

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

Особенности взаимодействия красителя «метиленовый голубой» с сорбционным материалом, полученным на основе отхода регенерации машинных масел

Я.А. Мурзаханов, Ж.А. Сапронова , С.В. Свергузова ,А.В. Святченко  

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация

✉ sv.anastasiaa@mail.ru

EDN: WXGMMV

Аннотация

Введение. В условиях нарастающего загрязнения водных ресурсов органическими соединениями, в частности синтетическими красителями, актуальной задачей является разработка эффективных, экономически доступных и экологически безопасных сорбционных материалов. Несмотря на широкое применение активированных углей, глин и органоминеральных композитов, сохраняется необходимость поиска недорогих сорбентов на основе промышленных отходов. Перспективным направлением является использование глинистых шламов, образующихся при регенерации машинных масел, хотя их сорбционные свойства остаются недостаточно изученными. Целью настоящей работы было получение и исследование сорбционных характеристик материала на основе глинистого шламового отхода при удалении метиленового голубого из водных растворов.

Материалы и методы. Сорбционный материал получали путём термической обработки замасленного глинистого шлама при различных температурах с выбором оптимального режима. Пористую структуру исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота, применяя модели БЭТ, t-Plot и ВЖН. Сорбционные свойства оценивали на модельных растворах метиленового голубого фотоколориметрическим методом при длине волны 670 нм. Адсорбционную ёмкость и эффективность очистки рассчитывали стандартными методами, а изотермы сорбции аппроксимировали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича.

Результаты исследования. Установлено, что образец, термообработанный при 400 °С (ГШ400), обладает развитой мезопористой структурой с удельной поверхностью 69,148 м²/г и общим объёмом пор 0,159 см³/г. Средний диаметр пор составляет примерно 4–6 нм, микропоры отсутствуют. Материал демонстрирует высокую активность в адсорбции метиленового голубого, обеспечивая эффективное обесцвечивание растворов с максимальной сорбционной ёмкостью 0,139 ммоль/г (44,8 мг/г). Процесс сорбции наиболее адекватно описывается моделью Ленгмюра ($R^2 = 0,9645$), указывая на монослойный характер адсорбции. Рассчитанная энергия адсорбции (9,608 кДж/моль) свидетельствует о преобладании физического механизма взаимодействия.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что высокая сорбционная активность обусловлена формированием мезопористой структуры в процессе термообработки. Преобладание пор диаметром 4–6 нм обеспечивает доступность активной поверхности для молекул красителя, а наличие гистерезиса указывает на вклад капиллярной конденсации в удержание сорбата. Соответствие модели Ленгмюра свидетельствует об относительной однородности активных центров. Установленный физический характер адсорбции указывает на доминирование слабых межмолекулярных взаимодействий.

Заключение. Экспериментально подтверждена возможность эффективного использования термически модифицированного глинистого шламового отхода в качестве сорбента для очистки вод от катионных красителей. Материал ГШ400 обладает высокой сорбционной ёмкостью и обеспечивает эффективное удаление метиленового голубого из водных растворов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения разработанного сорбента в технологиях водоочистки и подчёркивают целесообразность утилизации промышленных отходов для получения функциональных материалов.

Ключевые слова: сорбент, очистка воды, сорбционная емкость, утилизация отхода

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования. Мурзаханов Я.А., Сапронова Ж.А., Свергузова С.В., Святченко А.В. Особенности взаимодействия красителя «метиленовый голубой» с сорбционным материалом, полученным на основе отхода регенерации машинных масел. Безопасность техногенных и природных систем. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):142–151. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

Original Empirical Research

Interaction of Methylene Blue with a Sorption Material Obtained from Engine Oil Regeneration Waste

Yan A. Murzakhanov, Zhanna A. Sapronova , Svetlana V. Sverguzova ,

Anastasia V. Svyatchenko ✉

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

✉ ivanov_ii@mail.ru

Abstract

Introduction. In light of the increasing pollution of water resources by organic compounds, particularly synthetic dyes, it is a pressing issue to develop effective, affordable, and environmentally friendly sorption materials. Despite the widespread use of activated carbons, clays, and organomineral composites, there remains a need to find low-cost sorbents based on industrial waste. One promising approach is the use of clay sludge generated during the regeneration of machine oil, but their sorption properties have not been sufficiently studied. The aim of this research was to obtain and characterize the sorption characteristics of a material based on clay sludge waste during the removal of methylene blue from aqueous solutions.

Materials and Methods. The sorption material was obtained by thermal treatment of oily clay sludge at various temperatures, with the optimal mode selected. Pore structure was studied by low-temperature nitrogen adsorption using BET, t-Plot, and BJH models. Sorption properties were evaluated using model methylene blue solutions and photocolometry at a wavelength of 670 nm. Adsorption capacity and purification efficiency were calculated using standard methods, and sorption isotherms were approximated using the Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich models.

Results. It was found that the sample (CS400) heat-treated at 400°C had a developed mesoporous structure with a specific surface area of 69.148 m²/g and a total pore volume of 0.159 cm³/g. The average pore diameter was approximately 4–6 nm, with no micropores present. The material demonstrated high sorption activity for methylene blue, effectively decolorizing solutions. The maximum sorption capacity reached 0.139 mmol/g (44.8 mg/g). The sorption process was best described by the Langmuir model ($R^2 = 0.9645$), indicating monolayer nature of adsorption. The calculated sorption energy (9.608 kJ/mol) suggested a predominance of physical interaction.

