя доля микропор в образце КРШ–Р–500В/А наибольшая: значение VDR/VDFT составило 0,49 (табл. 1).

Сорбция исследованных цитокинов может протекать по донорно-акцепторному механизму через функциональные группы. Цитокины содержат аминокислоты, обладающие пространственно разделенными зарядами, формирующими цвиттер-ионную структуру [16–17]. Кроме того, такие аминокислоты, как аргинин, лизин и гистидин, имеют дополнительную NH₂-группу в радикале и в нейтральной среде приобретают положительный заряд. Фосфатные группы на поверхности активированных сорбентов -C-O-PO₃-

могут взаимодействовать с азотсодержащими группами этих аминокислот NH_3^+ , что определяет хемосорбцию. Цитокины, содержащие ароматические и пятичленные кольца, включающими гетероатомы S или N (такие как фенилаланин, триптофан или гистезин), могут сорбироваться посредством дисперсионных π - π взаимодействий, электрон-донорно-акцепторных взаимодействий и образования водородной связи. Первый механизм основан на дисперсионных силах между электронами фенольного кольца и электронами графитизированной поверхности исследуемых сорбентов. Второй механизм предполагает образование донорно-акцепторного комплекса между поверхностными электрон-донорными группами (например, карбонилами) и ароматическим кольцом, которое действует как электроноакцептор. Образование водородной связи происходит за счет взаимодействия водорода гидроксильных групп аминокислотных колец с поверхностными кислородсодержащими группами адсорбента. С увеличением размеров молекулы на сорбцию, вероятно, влияет стерический фактор, поэтому сорбционная способность исследованных образцов в отношении IL-6 и особенно TNF- α снижается в сравнении с наименьшим соединением IL-8. Для адсорбции таких крупных молекул необходима комбинация текстурных параметров сорбента: соответствующий размер и объем пор, предполагающий наличие больших объемов как мезо-, так и макропор, дополняющих общую удельную поверхность.

4. Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало влияние методики синтеза на текстурные характеристики полученных сорбентов, определенные с использованием методов низкотемпературной адсорбции азота и ртутной порометрии.

Профиль адсорбции воспалительных цитокинов показал, что полученные образцы углеродных сорбентов КРШ–Р–500А/В и КРШ–Р–400А/В способны удалять значимые уровни концентраций молекул TNF- α , IL-6 и IL-8 по сравнению с образцом КРШ–Р–500В/А и коммерческим углем TE7 компании MAST Carbon. Образец КРШ–Р–500В/А отличается порядком синтеза и соотношением размера и объема пор, менее соответствующим требованиям сорбции относительно крупных молекул воспалительных цитокинов TNF- α и ИЛ-6. Образец КРШ–Р–400А/В проявил более высокую скорость сорбции, однако обра-

зец КРШ–Р–500А/В показал лучшую динамику и обеспечивал сорбцию исследуемых цитотоксинов в течение всего времени эксперимента.

Таким образом, исследованные адсорбенты КРШ–Р–500А/В и КРШ–Р–400А/В продемонстрировали способность удалять клинически значимые концентрации IL-6 и IL-8.

