

## Исследование эффективности антибактериальных свойств компонентов карбонизированного материала для применения в бронетехнических системах

Е.А. Мұсатай\*, М.И. Тулепов

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

### Информация о статье

Получено  
11.06.2025

Получено в исправленном виде  
18.08.2025

Принято  
04.09.2025

#### Ключевые слова:

углеродные материалы;  
антибактериальные свойства;  
бронетехника; загрязнение  
воздуха; зона подавления;  
антагонистическая активность

### АННОТАЦИЯ

Загрязнение атмосферного воздуха – одна из наиболее актуальных экологических и социальных проблем современности. Научная новизна исследования заключается в разработке стандартизированных таблетированных форм углеродно-кремниевого материала с контролируемыми физико-химическими характеристиками и выраженным антимикробным действием. Метод сканирующей электронной микроскопии показал переход от неупорядоченной структуры исходного сырья к пористой аморфной поверхности после карбонизации при 850 °С. Рентгенофазовый анализ выявил наличие аморфного углерода со средним размером кристаллитов 0,5 нм, а ИК-спектроскопия подтвердила формирование Si-C связей, обусловленных повышением антибактериальной активности. Биологические испытания против *Bacillus paramycoides* и *Pseudomonas koreensis* выявили зоны подавления роста до 38 и 44 мм, соответственно, при этом индекс антагонистической активности достигал 77,4. Наиболее выраженный эффект проявился в отношении *Pseudomonas koreensis*, что подтверждает селективный характер антимикробного действия сорбента. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале разработанных сорбентов как функциональных фильтрующих материалов для систем жизнеобеспечения, в том числе в замкнутых пространствах, где необходима комплексная защита от аэрозольных и биологических угроз.

### 1. Введение

Загрязнение атмосферного воздуха остается одной из наиболее острых экологических проблем современности, оказывая значительное негативное воздействие на здоровье человека, климат и экосистемы [1, 2]. Атмосферный воздух может содержать широкий спектр вредных газообразных примесей, включая соединения серы и азота (такие как диоксид серы (SO<sub>2</sub>), сульфат-анионы (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), нитрат-анионы (NO<sub>3</sub>-), оксиды углерода (например, угарный газ (CO), формальдегид (НСОН), а также различные летучие органические соединения. Интенсивное развитие промышленности, рост автомобильного парка и техногенные выбросы способствуют увеличению концентрации твердых частиц и токсичных газов, что требует поиска эффективных методов их нейтрализации.

Традиционные способы очистки, такие как механические фильтры, адсорбенты на основе активированного угля и каталитические системы, обеспечивают лишь частичное снижение загрязнителей и обладают рядом ограничений – высокой стоимостью, сниженной эффективностью в замкнутых пространствах и трудностями утилизации [3-5]. В последние годы внимание исследователей привлекают наноструктурированные материалы и композиты, сочетающие высокую удельную поверхность с функциональной модификацией [6]. Среди них особый интерес представляют углеродно-кремниевые сорбенты, обладающие перспективными свойствами в отношении как пылеулавливания, так и антимикробного действия [7-9].

Целью настоящего исследования являются разработка и оценка эффективности карбонизи-

\*Corresponding author: Y.A. Mussatay; E-mail address: esenshon104@mail.ru

рованных углерод-кремниевых сорбентов, обладающих улучшенными сорбционными и бактерицидными свойствами, для применения в системах очистки воздуха и воды, включая замкнутые пространства и критически важные объекты. Угольные воздушные фильтры основаны на использовании активированного угля – пористого материала с высокой удельной поверхностью, способного эффективно адсорбировать газообразные загрязнители, запахи и летучие органические соединения. Основным механизмом работы таких фильтров заключается в физико-химической адсорбции: вредные молекулы фиксируются на поверхности углеродных пор и тем самым удаляются из воздушного потока. Современные технологии фильтрации способствуют увеличению эффективности таких систем за счет модификации углеродных материалов и применения новых конструктивных решений [10, 11].

Настоящая работа включает описание методики синтеза и карбонизации углерод-кремниевых сорбентов, результаты их физико-химического анализа и микробиологических испытаний, а также оценку влияния состава на сорбционные и антимикробные свойства материалов. Особое внимание уделено сопоставлению полученных результатов с литературными данными и оценке потенциала практического применения разработанных композитов.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1 Синтез углеродных материалов из рисовой шелухи методом карбонизации

Синтез углеродных материалов из рисовой шелухи включал последовательные стадии предварительной обработки, карбонизации и активации. На первом этапе исходное сырье промывали и подвергали обработке раствором KOH ( $C_{\text{KOH}}=10\%$  при соотношении 4 мл раствора на 1 г шелухи), что обеспечивало удаление минеральных примесей и частичное разрыхление структуры. После высушивания материал подвер-

гали термохимической переработке. Карбонизацию проводили путем пиролиза рисовой шелухи в атмосфере углекислого газа без доступа воздуха в интервале температур 600–850 °C при изотермической выдержке 60 мин. В указанных условиях происходили процессы удаления летучих компонентов, дегидратации, декарбонизации и образования пиролизных смол, сопровождающиеся повышением содержания углерода и формированием углеродной матрицы с развитой пористой структурой.

На следующем этапе проводили активацию полученного углеродного материала при температурах 650–800 °C в атмосфере CO<sub>2</sub> в течение 45–60 мин. Данный процесс способствовал удалению аморфного углерода и развитию мезо- и макропористой структуры. Показано, что объем мезо- и макропор возрастает с увеличением температуры, а удельная поверхность, определенная методом низкотемпературной термодесорбции азота, достигает максимального значения при 700 °C. При дальнейшем повышении температуры наблюдается частичное спекание структуры, приводящее к снижению удельной поверхности [12].