Discussion. The results obtained demonstrated that the high sorption activity of the material was due to the formation of a mesoporous structure during heat treatment. Pores with a diameter of 4–6 nm were predominant, which ensured accessibility of the active surface to dye molecules. Hysteresis indicated the contribution of capillary condensation to the sorbate retention process. The compliance with the Langmuir model indicated relative homogeneity of active sites. The established physical nature of adsorption suggested the predominance of weak intermolecular interactions.

Conclusion. The feasibility of the effective use of thermally modified clay sludge waste as a sorbent for the purification of water from cationic dyes has been experimentally confirmed. The CS400 material has been shown to have a high sorption capacity, effectively removing methylene blue from aqueous solutions. The obtained results demonstrated the potential of the developed sorbent for use in water treatment technologies and highlighted the feasibility of recycling industrial waste to produce functional materials.

Keywords: sorbent, water purification, sorption capacity, waste disposal

Acknowledgements. This research was conducted within the framework of the “Priority 2030” Program using the equipment of the High Technology Center of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For Citation. Murzakhanov YaA, Sapronova ZhA, Sverguzova SV, Svyatchenko AV. Interaction of Methylene Blue with a Sorption Material Obtained from Engine Oil Regeneration Waste. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):142–151. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

Введение. Концепция экологической безопасности заключается в защите населения от экологических опасностей, вызванных природными и антропогенными процессами, предотвращении истощения природных ресурсов и ликвидации растущего разрыва между спросом и предложением экологических благ. Загрязнение и дефицит водных ресурсов относятся к основным угрозам экологической безопасности. Роль чистоты воды для экосистем и здоровья человека невозможно переоценить, поскольку воздействие загрязняющих веществ может привести к серьёзным проблемам со здоровьем у населения и негативно повлиять на продовольственную безопасность [1].

По данным Всемирной организации здравоохранения, около 2 млрд человек в мире используют источники питьевой воды, загрязнённые химическими веществами [2], а к 2030 году глобальный спрос на пресную воду может превысить предложение на 40 % [3]. В промышленно развитых и развивающихся странах наблюдается устойчивая тенденция роста объёмов сточных вод, что усиливает нагрузку на водные экосистемы. Стремительное развитие технологий, промышленности и урбанизации существенно повлияло на состояние водных объектов во всём мире. Сброс сточных вод, содержащих красители из различных отраслей промышленности, представляет собой серьёзную экологическую проблему. Ежегодно в окружающую среду выбрасывается примерно 280 000 т красителей, что приводит к загрязнению водных ресурсов в глобальном масштабе [4]. Текстильная промышленность генерирует огромное количество загрязнённых стоков, содержащих сложную смесь красителей, поверхностно-активных веществ, солей и тяжёлых металлов. Помимо деградации окружающей среды, краситель-содержащие загрязнения оказывают глубокое негативное воздействие на местное население, особенно в развивающихся регионах. Загрязнённые источники воды снижают сельскохозяйственную производительность, наносят ущерб рыболовству и увеличивают расходы на здравоохранение [5].

В последние годы проблема очистки сточных вод от красителей приобретает особую актуальность в связи с ужесточением экологических нормативов и необходимостью достижения Целей устойчивого развития ООН (ЦУР 6 — «Чистая вода и санитария») [6]. Это требует разработки эффективных, экономически доступных и экологически безопасных методов очистки.

Большинство красителей в сточных водах являются гидрофильными и обладают низкой биоразлагаемостью, что делает их устойчивыми к традиционным процессам очистки [7]. Потребление воды или пищи, загрязнённых токсичными красителями, может привести к их биоаккумуляции в организме и долгосрочным проблемам со здоровьем, включая нарушение эндокринной системы, возникновение злокачественных новообразований, снижение иммунитета. Кроме того, многие красители оказывают вредное воздействие на водные организмы, приводя к снижению репродуктивной способности, замедлению роста и увеличению смертности [8].

Красители классифицируются по характеру заряда, который они несут при растворении в водной среде, — на катионные, анионные и неионогенные. Среди них катионные красители, такие как метиленовый голубой (МГ), малахитовый зелёный и кристаллический фиолетовый, широко применяются в текстильной, полиграфической и красильной промышленности, а также в бумажном производстве. МГ с химической формулой $C_{16}H_{18}N_3ClS$ является распространённым катионным красителем из семейства фенотиазиновых соединений. Он характеризуется стабильной структурой, высокой водной растворимостью и токсичностью. Исследования показали, что сточные воды, содержащие МГ, могут приводить к гибели водных растений и значительному снижению уровня растворённого кислорода в водоёмах [9]. Хотя метиленовый голубой обладает некоторыми лечебными свойствами при безопасном применении в соответствии с клиническими указаниями, они не проявляются при его поступлении в организм через загрязнённую воду. Напротив, в организме человека он может вызывать различные заболевания: цианоз, некроз тканей, желтуху, тахикардию. Известны его негативные эффекты в отношении растений — присутствие метиленового голубого приводит к ингибированию роста и снижению содержания пигментов и белков в микроводорослях *Chlorella vulgaris* и *Spirulina platensis*. Таким образом, неблагоприятные последствия загрязнения сточных вод метиленовым голубым обуславливают необходимость его эффективного удаления перед сбросом [10].

