

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.3.048

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

### Природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения для очистки поверхностных и сточных вод от органических загрязнителей

А.В. Танеева ✉, Ю.В. Снигирева , Р.Н. Хизбуллин ,Д.А. Шлыкова , В.Ф. Новиков 

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

✉ [alinataneeva@mail.ru](mailto:alinataneeva@mail.ru)

EDN: LJJZLA

#### Аннотация

**Введение.** Современная производственная и экологическая повестка ставит задачу выявления оптимальных сорбентов для очистки воды от органических загрязняющих веществ. Широкое практическое применение получили такие сорбенты, как активированный уголь, диоксид кремния и др. Однако сохраняет актуальность проблема поиска оптимального по селективности сорбента. Он должен приемлемо или хорошо очищать воду от главных органических загрязнителей. В научной литературе есть сведения о перспективах использования в рассматриваемых целях сорбентов из природных цеолитсодержащих минералов. Однако такой подход недостаточно проработан, материалы малоизучены и, как следствие, редко используются для решения экологических проблем. Представленная научная работа призвана восполнить этот пробел. Ее цель — исследование сорбционных характеристик природного сорбента на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения.

**Материалы и методы.** Базовым для данного исследования стал метод восходящей жидкостной колонной хроматографии. Сорбционный материал загружали в хроматографическую колонку длиной 120 мм и внутренним диаметром 3 мм. Модельные органические вещества в виале перемещались по длине сорбционного слоя. В качестве модельных соединений использовали трихлорэтан, этилацетат, метилэтилкетон, дихлорэтан и трихлорэтилен. Значимые данные обобщены в виде таблиц и графически визуализированы.

**Результаты исследования.** Экспериментально исследованы технологические характеристики природных сорбентов, полученных на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения. Определены абсолютное время удерживания исследуемых сорбатов, а также их сорбционная емкость по отношению к цеолитсодержащим породам Татарско-Шатрашанского месторождения. Установлена зависимость времени удерживания модельных органических веществ от длины сорбционного слоя, которая определяется физико-химической природой исследуемого сорбата. С этой же точки зрения (как составляющие зависимости) рассмотрены температуры кипения модельных органических веществ, дипольные моменты, показатели преломления и плотности. Экспериментальные данные статистически обработали, определили абсолютную и относительную погрешность единичного измерения. Все сорбаты, рассмотренные в рамках данной научной работы, показали значимую или высокую сорбционную емкость. Зафиксированный минимум — 34 % (метилэтилкетон), максимум — 72 % (этилацетат). При этом у этилацетата экстремально малое значение времени удерживания в 10-сантиметровом сорбционном слое (26 мин). Самое продолжительное время удерживания — у метилэтилкетона (314 мин). Его сорбционная емкость — минимальная (34 %).

**Обсуждение и заключение.** Экспериментально доказана перспективность исследуемого материала для очистки поверхностных и сточных вод от главных загрязнителей природной среды. Установлено, что цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения могут адсорбировать 34–72 % загрязняющих воду органических соединений. Их можно использовать в технологических процессах очистки природных и сточных вод от основных загрязнителей окружающей природной среды.

**Ключевые слова:** цеолитсодержащие породы, модельные органические вещества, сорбционная емкость, жидкостная хроматография, очистка воды от органических загрязняющих веществ

**Благодарности.** Авторы благодарят заведующего кафедрой энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, д.т.н., профессора Ильина В.К. за помощь в организации научного исследования, предоставление лабораторного оборудования, материалов и реактивов. Спасибо рецензенту за компетентную экспертизу и редакционной команде журнала «Безопасность техногенных и природных систем» за ценные рекомендации по улучшению статьи.

**Для цитирования.** Танеева А.В., Снигирева Ю.В., Хизбуллин Р.Н., Шлыкова Д.А., Новиков В.Ф. Природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения для очистки поверхностных и сточных вод от органических загрязнителей. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):112–120. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

*Original Theoretical Research*

## Natural Sorbent Based on Zeolite-Containing Rocks of Tatarsko-Shatrashan Deposit for Treatment of Surface and Waste Water from Organic Pollutants

Alina V. Taneeva  , Yuliya V. Snigireva , Radik N. Khizbullin ,

Darya A. Shlykova , Vyacheslav F. Novikov 

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

 [alinataneeva@mail.ru](mailto:alinataneeva@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The modern industrial and environmental challenges require the identification of optimal sorbents for water purification from organic contaminants. Sorbents like activated carbon and silicon dioxide have been widely used, but the problem of selecting the optimal sorbent that can adequately purify water remains relevant. There is information in the scientific literature about potential use of sorbents from natural zeolite-containing minerals for this purpose. However, this approach is not well developed; the materials are poorly studied and, as a result, are rarely used to solve environmental problems. This work aims to fill this gap by studying the sorption properties of a natural sorbent based on zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashan deposit.