На рис. 1 представлена схема последовательного проведения стадий термохимической переработки рисовой шелухи [13]. Процесс включает дегидратацию исходного сырья при температурах до 270 °C, термолиз и образование углеродной структуры в интервале температур 600–850 °C, а также активацию при повышенных температурах, которая способствует развитию пористой структуры и улучшению физико-химических свойств получаемых материалов.

### 2.2 Анализ морфологических и спектроскопических свойств углеродного материала

Изучение микроструктурной поверхности карбонизированной рисовой шелухи позволяет определить ее функциональные свойства при использовании в пиротехнических композициях. Одним из наиболее эффективных методов анализа поверхностной структуры является сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Этот метод позволяет



Рис. 1. Схема термохимического получения углеродных материалов из рисовой шелухи.

выполнять количественный морфологический анализ и проводить измерения линейных параметров микроструктуры поверхности твердых тел. Морфология и структура частиц изучались методом электронной микроскопии. Микрофотографии частиц были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta 3D 200i Dual system (FEI, КазНУ, ННЛОТ).

Перед термической обработкой образцы исследовали методом СЭМ (рис. 2). При увеличении  $\times 27$  раз (масштаб 500 мкм) видна общая структура поверхности, а при увеличении  $\times 95$  раз (масштаб 200 мкм) различимы отдельные бороздки и волосовидные элементы. Также заметны посторонние частицы, что подтверждает неоднородность материала и необходимость последующей обработки.

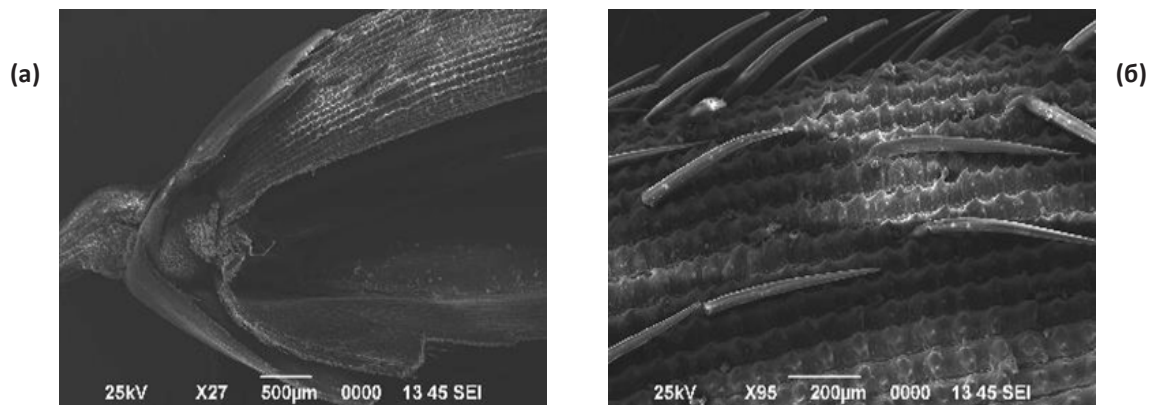


Рис. 2. СЭМ-изображения образца до карбонизации при масштабах (а) 200 и (б) 500 мкм.

После обработки образца при температуре 850 °С (рис. 3) поверхность материала становится аморфной и пористой. При масштабе 50 мкм заметны дефекты и разрушение исходной структуры, а при 20 мкм фиксируется развитие пористой матрицы с нерегулярным распределением частиц. Наблюдаемая пористая структура и аморфность материала напрямую определяют его сорбционные свойства, обеспечивая эффективное удержание газообразных загрязнителей и развитие зон контакта с микроорганизмами.

Морфологический анализ сканирующим электронным микроскопом был дополнен рентгенофазовым анализом для определения фазового состава и размера кристаллитов карбонизированного материала. Для определения фазовой

структуры и среднего размера кристалла провели оценку с использованием рентгеновской дифракционной (XRD) спектрометрии. Рентгеновские дифракционные измерения порошковых образцов проводили на дифрактометре Rigaku (SmartLab® X-ray (Tokyo, Japan), оснащенный линейным твердофазным детектором X'Celerator, с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения и никелевого фильтра. В рентгенофазовом анализе для идентификации конкретной кристаллической фазы принципиальным является набор положений пиков, так как при совпадении положений пиков различие в соотношении их высот может быть обусловлено наличием текстуры в образце. По результатам рентгенофазового анализа углеродных материалов можно сделать вывод, что в образце

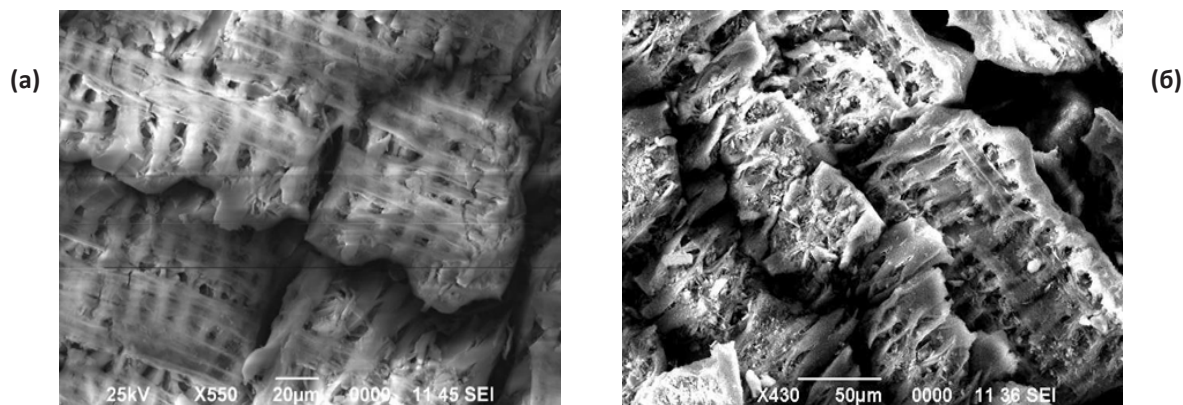


Рис. 3. СЭМ-изображения образца после карбонизации при масштабах (а) 20 и (б) 50 мкм.