Для удаления красителей из окружающей среды применяются различные методы обработки. Биологические методы являются экологически безопасными и экономичными, но имеют ряд ограничений: низкая скорость процесса, зависимость от условий среды (температура, pH) и ограниченная эффективность в отношении стойких синтетических красителей. Химические методы, такие как углубленное окисление с использованием озона, хлора или персульфатов, могут эффективно разрушать красители, однако требуют дорогостоящих реагентов и часто сопровождаются образованием побочных токсичных веществ. Кроме того, химическая очистка связана с высокими энергетическими затратами и требует дорогостоящего оборудования, что ограничивает её практическое применение. Адсорбция является эффективным и экологически устойчивым методом очистки воды благодаря экономичности и возможности регенерации сорбентов. Разработка недорогих высокоэффективных адсорбентов остаётся актуальной задачей [11].

В качестве сорбентов используются материалы, такие как рисовая шелуха, биоуголь, полученный из растительных отходов, активированные отходы банановой кожуры и другие [12]. В работе [13] для удаления метиленового голубого предложен геополимер на основе частично dealюминированного метакаолина. Показано, что адсорбция зависит от pH, времени контакта и концентрации красителя, а максимальная сорбционная ёмкость составила 8 мг/г. Процесс описывается моделью Фрейндлиха, что указывает на гетерогенную поверхность и многослойный характер адсорбции. Несмотря на экологичность и низкую стоимость, полученные материалы характеризуются сравнительно невысокой сорбционной ёмкостью. В работе [14] установлено, что активированный уголь, синтезированный из стручков *Denolix Regia* с последующей активацией хлоридом цинка и фосфорной кислотой, обеспечивает степень удаления метиленового голубого до 99,9 %. Адсорбция протекает преимущественно по физическому механизму и описывается моделями Ленгмюра и Фрейндлиха. Несмотря на высокую эффективность, получение материала требует сложной химической активации и значительных энергетических затрат.

Глины используются в качестве эффективной альтернативы для удаления анионных и катионных красителей благодаря высокой ионообменной способности, удельной поверхности, низкой стоимости и экологичности. Вместе с тем они имеют недостатки: трудная регенерация, ограниченная селективность и необходимость химической модификации для оптимизации эффективности удаления.

Многочисленные исследования органоминеральных материалов в адсорбции красителей подтверждают их высокую сорбционную способность, поскольку они обладают уникальными структурными свойствами, что делает эти материалы перспективными недорогими и экологически чистыми адсорбентами [15]. Особое внимание уделяется модификации глинистых сорбентов. В работе [16] показано, что активация бентонита раствором NaOH позволяет увеличить удельную поверхность до 74,15 м²/г и достичь сорбционной ёмкости 22,131 мг/г. При этом адсорбция является самопроизвольным процессом, а сорбенты сохраняют работоспособность в течение нескольких циклов регенерации. Однако использование концентрированных щелочных растворов усложняет технологию и повышает её стоимость.

Синтезирован композит из активированного бентонита и рапсовой соломы методом гидротермальной карбонизации с последующей пропиткой FeCl₃ и обработкой NaOH. Композит показал превосходную адсорбционную способность (425,65 мг/г при нейтральном pH) по сравнению с исходным биоуглем. Несмотря на высокие показатели, многостадийность синтеза (гидротермальная обработка, химическая модификация) ограничивает масштабируемость и повышает стоимость производства [17].

Анализ современных исследований показывает, что, несмотря на высокую эффективность ряда адсорбентов, их широкое применение ограничено высокой стоимостью и сложностью получения и активации [18]. Следовательно, органоминеральные материалы на основе глин и глинистых отходов являются перспективными для получения недорогих и эффективных сорбентов удаления красителей из водных сред. Одним из глинистых шламовых отходов является остаток регенерации машинных масел. В развитых странах переработка отработанных масел на специализированных заводах составляет 20-100 тыс. т в год [19]; на каждую тонну очищенного смазочного масла образуется 80-140 кг отработанного минерального сорбента [20].

Несмотря на обнадеживающие результаты исследований по использованию глинистых сорбентов, применение глинистых шламовых отходов регенерации машинных масел для удаления катионных красителей, в частности метиленового голубого, остаётся малоизученным. По этой причине целью настоящей работы является получение и экспериментальное исследование сорбционных характеристик материала на основе глинистого шламового отхода при удалении метиленового голубого.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- получить сорбционный материал путём термической обработки замасленной глины при различных температурах и определить оптимальные условия его формирования;
- охарактеризовать пористую структуру полученного сорбента;
- оценить сорбционные свойства материалов, полученных при различных температурах, и выделить оптимальный образец;
- определить максимальную сорбционную ёмкость выбранного сорбента, построить изотермы адсорбции и оценить характер адсорбционного процесса.

Материалы и методы. Исходная глина, составляющая основу глинистого шлама (ГШ), согласно документации поставщика, содержит до 30 % клиноптилолита, до 30 % монтмориллонита, около 20 % кальцита, 11 % кварца и 9 % прочих примесей при насыпной плотности 0,65-0,75 г/см³ и истинной плотности 2,3 г/см³.

Сорбционный материал был получен путём термической модификации замасленного глинистого шлама, образуемого при сорбционной регенерации отработанных машинных масел. Термообработка проводилась в муфельной печи «Lior LF-7/13-G2» (РФ).

При температуре 200 °С глинистый отход сохранял резкий запах и комковатую структуру. При 400 °С исходная пастообразная масса превратилась в рыхлый чёрный материал (образец ГШ400). Повышение температуры до 500 °С обусловило осветление окраски вследствие выгорания органических компонентов.