**Materials and Methods.** The method of ascending liquid column chromatography became the basis for this study. The sorption material was loaded into a chromatographic column with a length of 120 mm and an inner diameter of 3 mm. The model organic substances in the vial moved along the length of the sorption layer. Trichloroethane, ethyl acetate, methyl ethyl ketone, dichloroethane, and trichloroethylene were used as model compounds. We summarized the significant data in tables and visually represented it in graphs.

**Results.** The technological characteristics of natural sorbents obtained on the basis of zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashan deposit have been experimentally investigated. The absolute retention time of the studied sorbates, as well as their sorption capacity in relation to zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashansky deposit, were determined. The dependence of the retention time of model organic substances on the length of the sorption layer, which was determined by the physical-chemical nature of the sorbate under study, has been established. From the same point of view (as components of the dependence), the boiling points of model organic substances, dipole moments, refractive indices, and densities were considered. The experimental data were statistically processed, and the absolute and relative errors of a single measurement were determined. All sorbates considered in the framework of this scientific work showed significant or high sorption capacity. The recorded minimum was 34% (methyl ethyl ketone); the maximum was 72% (ethyl acetate). At the same time, ethyl acetate had an extremely short retention time in a 10-centimeter sorption layer (26 min). The longest retention time was for methyl ethyl ketone (314 min). Its sorption capacity was minimal (34%).

**Discussion and Conclusion.** The prospects of the studied material for the purification of surface and waste water from major pollutants in the natural environment have been experimentally proven. It has been determined that zeolite-containing rocks from the Tatarsko-Shatrashan deposit can adsorb 34–72% of organic compounds that pollute water. They can be used in technological processes for the purification of natural and wastewater from major environmental pollutants.

**Keywords:** zeolite-containing rocks, model organic substances, sorption capacity, liquid chromatography, water purification from organic pollutants

**Acknowledgements.** The authors would like to express their gratitude to V.K. Il'in, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures for his assistance in organizing scientific research and providing laboratory equipment, materials and reagents. In addition, we appreciate the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

**For citation.** Taneeva AV, Snigireva YuV, Khizbullin RN, Shlykova DA, Novikov VF. Natural Sorbent Based on Zeolite-Containing Rocks of Tatarsko-Shatrashan Deposit for Treatment of Surface and Waste Water from Organic Pollutants. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):112–120. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

**Введение.** Одно из условий экологической безопасности окружающей среды — защита водных объектов от загрязнения веществами от антропогенных и природных источников. Частный случай указанной проблемы — негативное воздействие таких органических соединений, как нефтепродукты, фенолы, ароматические углеводороды, хлорорганика [1]. Эти загрязняющие вещества сравнительно быстро распространяются в воде на значительные расстояния и вредят окружающей среде даже в соседних регионах, что может привести к необратимым изменениям в экосистеме [2]. Особенно опасны для окружающей среды и человека фенол и его производные, так как многие из них — мутагены и тератогены, способные нарушить работу эндокринной системы [3]. Кроме того, в определенных условиях молекула фенола трансформируется в соединения с более высоким классом опасности [4]. Биodeградация фенола может ускоряться летом, когда аэробные микроорганизмы интенсивно окисляют органические соединения [5]. Лимитирующая стадия этого процесса — массоперенос молекул кислорода из газовой фазы в водную [6]. Кроме фенолов в поверхностных водах обнаруживаются другие классы органических соединений: ароматические и алкилароматические, алканы, карбоновые кислоты, гексахлоран, гексахлорбензол, бенз(а)пирен, ацетатанафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бензо(б)флуорантен, бензо(к)флуорантен, бензо(г,и)перилен, индено(1, 2,3-сд)пирен [7].