Благодарность

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

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Jandosov J., Berillo D., Misra A., Alavijeh M., Chenchik D., Baimenov A., Bernardo M., Azat S., Mansurov Z., Silvestre-Albero J., Mikhlovsky S. Biomass-derived nanoporous carbon honeycomb monoliths for environmental lipopolysaccharide adsorption from aqueous media // *Int. J. Mol. Sci.* – 2025. – Vol. 26. – P. 952.
- [2]. Schulte W., Bernhagen J., Bucala R. Cytokines in sepsis: potent immunoregulators and potential therapeutic targets – an updated view // *Mediators Inflamm.* – 2013. – Vol. 2013. – P. 1155-1172.
- [3]. Parameswaran N., Patial S. Tumor necrosis factor- α signaling in macrophages // *Crit. Rev. Eukaryot. Gene Expr.* – 2010. – Vol. 20, № 2. – P. 87-103.
- [4]. Somers W., Stahl M., Seehra J.S. 1.9 Å crystal structure of interleukin-6: implications for a novel mode of receptor dimerization and signaling // *EMBO J.* – 1997. – Vol. 16, № 5. – P. 989-997.
- [5]. Clore G.M., Appella E., Yamada M., Matsushima K., Gronenborn A.M. Three-dimensional structure of interleukin-8 in solution // *Biochemistry.* – 1990. – Vol. 29, № 7. – P. 1689-1696.
- [6]. Eck M.J., Sprang S.R. The structure of tumor necrosis factor- α at 2.6 Å resolution: implications for receptor binding // *J. Biol. Chem.* – 1989. – Vol. 264, № 29. – P. 17595-17605.
- [7]. Nijsten M.W.N., Hack C.E., Helle M., Ten Duis H.J., Klasen H.J., Aarden L.A. Interleukin-6 and its relation to the humoral immune response and clinical parameters in burned patients // *Surgery.* – 1991. – Vol. 109, № 6. – P. 761-767.

- [8]. Baldwin E.T., Weber I.T., St Charles R., Xuan J.C., Appella E., Yamada M., Matsushima K., Edwards B.F., Clore G.M., Gronenborn A.M. Crystal structure of interleukin-8: symbiosis of NMR and crystallography // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 1991. – Vol. 88. – P. 502-506.
- [9]. Cozzolino M., Magagnoli L., Ciceri P. From physicochemical classification to multidimensional insights: a comprehensive review of uremic toxin research // *Toxins.* – 2025. – Vol. 17. – P. 295.
- [10]. Pavlenko D., Giasafaki D., Charalambopoulou G., et al. Carbon adsorbents with dual porosity for efficient removal of uremic toxins and cytokines from human plasma // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 14914.
- [11]. Jandosov J.M., Mansurov Z.A., Bijsenbayev M.A., Tulepov M.I., Ismagilov Z.R., Shikina N.V., Ismagilov I.Z., Andrievskaya I.P. Synthesis of microporous–mesoporous carbons from rice husk via H₃PO₄-activation // *Adv. Mater. Res.* – 2013. – Vols. 602-604. – P. 85-89.
- [12]. Gregg S.J. Adsorption, surface area and porosity. – London: Academic Press, 1982.
- [13]. Thommes M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials // *Chem. Ing. Tech.* – 2010. – Vol. 82, № 7. – P. 1059-1073.
- [14]. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // *J. Am. Chem. Soc.* – 1938. – Vol. 60, № 2. – P. 309-319.
- [15]. Reed C., Fu Z.Q., Wu J., Xue Y.N., Harrison R.W., Chen M.J., Weber I.T. Crystal structure of TNF- α mutant R31D with greater affinity for receptor R1 compared with R2 // *Protein Eng.* – 1997. – Vol. 10. – P. 1101-1107.
- [16]. Brat D.J., Bellail A.C., Van Meir E.G. The role of interleukin-8 and its receptors in gliomagenesis and tumoral angiogenesis // *Neuro Oncol.* – 2005. – Vol. 7, № 2. – P. 122-133.
- [17]. Clogston C.L., Boone T.C., Crandall B.C., Mendiaz E.A., Lu H.S. Disulfide structures of human interleukin-6 are similar to those of human granulocyte colony stimulating factor // *Arch. Biochem. Biophys.* – 1989. – Vol. 272, № 1. – P. 144-151.
- [2]. W. Schulte, J. Bernhagen, R. Bucala. Cytokines in Sepsis: Potent Immunoregulators and Potential Therapeutic Targets - An Updated View, *Mediators Inflamm.* 2013 (2013) 1155-1172. <https://doi.org/10.1155/2013/165974>.
- [3]. N. Parameswaran, S. Patial. Tumor necrosis factor- α signaling in macrophages, *Crit. Rev. Eukaryot. Gene Expr.* 20 (2010) 87-103. <https://doi.org/10.1615/CritRevEukarGeneExpr.v20.i2.10>.
- [4]. W. Somers, M. Stahl, J.S. Seehra. 1.9 Å crystal structure of interleukin-6: implications for a novel mode of receptor dimerization and signaling, *EMBO J.* 16 (1997) 989-997. <https://doi.org/10.1093/emboj/16.5.989>.
- [5]. G.M. Clore, E. Appella, M. Yamada, et al. Three-dimensional structure of interleukin-8 in solution, *Biochemistry* 29 (1990) 1689-1696. <https://doi.org/10.1021/bi00459a004>.
- [6]. M.J. Eck, S.R. Sprang. The structure of tumor necrosis factor- α at 2.6 Å resolution: Implications for receptor binding, *J. Biol. Chem.* 264 (1989) 17595-17605. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)71533-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)71533-0).
- [7]. M.W.N. Nijsten, C.E. Hack, M. Helle, et al. Interleukin-6 and its relation to the humoral immune response and clinical parameters in burned patients, *Surgery* 109 (1991) 761-767.
- [8]. E.T. Baldwin, I.T. Weber, R. St Charles, et al. Crystal structure of interleukin-8: symbiosis of NMR and crystallography, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88 (1991) 502-506. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.2.502>.
- [9]. M. Cozzolino, L. Magagnoli, P. Ciceri. From Physicochemical Classification to Multidimensional Insights: A Comprehensive Review of Uremic Toxin Research, *Toxins* 17 (2025) 295. <https://doi.org/10.3390/toxins17060295>.
- [10]. D. Pavlenko, D. Giasafaki, G. Charalambopoulou, et al. Carbon Adsorbents With Dual Porosity for Efficient Removal of Uremic Toxins and Cytokines from Human Plasma, *Sci. Rep.* 7 (2017) 14914. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15116-y>.
- [11]. J.M. Jandosov, Z.A. Mansurov, M.A. Bijsenbayev, et al. Synthesis of microporous-mesoporous carbons from rice husk via H₃PO₄-activation, *Adv. Mater. Res.* 602-604 (2013) 85-89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.85>.
- [12]. S.J. Gregg. Adsorption, Surface Area and Porosity, Academic Press, London, 1982.
- [13]. M. Thommes. Physical adsorption characterization of nanoporous materials, *Chem. Ing. Tech.* 82