Для оценки особенностей распределения пор и определения удельной поверхности применялись методы математической обработки адсорбционных изотерм. Пористую структуру образцов исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе TriStar 3020 (Micromeritics, США). Удельную поверхность рассчитывали по методу Брунауэра-Эммета-Тейлора (БЕТ). Объём микропор определяли методом t-Plot статистической толщины адсорбционного слоя, основанным на сравнении экспериментальной и эталонной изотерм адсорбции [21]. Объём мезопор определяли методом Баррета-Джойнера-Халенды (ВН). Рабочие растворы метиленового голубого готовили растворением точной навески красителя в дистиллированной воде. Концентрацию красителя в растворах до и после очистки определяли фотоколориметрически при длине волны 670 нм с использованием фотоколориметра «КФК-3-01» (Россия). Очистку модельных растворов проводили следующим образом: 100 см³ раствора вносили в коническую колбу вместимостью 250 см³, добавляли расчётную навеску сорбента, смесь перемешивали в течение заданного времени и затем отстаивали.

Эффективность очистки вычисляли по формуле (1):

$$\Xi = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{нач}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Ξ — эффективность, %; $C_{\text{нач}}$ и $C_{\text{кон}}$ — концентрации загрязняющих веществ в системе, мг/дм³, до и после очистки, соответственно.

Адсорбционную емкость рассчитывали по формуле (2):

$$A = \frac{C_n - C_p \cdot V}{G}, \quad (2)$$

где A — сорбционная емкость, мг/г; C_n — концентрация красителя до очистки, мг/дм³; C_p — равновесная концентрация красителя в растворе, мг/дм³; V — объем раствора МГ, дм³; G — масса сорбционного материала, г.

Результаты исследования. Изотерма низкотемпературной сорбции азота представлена на рис. 1.

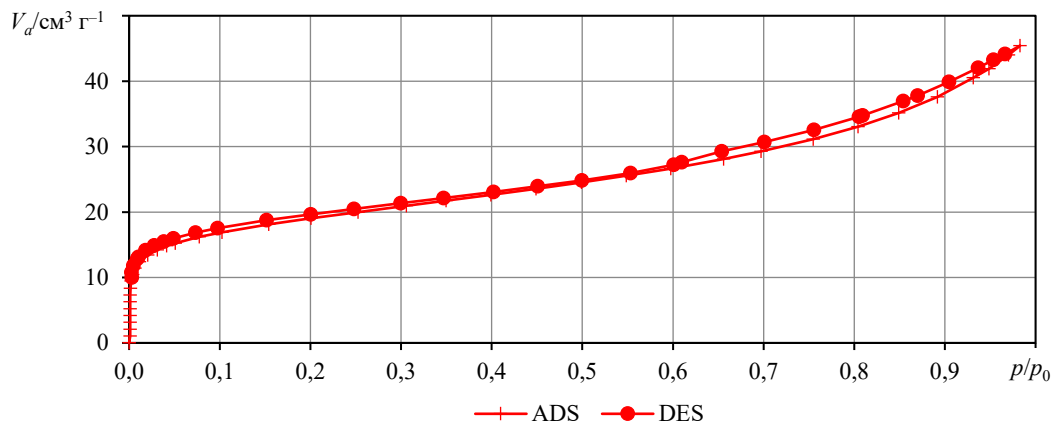


Рис. 1. Изотерма низкотемпературной сорбции азота на поверхности ГШ₄₀₀: ADS — изотерма адсорбции; DES — изотерма десорбции

Как следует из рис. 1, форма изотермы соответствует IV типу согласно классификации [22], что указывает на протекание полимолекулярной сорбции в мезопорах, осложнённой явлениями капиллярной конденсации, поскольку наблюдается небольшая петля гистерезиса. Величина удельной поверхности составила 69,148 м²/г, общий объём пор — 0,159 см³/г. Согласно полученным данным, микропоры в исследуемом сорбенте отсутствуют.

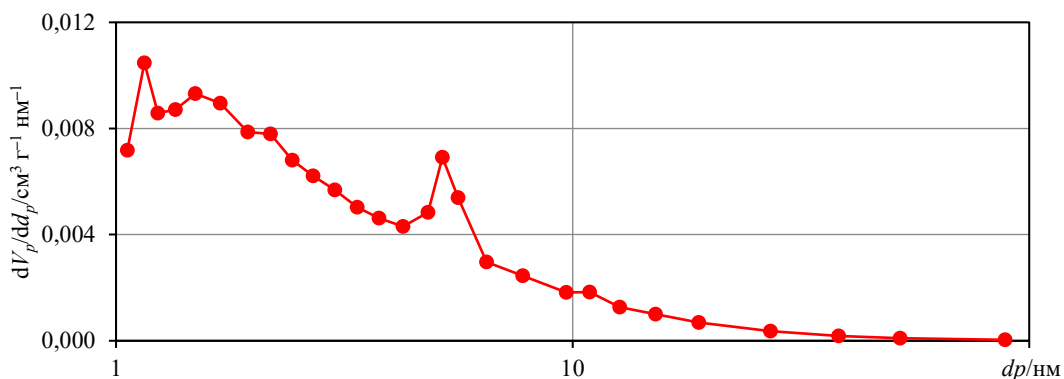


Рис. 2. Изотерма адсорбции азота, рассчитанная по методу ВН

Как видно из рис. 2, объём мезопор составляет $0,061 \text{ см}^3/\text{г}$, средний диаметр пор — $4,22 \text{ нм}$, медианный — $5,69 \text{ нм}$. Это свидетельствует о формировании достаточно однородной мезопористой структуры, благоприятной для процессов сорбции органических соединений.