В [8] приведены полученные за 15 лет сведения по загрязненности органическими соединениями донных отложений реки Белая. Анализ экологического состояния поверхностных вод в разных регионах России [9] показал, что во многих случаях водные ресурсы не соответствуют нормативам. Как правило, в городах водоснабжение обеспечивается за счет поверхностных вод. Их очищают и хлорируют водоканалы [10]. Органические соединения (примеси в воде) взаимодействуют с хлором. Так образуются хлорорганические соединения, которые загрязняют питьевую воду. Ее очищают разными способами. Чаще всего задействуют сорбционные методы очистки воды от токсичных примесей с использованием активированных углей и синтетических цеолитов. Исследования последних лет показали, что для решения рассматриваемой проблемы перспективны сорбционные материалы из природных цеолитсодержащих минералов. Благодаря развитой системе макро- и микропор они эффективно очищают воду от примесей органических соединений [11]. Трехмерный алюмокремнекислородный каркас природных цеолитов пронизан системой полостей и каналов. Огромная внутренняя поверхность и квернозная структура цеолитсодержащих пород обеспечивает интенсивность адсорбционных процессов, достаточную для хорошей очистки сточных вод промышленных предприятий от токсичных примесей. В то же время природные цеолитсодержащие породы мало изучены, что препятствует их широкому применению для решения экологических проблем [12].

Цель данной работы — экспериментальное исследование технологических характеристик природных сорбентов, полученных на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения.

**Материалы и методы.** Исследовался природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав природного сорбента [12]

Элементы	%, масс
Диоксид кремния SiO <sub>2</sub>	66,00
Диоксид титана TiO <sub>2</sub>	0,35
Оксид алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,19
Оксид железа Fe <sub>2</sub> O	2,65
Оксид марганца MnO	0,01
Оксид кальция CaO	17,00
Оксид магния MgO	1,45
Оксид натрия Na <sub>2</sub> O	0,16
Оксид калия K <sub>2</sub> O	1,43
Оксид фосфора P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13

Рассматриваемые природные элементы термически и кислотоустойчивы. Суммарная катионообменная способность — 130,0 мг-экв / 100 г. Основная роль в обменном процессе принадлежит кальцию. В таблице 2 приведены основные характеристики исследуемого материала.

Таблица 2

## Характеристики исследуемого природного сорбента

Показатели	Физико-механические свойства
Внешний вид	Гранулы светло-серого или белого цвета
Пористость	37,25–55,72 %
Плотность	2,03–2,37 г/см <sup>3</sup>
Механическая прочность на раздавливание	При 200 °С — 46 кг/см <sup>2</sup> , при 2500 °С — 59 кг/см <sup>2</sup>
Виброизнос	0,96 %
Насыпная масса	0,4–1,2 г/см <sup>3</sup>
Объемная масса	1,10 г/см <sup>3</sup>
Эффективный диаметр пор	0,4 Нм (4А°)
Термическая устойчивость	Выше 450 °С
Растворимость в воде	Нерастворим

Для приготовления сорбента цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения подвергали механической активации. Их размалывали в шаровой мельнице, отсеивали фракции, затем обрабатывали раствором соляной кислоты в соотношении 1:1. Далее полученный материал отмывали водой до нейтральной реакции и подвергали термообработке при температуре 450–500 °С в течение 5 часов. Полученный таким образом сорбент помещали в стеклянные хроматографические колонки длиной 150 мм, внутренним диаметром 3 мм. К нижней части колонок присоединяли виалы, заполненные исследуемыми модельными жидкостями — органическими веществами различной физико-химической природы. Исследуемые модельные органические вещества поднимались в сорбционном слое по каналам и порам цеолитсодержащих пород. Фиксировалось время подъема через каждые 10 мм сорбента и строились кинетические кривые зависимости удерживания модельных органических веществ от высоты сорбционного слоя.

Сорбционные свойства определяли по формуле:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $A$  — сорбционная емкость исследуемого материала, %;  $m_1$  — масса исходного адсорбента;  $m_2$  — масса адсорбента, насыщенного органическим растворителем.

Для статистической обработки экспериментальных данных определяли абсолютную и относительную погрешности единичного измерения при доверительной вероятности 0,95. Результаты для сорбции гексана приводятся в таблице 3.