наблюдаются аморфные фазы, о чем свидетельствует наличие широкого неструктурированного диффузного максимума, характерного для аморфного углерода.

Расчет среднего размера частицы по интегральной ширине дифракционной линии определяли по формуле Дебай-Шеррера [14].

$$D = \frac{k_x \cdot \lambda}{\beta_{2\theta} \cdot \cos \theta'} \quad (1)$$

где:  $D$  – средний размер частиц, нм;  $k_x$  – константа Шеррера;  $\lambda$  – длина волны источника рентгеновского излучения;  $\beta_{2\theta}$  – относительная интенсивность, %.

Результаты рентгенофазового анализа представлены в табл. 1.

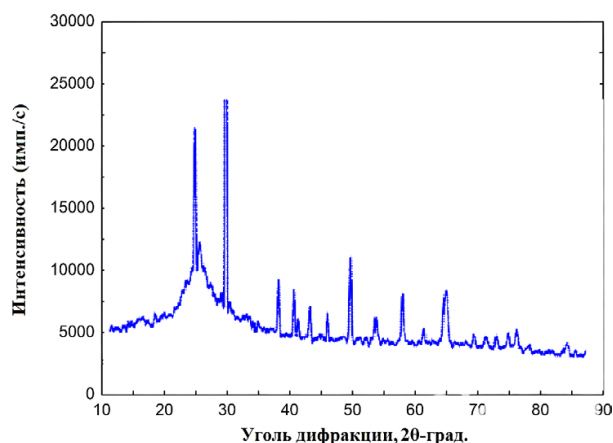
Структурные характеристики материалов подтверждаются рентгеноструктурным анализом (рис. 4). Средний размер частиц по наиболее интенсивному пику составляет 0,5 нм. Дифракционные формы соответствуют разным полиморфным модификациям углеродного соединения. Размер частиц, пористость и состав материала определяют его сорбционные свойства и эффективность подавления роста бактерий.

**Таблица 1.** Положения ( $2\theta$ ) и относительные интенсивности основных дифракционных пиков

$\cos \theta$ , град.	$\beta_{2\theta}$ – относительная интенсивность, %	$D$ – средний размер частиц, нм
25,1	95,2	0,15
28,5	83,6	0,17
41,5	72,3	0,21
42,3	71,7	0,21
45,9	39,6	0,39
50,6	29,7	0,53
54,7	54,5	0,29
58,3	52,7	0,31
61,2	19,9	0,84
62,2	16,6	1,12
65,1	15,9	1,23
Средний размер частиц		0,5

Для оценки наличия реакционноспособных функциональных групп в полученных углеродных сорбентах проводили исследования методом ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 5).

Из ИК-измерений видно, что на линии  $3445 \text{ см}^{-1}$  показаны основные С-Н связи, присущие углеродным пористым структурам, на  $1420 \text{ см}^{-1}$  – ли-



**Рис. 4.** XRD-дифрактограмма образца углеродных материалов.

нии растяжения двуокиси углерода, далее линия  $875 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая С-С связи, на линии  $712,54 \text{ см}^{-1}$  сосредоточены связи SiC. Таким образом, ИК-линии поглощения показывают, что в пористой структуре содержатся в основном углеродные, кислородные и кремниевые связанные структуры.

Обнаружение полосы поглощения, соответствующей углерод-кремниевой (Si-C) связи в ИК-спектре карбонизированного материала после его контакта с бактериальной культурой, свидетельствует о химической модификации поверхности, вероятно, за счет взаимодействия с кремнийсодержащими компонентами среды. Наличие данной функциональной группы коррелирует с появлением зоны подавления роста микроорганизмов, что позволяет предположить ее участие в формировании антибактериального эффекта. Полученные результаты указывают на то, что образование Si-C связей может опосредованно способствовать повышению биоцидных свойств углеродного материала за счет изменения его поверхностных характеристик, влияющих на адгезию и жизнеспособность бактериальных клеток. Степень инактивации функциональных групп, импрегнированных бактерицидами, определяется формированием углеродной матрицы с развитой пористостью.