Для оценки сорбционных свойств ГШ₄₀₀ проводились эксперименты с модельным красителем — метиленовым голубым. На рис. 3 представлены результаты экспериментов. Исходная концентрация красителя составила $30 \text{ мг}/\text{дм}^3$, количество добавки сорбционного материала — $1 \text{ г}/100 \text{ см}^3$ раствора.

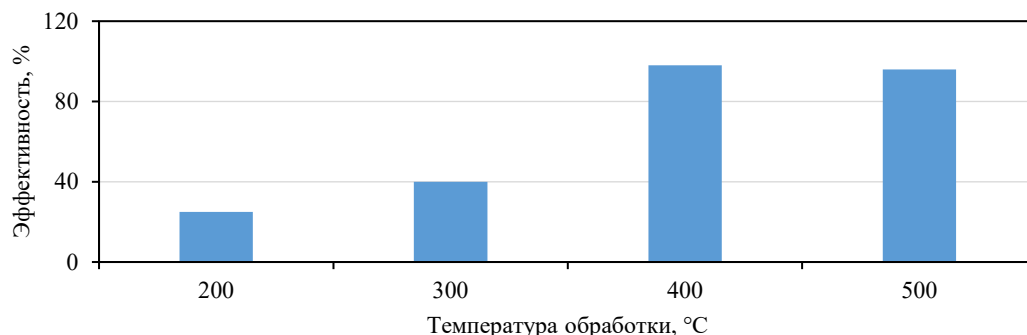


Рис. 3. Обесцвечивание растворов красителя метиленовый голубой сорбционными материалами

Как видно из рис. 3, исследуемый материал демонстрирует выраженную способность к обесцвечиванию раствора, что свидетельствует о его высокой сорбционной активности по отношению к органическим красителям.

Для более детального изучения сорбционных процессов на поверхности материала ГШ₄₀₀ была построена адсорбционная изотерма (рис. 4). Исходная концентрация красителя составляла $0,313 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$, масса сорбента изменялась от 1 до $8 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Согласно данным рис. 4, максимальная сорбционная ёмкость материала достигает $0,139 \text{ ммоль}/\text{г}$, что характеризует ГШ₄₀₀ как эффективный сорбент для удаления метиленового голубого из водных растворов.

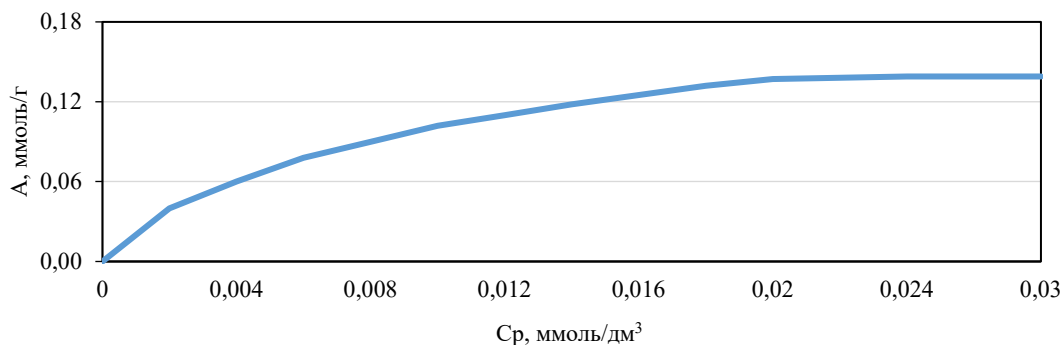


Рис. 4. Изотерма адсорбции метиленового голубого на ГШ₄₀₀

Согласно данным рис. 4, максимальная сорбционная ёмкость материала достигает $0,139 \text{ ммоль}/\text{г}$.

Экспериментальную изотерму аппроксимировали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. На основе этой обработки построены изотермы (рис. 5-7), определены уравнения регрессии и рассчитаны соответствующие коэффициенты (таблицы 1-3).

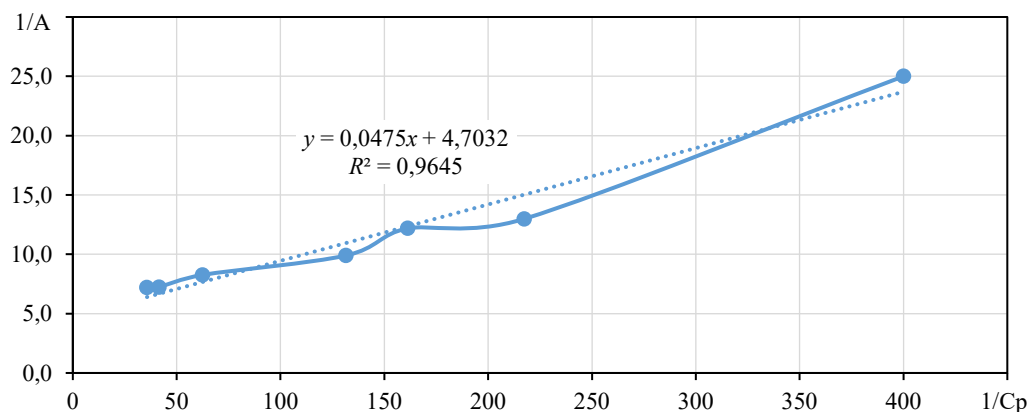


Рис. 5. Изотерма Ленгмюра для сорбции метиленового голубого на ГШ₄₀₀

Таблица 1

Константы Ленгмюра

| | | | |
|---|---------|------------------------|----------|
| $1/A = 1/A_{\infty} + 1/(K_L A_{\infty} C_p)$ | | | |
| $y = 4,7032 + 0,0475x$ | | | |
| $1/A_{\infty} =$ | 4,70316 | $1/(K_L A_{\infty}) =$ | 0,04749 |
| $A_{\infty} =$ | 0,21262 | $K_L =$ | 99,02873 |

Коэффициент корреляции модели Ленгмюра $R = 0,982097293$.