References

- [1]. J. Jandosov, D. Berillo, A. Misra, et al. Biomass-Derived Nanoporous Carbon Honeycomb Monoliths for Environmental Lipopolysaccharide Adsorption from Aqueous Media, *Int. J. Mol. Sci.* 26 (2025) 952. <https://doi.org/10.3390/ijms26030952>.

- (2010) 1059-1073. <https://doi.org/10.1002/cite.201000064>.
- [14]. S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller. Adsorption of gases in multimolecular layers, J. Am. Chem. Soc. 60 (1938) 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
- [15]. C. Reed, Z.Q. Fu, J. Wu, et al. Crystal structure of TNF- α mutant R31D with greater affinity for receptor R1 compared with R2, Protein Eng. 10 (1997) 1101-1107. <https://doi.org/10.1093/protein/10.10.1101>.
- [16]. D.J. Brat, A.C. Bellail, E.G. Van Meir. The role of interleukin-8 and its receptors in gliomagenesis and tumoral angiogenesis, Neuro Oncol. 7 (2005) 122-133. <https://doi.org/10.1215/S1152851704001061>.
- [17]. C.L. Clogston, T.C. Boone, B.C. Crandall, et al. Disulfide structures of human interleukin-6 are similar to those of human granulocyte colony-stimulating factor, Arch. Biochem. Biophys. 272 (1989) 144-151. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(89\)90205-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(89)90205-1).