### 2.3 Экспериментальное исследование воздействия сорбента на микробиологическую активность бактерий

Для оценки антибактериальной активности таблетированных форм сорбента использовали два бактериальных штамма – *Bacillus paramycooides* и *Pseudomonas koreensis* (табл. 2). Роды бактерий



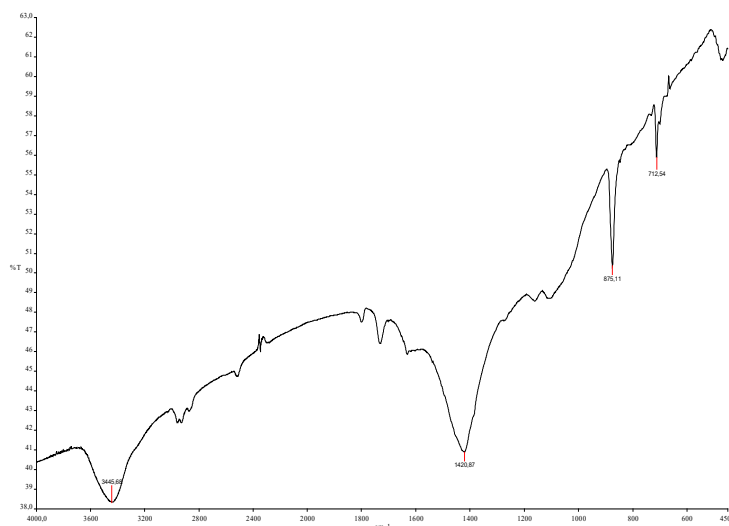
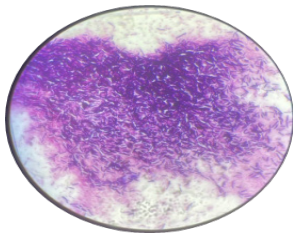
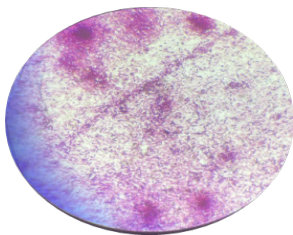


Рис. 5. ИК-спектр углеродных материалов.

*Bacillus* и *Pseudomonas* очень широко распространены в окружающей среде, воде, почве, воздухе, пищевых продуктах, обладают высокой устойчивостью к стрессовым факторам и адаптивностью к разным условиям. Эти особенности делают их оптимальными тест-объектами для исследования антибактериальных свойств сорбента. *Bacillus paramycooides* и *Pseudomonas koreensis*, изолированные из почвы, являются активными штаммами, так как участвуют во многих процессах в ризосфере и обладают потенциалом в сельском хозяйстве [15].

Чистые колонии бактерий пересеивали в стерильную жидкую питательную среду для получения суточной культуры. Инкубацию проводили в термошейкере (ThermoShaker TS-100) при температуре 35 °С и скорости вращения 150 об/мин в течение 24 ч. После инкубации рост культуры оценивали по оптической плотности с использованием спектрофотометра (APEL PD-303, диапазон 320-1100 нм, точность ±0,001 OD). Далее 10 мкл жидкой бактериальной суспензии наносили на поверхность твердой питательной среды (агар-агар), разлитой в чашки Петри, и равно-

Таблица 2. Макро- и микроморфологические характеристики идентифицированных штаммов бактерий из музейной культуры

№	Название штамма	Макроморфологические характеристики	Микроморфологические характеристики
1	<i>Bacillus paramycooides</i>	Белая колония, образует гифы на твердой среде, края и поверхность колонии неровные	Грамположительная, крупная палочковидная морфология
			
2	<i>Pseudomonas koreensis</i>	Колония бледно-желтого цвета, средней консистенции, с гладкой поверхностью и ровным краем	Грамотрицательная, морфология палочки
			

мерно распределяли по поверхности методом Дригальского для получения сплошного бактериального газона. После этого в центр чашки устанавливали таблетку с исследуемым веществом. Посевы инкубировали в термостате (Binder BD 115) при температуре 35 °С в течение 24 ч [16].

Для культивирования бактерий использовали мясо-пептонный агар (МПА) и мясо-пептонный бульон (МПБ), приготовленные по стандартной методике. Состав МПА (г/л): пептон – 5,0; NaCl – 5,0; мясной экстракт – 1,5; дрожжевой экстракт – 1,5; агар – 15,0. Состав МПБ (г/л): мясной экстракт – 10,0; пептон ферментативный – 10,0; NaCl – 5,0. Готовые среды разливали по стерильным чашкам Петри (15-20 мл) и оставляли при комнатной температуре до полного застывания.

Посев бактериальных культур осуществляли штриховым методом с использованием стерильной бактериологической петли. Инкубацию чашек Петри проводили при температуре 35 °С в течение 24-48 ч. В качестве сорбентов применяли четыре различных состава: 50% раствор J<sub>2</sub>, 10% раствор J<sub>2</sub>, раствор Люголя и 5% раствор Nazar. Оценку антимикробной активности проводили методом диффузии в агар с использованием бумажных дисков, пропитанных соответствующими растворами, с последующим измерением диаметра зон ингибирования роста бактерий.

Гидравлический пресс использовали для формирования таблеток из сорбента с целью стандартизации их массы, размера и плотности перед проведением антимикробных испытаний. Порошкообразные образцы сорбента конвертировали в форму таблеток для упрощения эксплуатации во время дальнейших экспериментов с помощью гидравлического пресса (Specac, модель XYZ) при давлении до 20 атм, время прессования регулировали в зависимости от условий (рис. 6).

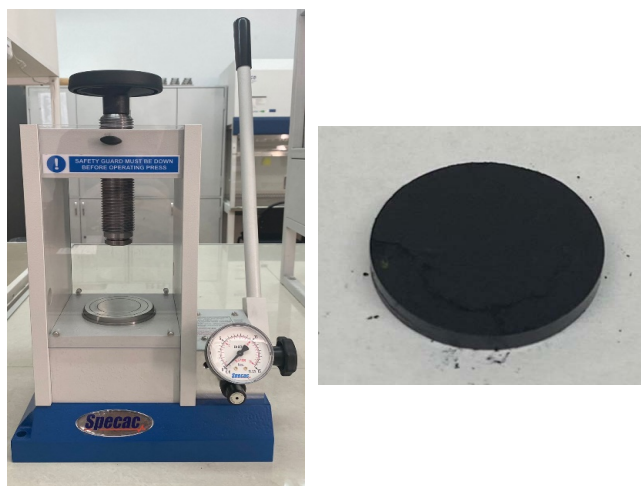


Рис. 6. Гидравлический пресс (Specac, модель XYZ).