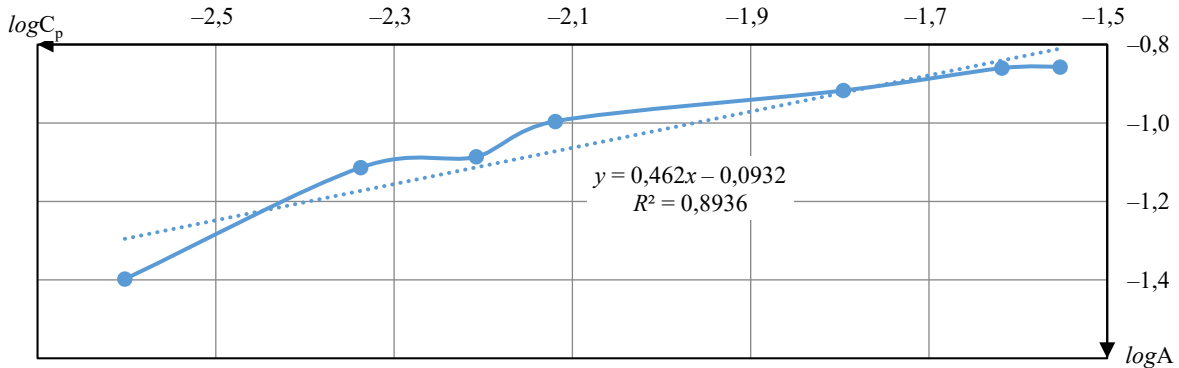


Рис. 6. Изотерма Фрейндлиха для сорбции метиленового голубого на ГШ₄₀₀

Таблица 2

Константы Фрейндлиха

| | | | |
|------------------------------------|----------|---------|---------|
| $\log A = \log K_F + 1/n \log C_p$ | | | |
| $y = -0,0932 + 0,462x$ | | | |
| $\log K_F =$ | -0,09316 | $1/n =$ | 0,46200 |
| $K_F =$ | 0,80695 | $n =$ | 2,16450 |

Коэффициент корреляции модели Фрейндлиха $R = 0,945298744$.

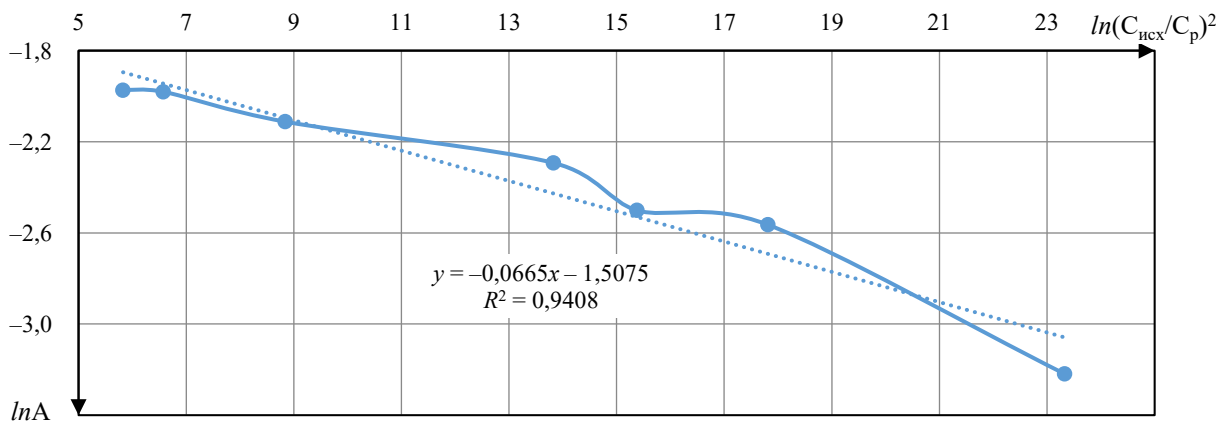


Рис. 7. Изотерма Дубинина-Радушкевича для сорбции метиленового голубого на ГШ₄₀₀

Таблица 3

Константы Дубинина-Радушкевича

| | | | |
|--|----------|----------------|------------|
| $\ln A = \ln A_{\infty} - (R^*T/E)^2 * (\ln(C_{исх}/C_p))^2$ | | | |
| $y = -1,5075 - 0,0665x$ | | | |
| $\ln A_{\infty} =$ | -1,50751 | $(R^*T/E)^2 =$ | 0,06649 |
| $A_{\infty} =$ | 0,22146 | $E =$ | 9608,69551 |

Коэффициент корреляции модели Дубинина-Радушкевича $R = -0,969934818$.

Из различных моделей изотерм равновесной и неравновесной сорбции или сорбционных характеристик наиболее популярными являются модели Ленгмюра и Фрейндлиха.

Как видно из полученных данных, процесс сорбции метиленового голубого на ГШ₄₀₀ лучше всего описывается моделью Ленгмюра (коэффициент аппроксимации $R^2 = 0,9645$). Следовательно, сорбция имеет монослойный характер. Константа Ленгмюра равна 99,02873, отсюда можно определить значение R_L по формуле (3):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}, \quad (3)$$

где K_L — константа Ленгмюра, C_0 — начальная концентрация адсорбата.