Сведения об авторах

Ж.М. Жандосов – к.х.н. Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: jandosovj@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4397>

Д.И. Ченчик – к.х.н. Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: dmitriychenik@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-9982>

А.Ж. Байменов – к.х.н. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

E-mail: alzhan.baimenov@alumni.nu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6509-2087>

Е.О. Досжанов – доктор PhD, доцент кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию КазНУ имени аль-Фараби, ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: doszhanov_yerlan@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>

А.Н. Сабитов – к.х.н. Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: aitugans@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3677-8685>

А.Р. Керимкулова – к.х.н. Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: almusha_84@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-4970>

Н.К. Жылыбаева – к.х.н. Институт проблем горения, ведущий научный сотрудник лаборатории нанобиотехнологии, Алматы, Казахстан

E-mail: icp30@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8047-916X>

З.А. Мансуров – Институт проблем горения, научный руководитель института, советник генерального директора, Алматы, Казахстан

E-mail: zmansurov@kaznu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-216X>

Adsorption Studies of Chemically Activated Carbons Based on Lignocellulosic Raw Materials for the Elimination of Proinflammatory Cytokines

J.M. Jandosov¹, D.I. Chenchik^{1*}, A.Zh. Baimenov^{1,2}, Ye.O. Doszhanov^{1,3}, A.N. Sabitov^{1,4}, A.R. Kerimkulova^{1,2}, N.K. Zhylybayeva¹, Z.A. Mansurov^{1,3}

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

²Satbayev University, Satpayev st., 22, Almaty, Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh National University, al-Farabi ave., 71, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol' st., 114, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

In this study, the adsorption properties of carbon materials synthesized from rice husks for the elimination capacity of proinflammatory cytokines: tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleukins IL-6, and IL-8 was investigated. The sorbents were obtained by chemically activating rice husks impregnated with phosphoric acid in a 2:1 ratio for 1 hours at 400-500°C. The textural characteristics of the samples were examined using low-temperature nitrogen adsorption-desorption, mercury porosimetry, and scanning electron microscopy. The studied samples of carbon from carbonized rice husk (KRSh-R-400A/V, KRSh-R-500A/V) showed high adsorption results of inflammatory cytokines compared to commercial mesoporous spherical carbon TE7.

Keywords: activated carbon, textural characteristics, sorption, pro-inflammatory cytokines.

Қабынуға қарсы цитокиндерді жою үшін лигноцеллюлоза шикізатынан негізделген химиялық белсендірілген көмірдің адсорбциялық зерттеуі

Ж.М. Жандосов¹, Д.И. Ченчик^{1*}, А.Ж. Байменов^{1,2}, Е.О. Досжанов^{1,3}, А.Н. Сабитов^{1,4}, А.Р. Керимкулова^{1,2}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,3}

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

²Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Сәтбаев к., 22, Алматы, Қазақстан

³Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби д., 71, Алматы, Қазақстан

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

АҢДАТПА

Жұмыста күріш қауызынан синтезделген көміртекті материалдардың қабынуға қарсы цитокиндерге: Ісік некрозының факторы (TNF- α), интерлейкиндер IL-6 және IL-8 элиминация қабілеті үшін адсорбциялық сипаттамалары зерттелді. Сорбенттер 400-500 °C температурада 1 сағат ішінде 2:1 қатынасында фосфор қышқылына малынған күріш қауызын химиялық белсендіру арқылы алынды. Үлгілердің текстуралық сипаттамалары төмен температуралы адсорбция–азот десорбциясы, сынап порометриясы және сканерлеуші электронды микроскопия арқылы зерттелді. Көміртекті күріш қауызынан (КРШ–Р–400А/В, КРШ–Р–500А/В) зерттелген көмір үлгілері коммерциялық ТЕ7 мезопорозды сфералық көміртегімен салыстырғанда қабыну цитокиндерінің адсорбциясы үшін жақсы нәтиже көрсетті.

Түйін сөздер: белсендірілген көмір, текстуралық сипаттамалары, сорбциясы, қабынуға қарсы цитокиндер.