Для всех образцов навеску порошкообразного сорбента массой 0,5 г подвергали прессованию при давлении 10 атм в течение 5 мин (рис. 7).

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава сорбента с целью повышения его антибактериальных свойств. Такая оптимизация имеет решающее значение для применения в областях, требующих высокой степени защиты от бактериального заражения. На основе этих данных возможно целенаправленное модифицирование состава сорбента, что позволит повысить его эффективность и расширить возможности использования, включая медицинские изделия, системы очистки воды и упаковку пищевых продуктов.

В данном исследовании бактериальные культуры выращивали в термостате на твердой питательной среде с добавлением таблеток сорбента различного состава для оценки их антибактериальной активности. Установлено, что варианты 2 и 3 обладали выраженным антибактериальным действием и эффективно подавляли рост бактерий, тогда как варианты 1 и 4 не проявили подобного эффекта в специальных условиях. Это различие подчеркивает ключевую роль состава сорбента в обеспечении его антибактериальной эффективности.

В табл. 3 представлены данные, показывающие, что различные составы сорбента вызывали разную степень подавления роста бактерий, что отражалось в размерах зон ингибирования.

Для подтверждения одинаковой исходной концентрации клеток перед экспериментом была измерена оптическая плотность культур с 3 повторениями после 24 ч инкубирования в жидкой среде. Полученные значения составили: *Bacillus paramycooides* – 0,125; *Pseudomonas koreensis* – 0,137.

Оптическую плотность бактериальных суспензий измеряли при длине волны 600 нм в видимой области спектра, что соответствует желто-оранжевой зоне поглощения. OD<sub>600</sub> применяется для оценки мутности культуры, так как при этой длине волны свет рассеивается бактериальными клетками без значительного влияния со стороны компонентов питательной среды. Для оценки антимикробной активности исследуемых образцов дополнительно проводили измерение радиуса зоны подавления роста бактерий на агаре. Зона подавления представляла собой светлый участок вокруг образца, в котором отсутствовал рост микроорганизмов. Радиус (R) этой зоны измеряли в миллиметрах от края диска с сорбентом до границы роста бактерий.

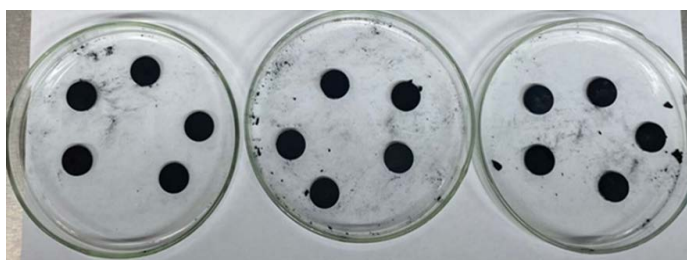
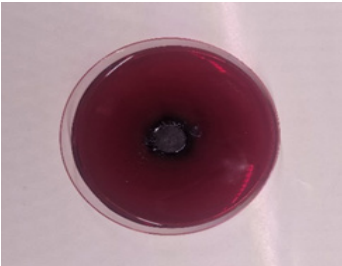

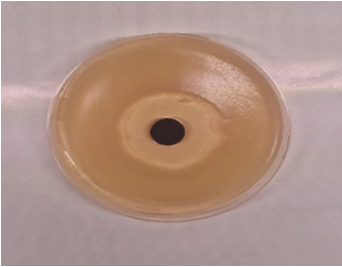
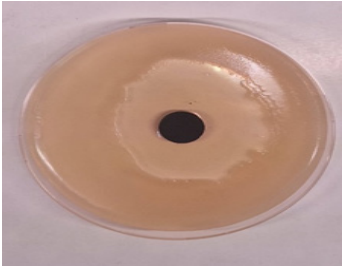
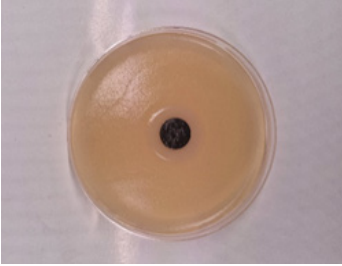
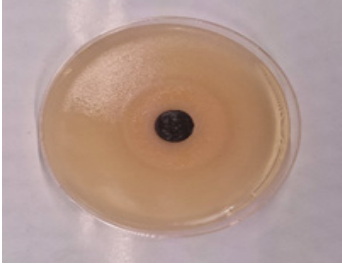
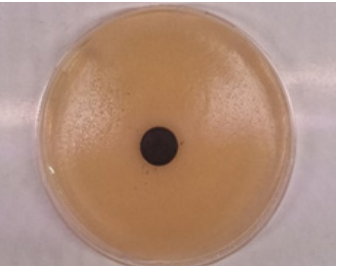
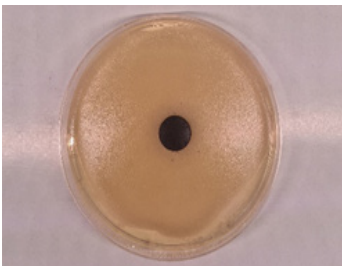


Рис. 7. Сорбентные таблетки, полученные методом прессования.