Рассчитанное значение параметра составило 0,031, что подтверждает благоприятный характер процесса. Величина $1/n$ в модели Фрейндлиха (0,462) указывает на эффективную адсорбцию, а энергия адсорбции E , рассчитанная по модели Дубинина-Радушкевича (9,608 кДж/моль), соответствует физическому механизму сорбции.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что глинистый шлам, обработанный при температуре 400 °С, демонстрирует высокую эффективность очистки растворов. Материал, полученный при повышенной температуре, также проявляет значительную сорбционную активность, однако его синтез требует дополнительных энергозатрат. Оптимальная температура термообработки обеспечивает баланс между результативностью процесса и экономической целесообразностью.

Высокая сорбционная активность образца ГШ400 обусловлена особенностями его пористой структуры. Преобладание мезопор с диаметром ~4-6 нм обеспечивает доступность активной поверхности для молекул метиленового голубого, что соответствует известным представлениям о механизме адсорбции органических красителей на мезопористых материалах.

Классификация изотермы как IV типа и наличие гистерезисной петли свидетельствуют о капиллярной конденсации, способствующей удержанию молекул сорбата в порах. Аналогичные закономерности отмечены в литературе для глинистых и алюмосиликатных сорбентов [23], где развитая мезопористая структура рассматривается как определяющий фактор повышения эффективности очистки [24].

Анализ моделей адсорбции показал, что процесс наиболее полно описывается уравнением Ленгмюра, указывая на монослойный характер адсорбции на поверхности сорбента. Это может быть связано с относительной однородностью активных центров, образованных в ходе термообработки.

Рассчитанное значение энергии адсорбции (9,608 кДж/моль) позволяет отнести процесс к физической адсорбции, что означает взаимодействие между сорбатом и сорбентом посредством слабых межмолекулярных сил (ван-дер-Ваальса), типичное для систем «органический краситель – минеральный сорбент».

К ограничениям исследования можно отнести использование единственного модельного загрязнителя и отсутствие анализа влияния сопутствующих факторов (рН среды, ионной силы раствора, присутствия конкурирующих веществ). Указанные параметры могут существенно влиять на механизм и результативность адсорбции в реальных условиях.

Заключение. Таким образом, доказана возможность применения отхода регенерации машинных масел (глинистого шлама) в качестве эффективного сорбента для извлечения красителя «Метиленовый голубой».

Установлено, что термообработанный глинистый шлам (ГШ₄₀₀) обладает развитой мезопористой структурой (объем пор 0,159 см³/г) и демонстрирует сорбционную емкость по метиленовому голубому 0,139 ммоль/г (44,8 мг/г).

Показано, что процесс сорбции носит монослойный характер и преимущественно описывается моделью Ленгмюра, а энергия адсорбции (9,608 кДж/моль) указывает на физический механизм взаимодействия.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что ГШ400 может служить доступным и эффективным сорбентом для очистки сточных вод от органических красителей. Особое значение имеет его применение в контексте утилизации отходов, что повышает экологическую и хозяйственную целесообразность предложенного подхода.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий водоочистки, а также в дальнейших исследованиях, направленных на оптимизацию условий термообработки и расширение спектра удаляемых загрязнителей.

Список литературы / References

1. Ejiohuo O, Onyeaka H, Akinsemolu A, Nwabor OF, Siyanbola KF, Tamasiga P. Ensuring Water Purity: Mitigating Environmental Risks and Safeguarding Human Health. *Water Biology and Security*. 2025;4(2):100341. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100341>
2. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization; 2022. 614 p.
3. *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; 2023. 189 p.
4. Kusumlata, Balram Ambade, Ashish Kumar, Sneha Gautam. Sustainable Solutions: Reviewing the Future of Textile Dye Contaminant Removal with Emerging Biological Treatments. *Limnological Review*. 2024;24(2):126–149. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24020007>

5. Kavitha G, Govindhan M, Premkumar S. Dye Pollution and Its Implications for Human Health, Aquatic Ecosystems, and Sustainable Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Journal of Water Process Engineering*. 2025;80:109071. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109071>
6. *The Sustainable Development Goals Report: Special Edition*. United Nations; 2023. 80 p.
7. Parida VK, Singh N, Priyadarshini M, Kumari P, Datta D, Tambi A. Insights into the Synthetic Dye Contamination in Textile Wastewater: Impacts on Aquatic Ecosystems and Human Health, and Eco-Friendly Remediation Strategies for Environmental Sustainability. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2025;150:247–264. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.04.019>
8. Khandelwal D, Rana I, Mishra V, Ranjan KR, Singh P. Unveiling the Impact of Dyes on Aquatic Ecosystems through Zebrafish – A Comprehensive Review. *Environmental Research*. 2024;261:119684. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119684>
9. Jing Hong, Jia Bao, Yang Liu. Removal of Methylene Blue from Simulated Wastewater Based upon Hydrothermal Carbon Activated by Phosphoric Acid. *Water*. 2025;17(5):733. <https://doi.org/10.3390/w17050733>
10. Oladoye PO, Ajiboye TO, Omotola EO, Oyewola OJ. Methylene Blue Dye: Toxicity and Potential Elimination Technology from Wastewater. *Results in Engineering*. 2022;16(6):100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
11. Zhuangzhuang Yang, Yongjun Liu, Rushuo Yang, Bingrui Shi, Pan Liu, Lu Yang. Development and Application of Metal-Organic Frameworks and Spherical Carbon Particles for Efficient Recovery of Phenols and Oils from Coal Chemical Wastewater: A New Full-Process Adsorption Treatment Mode. *Chemical Engineering Journal*. 2024;498:155219.
12. Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А., Святченко А.В. Сорбционные свойства листового опада платана по отношению к красителю метиленовому голубому. *Chemical Bulletin*. 2020;3(4):5–13.
Sverguzova SV, Shaykhiev IG, Sapronova ZhA, Svyatchenko AV. Sorption Properties of Sycamore Leaf Litter in Relation to Methylene Blue Dye. *Chemical Bulletin*. 2020;3(4):5–13. (In Russ.)
13. Elewa K, Tawfic AF, Tarek M, Al-Sagheer NA, Nagy NM. Removal of Methylene Blue from Synthetic Industrial Wastewater by Using Geopolymer Prepared from Partially Dealuminated Metakaolin. *Scientific Reports*. 2025;15(1):17633. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01461-w>
14. Arumugam Pillai Kanni Raj. Adsorption of Methylene Blue Dye from Textile Industry Effluent using Activated Carbon Synthesized from Various Plant-Based Precursors. *Oriental Journal of Chemistry*. 2025;41(2):665–674. <https://doi.org/10.13005/ojc/410236>
15. Carhuarupay-Molleda YF, Ccasa Barboza NM, Pastor-Mina S, Valcarcel Carlos ED, Palomino-Malpartida YG, Redolfo RL, et al. A Study of Methylene Blue Adsorption by a Synergistic Adsorbent Algae (*Nostoc sphaericum*)/Activated Clay. *Polymers*. 2025;17(15):2134. <https://doi.org/10.3390/polym17152134>
16. Hamad Noori Hamad, Syazwani Idrus, Badronnisa Yusuf, Nur Syakina Jamali, Amimul Ahsan, Sri Suhartini, et al. Optimized Bentonite Clay Adsorbents for Methylene Blue Removal. *Processes*. 2024;12(4):738. <https://doi.org/10.3390/pr12040738>
17. Yiming Zhang, Zhenglong Li, Xueliang Zheng, Yihua Wu, Lijun Wang, Lili Xie. Study on the Adsorption of Methylene Blue Solution by Activated Clay Biochar Composites. *Chemical Engineering Communications*. 2026;213(3):590–602. <https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2567877>
18. Shaobin Wang, Yuelian Peng. Natural Zeolites as Effective Adsorbents in Water and Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2010;156(1):11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
19. Тарасов В.В., Соболенко А.Н., Тарасов М.И. Эффективность применения регенерированного моторного масла легированного присадками в судовых дизелях разной форсировки // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020;1–2(47):116–122.
Tarasov VV, Sobolenko AN, Tarasov MI. Efficiency of the Application of Regenerated Motor Oil Alloying with Additives in Ship Diesels of Different Forcing. *Marine Intellectual Technologies*. 2020;1–2(47):116–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.47.1.078>
20. Sabour MR, Shahi M. Spent Bleaching Earth Recovery of Used Motor-Oil Refinery. *Civil Engineering Journal*. 2018;4(3):572–584. <https://doi.org/10.28991/cej-0309116>
21. Galarneau A, Villemot F, Rodriguez J, Fajula F, Coasne B. Validity of the t-Plot Method to Assess Microporosity in Hierarchical Micro/Mesoporous Materials. *Langmuir*. 2014;30(44):13266–13274. <https://doi.org/10.1021/la5026679>
22. Rahman MM, Shafiullah AZ, Pal A, Islam MA, Jahan I, Saha BB. Study on Optimum IUPAC Adsorption Isotherm Models Employing Sensitivity of Parameters for Rigorous Adsorption System Performance Evaluation. *Energies*. 2021;14(22):7478. <https://doi.org/10.3390/en14227478>
23. Tao Du, Li-Feng Zhou, Qi Zhang, Li-Ying Liu, Gang Li, Wen-Bin Luo, et al. Mesoporous Structured Aluminaosilicate with Excellent Adsorption Performances for Water Purification. *Sustainable Materials and Technologies*. 2018;17:e00080. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00080>
24. Auta M, Hameed BH. Modified Mesoporous Clay Adsorbent for Adsorption Isotherm and Kinetics of Methylene Blue. *Chemical Engineering Journal*. 2012;198–199:219–227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.075>

Об авторах:

Ян Артурович Мурзаханов, аспирант кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), murzahanov94@mail.ru

Жанна Ануаровна Сапронова, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), sapronova.2016@yandex.ru

Светлана Васильевна Свергузова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), pe@bstu.ru

Анастасия Владимировна Святченко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), sv.anastasiaa@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Я.А. Мурзаханов: проведение исследования.

Ж.А. Сапронова: разработка концепции.

С.В. Свергузова: разработка методологии.

А.В. Святченко: формальный анализ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yan A. Murzakhanov, Postgraduate Student of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), murzahanov94@mail.ru

Zhanna A. Sapronova, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), sapronova.2016@yandex.ru

Svetlana V. Sverguzova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), pe@bstu.ru

Anastasia V. Svyatchenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), sv.anastasiaa@mail.ru

Claimed Contributorship:

YuA Murzakhanov: investigation.

ZhA Sapronova: conceptualization.

SV Sverguzova: methodology.

AV Svyatchenko: formal analysis.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.04.2026

Принята к публикации / Accepted 07.05.2026