Таблица 3. Рисунки сорбентов на твердой питательной среде с бактериями

Штамм Варианты	<i>Bacillus paramycooides</i>	<i>Pseudomonas koreensis</i>
1	 <p>Изменение цвета агара из-за компонента. Разложение таблетки бактериями</p>	 <p>Изменение цвета агара из-за компонента. Разложение таблетки бактериями</p>
2	 <p>Зона подавления роста 38 мм</p>	 <p>Зона подавления роста 44 мм</p>
3	 <p>Зона подавления роста 10 мм, но штамм адаптировался и пророс через изначальную зону. Рост бактерий на таблетках</p>	 <p>Зона подавления роста 18 мм, но штамм адаптировался и пророс через изначальную зону. Рост бактерий на таблетках</p>
4	 <p>Нет изменений, отсутствует антибактериальная активность</p>	 <p>Нет изменений, отсутствует антибактериальная активность</p>

Для количественной оценки антагонистической активности [17] исследованных бактериальных штаммов использовали метод определения площади зоны подавления роста мишеней в питательной среде.

Антагонистическую активность определяли как отношение площади зоны подавления роста бактерий ( $S$ ) к площади таблетки сорбента ( $S_t$ ), что отражает индекс антагонистической активности [18].

Полученные результаты показали (табл. 4), что зона подавления, вызванная таблеткой у *Pseudomonas koreensis*, была на 34% больше по площади по сравнению с *Bacillus paramycoides*, что указывает на более выраженную антагонистическую активность действующего вещества в отношении *Pseudomonas koreensis* и ее повышенную чувствительность к нему.

С учетом выявленных свойств материал рассматривается в качестве перспективной основы для создания антибактериальных фильтрующих элементов в системах жизнеобеспечения бронетехники. В боевых условиях экипаж бронемашин может находиться длительное время в изолированном объеме, где существует риск накопления патогенных микроорганизмов в системе вентиляции и фильтрации воздуха. Это особенно актуально при угрозе применения биологических агентов или при эксплуатации техники в зараженных зонах.

Предлагается использование полученного материала в составе воздушных фильтров многоступенчатой очистки, где он будет выполнять двойную функцию:

- механическую фильтрацию аэрозольных и бактериальных частиц;
- активное подавление патогенной микрофлоры благодаря собственным антибактериальным свойствам.

Такой подход позволит повысить уровень санитарной безопасности внутри бронемашин, снизить риск заболеваний экипажа и повысить живучесть в условиях биологической угрозы.

### 3. Заключение

В работе разработаны углеродно-кремниевые сорбенты, синтезированные из рисовой шелухи посредством последовательных стадий обработки, карбонизации и активации, что позволило получить аморфную пористую структуру с развитой поверхностью и функциональными группами, включая Si-C связи. Морфологический (СЭМ) и спектроскопический (ИК, XRD) анализы подтвердили формирование структур, способных к химической модификации и взаимодействию с бактериальной средой.

Экспериментальная оценка антибактериальной активности таблетированных форм сорбента показала, что наиболее выраженное подавление роста бактерий наблюдается у варианта 2, вызывающего зоны ингибирования 38 мм (*Bacillus paramycoides*) и 44 мм (*Pseudomonas koreensis*), при этом зона подавления у *Pseudomonas koreensis* на 34% превышала аналогичное значение для *Bacillus paramycoides*, что свидетельствует о более высокой чувствительности данного штамма. Варианты 1 и 4 не проявили значимой активности, что указывает на необходимость оптимизации состава сорбента.

Научная новизна исследования заключается в разработке стандартизированных таблетированных форм углеродно-кремниевого материала с контролируемыми физико-химическими характеристиками и выраженным антимикробным действием. Практическая значимость работы подтверждается возможностью использования материала в системах очистки воздуха внутри бронетехники, где он будет выполнять двойную функцию: механическую фильтрацию аэрозольных частиц и активное подавление патогенной микрофлоры, что позволит повысить санитарно-гигиеническую безопасность экипажа и снизить риск заболеваний в условиях замкнутого объема и потенциальной биологической угрозы.

**Таблица 4.** Расчет площади зон подавления и эффективности

Штамм	Радиус зоны подавления, мм	Площадь зоны подавления, мм <sup>2</sup>	Индекс антагонистической активности
<i>Bacillus paramycoides</i>	38	4536,5	57,75
<i>Pseudomonas koreensis</i>	44	6082,1	77,44



**Список литературы (ГОСТ)**

- [1]. Vallero D.A. *Fundamentals of air pollution*. – Elsevier, 2007.
- [2]. Tsoli S., Ploubidis G.B., Kalantzi O.I. Particulate air pollution and birth weight: A systematic literature review // *Atmos. Pollut. Res.* – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 707–717.
- [3]. Park D.H., Joe Y.H., Piri A., An S., Hwang J. Determination of air filter anti-viral efficiency against an airborne infectious virus // *J. Hazard. Mater.* – 2020. – Vol. 402. – P. 122640.
- [4]. Roy A., Mishra C., Jain S., Solanki N. A review of general and modern methods of air purification // *J. Therm. Eng.* – 2018. – Vol. 4, № 5. – P. 1801–1815.
- [5]. Krigmont H.V. Development of the disinfecting air filter // *Lect. Notes Electr. Eng.* – 2023. – Vol. 991. – P. 351–358.
- [6]. Chen S.L., Chang S.W., Chen Y.J., Chen H.L. Possible warming effect of fine particulate matter in the atmosphere // *Commun. Earth Environ.* – 2021. – Vol. 2, № 1. – P. 1–8.
- [7]. Sun B., Lin J., Liu M., Li W., Yang L., Zhang L., Chen C., Sun D. In situ biosynthesis of biodegradable functional bacterial cellulose for high-efficiency particulate air filtration // *ACS Sustain. Chem. Eng.* – 2022. – Vol. 10, № 1. – P. 419–428.
- [8]. Al-Attabi R., Morsi Y., Schütz J.A., Cornu D., Maghe M., Dumée L.F. Flexible and reusable carbon nano-fibre membranes for airborne contaminants capture // *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 754. – P. 142231.
- [9]. Christopherson D.A., Yao W.C., Sedaghat A.R. High-efficiency particulate air filters in the era of COVID-19: Function and efficacy // *Otolaryngol. Head Neck Surg.* – 2020. – Vol. 163, № 1. – P. 3–9.
- [10]. Lim T.H., Yeo S.Y., Lee S.H. Multidirectional evaluations of a carbon air filter to verify their lifespan and various performances // *J. Aerosol Sci.* – 2018. – Vol. 123. – P. 38–45.
- [11]. Gao Y., Tian E., Zhang Y., Mo J. Utilizing electrostatic effect in fibrous filters for efficient airborne particles removal: Principles, fabrication, and material properties // *Appl. Mater. Today.* – 2022. – Vol. 27. – P. 101369.
- [12]. Nuraly A., Mutushev A., Tuleibayeva A., Gonzalez-Leal J.M. Experimental research on optimizing carbon materials for filtration applications in medicine // *Carbon Trends.* – 2024. – Vol. 15. – P. 100338.
- [13]. Askaruly K., Azat S., Sartova Z., Yeleuov M., Kerimkulova A., Bekseitova K. Obtaining and characterization of amorphous silica from rice husk // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2020. – Vol. 55, № 1.
- [14]. Беленов С.В., Гебретсадик В.Й., Гутерман В.Е., Волочаев В.В., Скибина Л.М., Лянгузов Н.В. Влияние ПАВ на морфологию и каталитическую активность электролитических осадков платины // *Конденсир. среды межфаз. границы.* – М., 2015. – С. 28–37.
- [15]. Minut M., Diaconu M., Roşca M., Cozma P., Bulgariu L., Gavrilesco M. Screening of *Azotobacter*, *Bacillus* and *Pseudomonas* species as plant growth-promoting bacteria // *Processes.* – 2023. – Vol. 11. – P. 80.
- [16]. Li Y., Biisembaev M., Gong Q., Aknazarov S., Lu F., Huang Y., Zhao X., Du K., Bai J., Gan J., et al. Preparation of lotus root-type monolithic-activated carbons with a hierarchical pore structure from rice husks and their adsorption of vitamin B12 // *ACS Omega.* – 2019. – Vol. 4. – P. 18930–18935.
- [17]. Nicholson W.L., Munakata N., Horneck G., Melosh H.J., Setlow P. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* – 2000. – Vol. 64. – P. 548–572.
- [18]. Liu Y., Zhang X., Zhao Y. *Bacillus paramycooides* sp. nov., a novel species isolated from industrial effluent // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* – 2017. – Vol. 67. – P. 2070–2075.

**References**

- [1]. D.A. Vallero. *Fundamentals of Air Pollution*, Elsevier, (2007). <https://doi.org/10.1016/B978-012373615-4/50005-4>.
- [2]. S. Tsoli, G.B. Ploubidis, O.I. Kalantzi. Particulate air pollution and birth weight: A systematic literature review, *Atmos. Pollut. Res.* 10 (2019) 707–717. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.016>.
- [3]. D.H. Park, Y.H. Joe, A. Piri, et al. Determination of air filter anti-viral efficiency against an airborne infectious virus, *J. Hazard. Mater.* 402 (2020) 122640. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122640>.
- [4]. A. Roy, C. Mishra, S. Jain, N. Solanki. A review of general and modern methods of air purification, *J. Therm. Eng.* 4 (2018) 1801–1815. <https://doi.org/10.18186/thermal.529054>.
- [5]. H.V. Krigmont. Development of the disinfecting air filter, *Lect. Notes Electr. Eng.* 991 (2023) 351–358. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-34526-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-34526-5_17).
- [6]. S.L. Chen, S.W. Chang, Y.J. Chen, H.L. Chen. Possible warming effect of fine particulate matter in the atmosphere, *Commun. Earth Environ.* 2 (2021) 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00278-5>.

- [7]. B. Sun, J. Lin, M. Liu, et al. In situ biosynthesis of biodegradable functional bacterial cellulose for high-efficiency particulate air filtration, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 10 (2022) 419–428. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c07532>.
- [8]. R. Al-Attabi, Y. Morsi, J.A. Schütz, et al. Flexible and reusable carbon nano-fibre membranes for airborne contaminants capture, *Sci. Total Environ.* 754 (2021) 142231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142231>.
- [9]. D.A. Christopherson, W.C. Yao, A.R. Sedaghat. High-efficiency particulate air filters in the era of COVID-19: Function and efficacy, *Otolaryngol. Head Neck Surg.* 163 (2020) 3–9. <https://doi.org/10.1177/0194599820941838>.
- [10]. T.H. Lim, S.Y. Yeo, S.H. Lee. Multidirectional evaluations of a carbon air filter to verify their lifespan and various performances, *J. Aerosol Sci.* 123 (2018) 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.09.009>.
- [11]. Y. Gao, E. Tian, Y. Zhang, et al. Utilizing electrostatic effect in fibrous filters for efficient airborne particles removal: Principles, fabrication, and material properties, *Appl. Mater. Today* 27 (2022) 101369. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101369>.
- [12]. A. Nuraly, A. Mutushev, A. Tuleibayeva, et al. Experimental research on optimizing carbon materials for filtration applications in medicine, *Carbon Trends* 15 (2024) 100338. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100338>.
- [13]. K. Askaruly, S. Azat, Z. Sartova, et al. Obtaining and characterization of amorphous silica from rice husk, *J. Chem. Technol. Metall.* 55 (2020).
- [14]. S.V. Belenov, V.Y. Gebretsadik, V.E. Guterman, et al. Influence of surfactants on morphology and catalytic activity of electrolytic platinum deposits, *Condens. Matter Interphase Bound. (Moscow)* (2015) 28–37.
- [15]. M. Minut, M. Diaconu, M. Rosca, et al. Screening of *Azotobacter*, *Bacillus* and *Pseudomonas* species as plant growth-promoting bacteria, *Processes* 11 (2023) 80. <https://doi.org/10.3390/pr11010080>.
- [16]. Y. Li, M. Biisembaev, Q. Gong, et al. Preparation of lotus root-type monolithic-activated carbons with a hierarchical pore structure from rice husks and their adsorption of vitamin B12, *ACS Omega* 4 (2019) 18930–18935. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03052>.
- [17]. W.L. Nicholson, N. Munakata, G. Horneck, et al. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 64(2000)548–572. <https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000>.
- [18]. Y. Liu, X. Zhang, Y. Zhao. *Bacillus paramycooides* sp. nov., a novel species isolated from industrial effluent, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 67 (2017) 2070–2075.

### Сведения об авторах

**Е.А. Мұсатай** – докторант 2-го курса, КазНУ им. аль-Фараби, кафедра химической физики и материаловедения, Алматы, Казахстан  
E-mail: esenshon104@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-3735-0886

**М.И. Тулепов** – кандидат химических наук, ассоциированный профессор кафедры химической физики и материаловедения, КазНУ им. аль-Фараби, факультет химии и химической технологии, Алматы, Казахстан  
E-mail: marat.tulepov@kaznu.kz  
ORCID: 0000-0002-6449-9571

## Study of the Effectiveness of Antibacterial Properties of Carbonised Material Components for Use in Armour Systems

Y.A. Mussatay\*, M.I. Tulepov

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

### ABSTRACT

Air pollution is one of the most pressing environmental and social issues of modern times. This work presents the development of carbonized carbon-silicon sorbents based on rice husk, combining high sorption capacity with pronounced antibacterial properties. The scientific novelty of the study lies in the comprehensive investigation of the material's morphology, phase composition, and functional groups, followed by an assessment of its biocidal activity. Scanning electron microscopy revealed a transition from the disordered structure of the raw material to a porous amorphous surface after carbonization at 850 °C. X-ray diffraction analysis showed the presence of amorphous carbon with an average crystallite size of 0.5 nm, while FTIR spectroscopy confirmed the formation of Si-C bonds, associated with enhanced antibacterial activity. Biological tests against *Bacillus paramycoides* and *Pseudomonas koreensis* demonstrated growth inhibition zones of up to 38 mm and 44 mm, respectively, with an antagonistic activity index reaching 77.4. The most pronounced effect was observed against *Pseudomonas koreensis*, confirming the selective nature of the sorbent's antimicrobial action. The results indicate the potential of the developed sorbents as functional filtering materials for life-support systems, including in confined spaces where comprehensive protection against aerosol and biological threats is required.

**Keywords:** carbon materials, antibacterial properties, armored vehicles, air pollution, suppression zone, antagonistic activity.

---

## Бронетехникалық жүйелерде қолдану үшін карбонизацияланған материал компоненттерінің бактерияға қарсы қасиеттерінің тиімділігін зерттеу

Е.А. Мұсатай\*, М.И. Тулепов

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

### АҢДАТПА

Атмосфералық ауаның ластануы – қазіргі заманның ең өзекті экологиялық және әлеуметтік мәселелерінің бірі болып табылады. Бұл жұмыста күріш қабығы негізінде жоғары сіңіру қабілеті мен айқын антибактериалды қасиеттерге ие көміртекті-кремнийлі сіңіргіштерді әзірлеу ұсынылған. Зерттеудің ғылыми жаңалығы - материалдың морфологиясын, фазалық құрамын және функционалды топтарын кешенді зерттеу және оның биоцидтік белсенділігін бағалау. Сканирлеуші электрондық микроскопия шикі материалдың ретсіз құрылымынан 850 °C температурада карбонизациядан кейінгі кеуекті аморфты бетке өтуді анықтады. Рентгенофазалық талдау орташа кристаллит мөлшері 0,5 нм болатын аморфты көміртектің бар екенін көрсетті, ал FTIR спектроскопия Si-C байланыстарының түзілуін растады, бұл антибактериалды белсенділіктің артуымен байланысты. *Bacillus paramycoides* және *Pseudomonas koreensis* бактерияларына қарсы биологиялық сынақтар 38 мм және 44 мм дейін өсудің тежелу аймақтарын көрсетті, ал антагонистік белсенділік индексі 77,4-ке жетті. Ең айқын әсер *Pseudomonas koreensis*-қа қатысты байқалды, бұл сіңіргіштің антибактериалды әсерінің селективті сипатын растайды. Алынған нәтижелер әзірленген сіңіргіштердің өмірді қолдау жүйелерінде, соның ішінде аэрозольдік және биологиялық қауіптерден кешенді қорғаныс қажет болған жабық кеңістіктерде функционалды сүзгілеуші материалдар ретінде әлеуетін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** көміртекті материалдар, бактерияға қарсы қасиеттер, бронетехника, ауа ластануы, тежелу аймағы, антагонистік белсенділік.