Таблица 3

## Абсолютные и относительные погрешности определения гексана на исследуемых сорбентах

Критерии измерения	Погрешность	
	абсолютная, $\Delta$	относительная, $\delta$ %
5	7,16	13,64
10	6,40	12,12
20	5,29	11,96
30	5,15	10,78

**Результаты исследования.** В таблице 4 приведены физико-химические свойства модельных органических веществ (сорбатов).

Таблица 4

Характеристики модельных сорбатов\*

Модельные сорбаты	Формула	$T_{\text{кип}}$	$d$	$n_D^{20}$	$t_{10}$	$A$	$\mu$
Трихлорэтан	$\text{CHCl}_3$	74,0	1,453	1,4463	152	45	1,15
Этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	77,1	0,900	1,3720	26	72	2,48
Метилэтилкетон	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	79,6	0,805	1,3800	314	34	2,84
Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	83,5	1,253	1,4400	61	62	1,80
Трихлорэтилен	$\text{C}_2\text{HCl}_3$	87,2	1,464	1,4800	88	56	0,85
Гексан	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	68,0	0,660	1,4160	59	46	0,05

где  $*d$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  $T_{\text{кип}}$  — температура кипения, °С;  $n_D^{20}$  — показатели преломления при температуре 20 °С;  $t_{10}$  — время удерживания модельных органических веществ в 10-сантиметровом сорбционном слое, мин;  $A$  — сорбционная емкость, %;  $\mu$  — дипольный момент, D

В результате экспериментов (таблица 4) установлено экстремально малое значение времени удерживания этилацетата (26 мин). Трихлорэтан, имеющий более низкую температуру кипения (74 °С), вымывается из колонки позже, чем этилацетат с температурой кипения 77,1 °С. Очевидно, это можно объяснить более высокой молекулярной массой трихлорэтана ( $M = 119,4$  г/моль) по сравнению с этилацетатом ( $M = 88,11$  г/моль). При этом порядок выхода компонентов не определяется температурами их кипения. Эта зависимость сложнее. Она учитывает химическую природу используемых модельных органических веществ, а также возможность их адсорбции и десорбции порами исследуемого материала. При этом, несмотря на низкие значения времени удерживания этилацетата, его сорбционная емкость относительно высока (72 %) по сравнению с другими исследованными органическими веществами. Сорбционная емкость всех исследованных органических веществ достаточно высока (34–72 %), что позволяет использовать эти материалы для очистки воды от органических соединений.

Для оценки кинетических характеристик процесса сорбции строились зависимости, связывающие время удерживания модельных сорбатов и высоту сорбционного слоя в интервале от 0 до 5 см (рис. 1) и от 5 до 10 см (рис. 2).

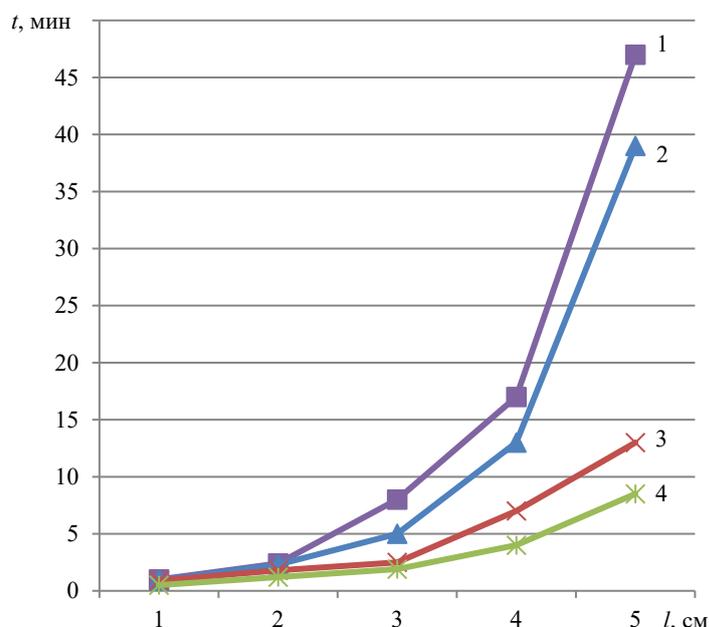


Рис. 1. Влияние удерживания модельных сорбатов на характер сорбционных процессов (слой сорбента от 0 до 5 см): 1 — метилэтилкетон; 2 — трихлорэтан; 3 — трихлорэтилен; 4 — дихлорэтан

Как видно из рис. 1, зависимость имеет параболический характер. Очевидно, это связано с тем, что в первоначальный момент времени (до 5 мм сорбционного слоя) между органической жидкостью и твердым телом нет равновесия. Оно устанавливается после сорбции, и на расстоянии более 5 см наблюдается практически линейная картина. Исключение — метилэтилкетон, который имеет достаточно высокое значение дипольного момента ( $\mu = 2,84\text{D}$ ).

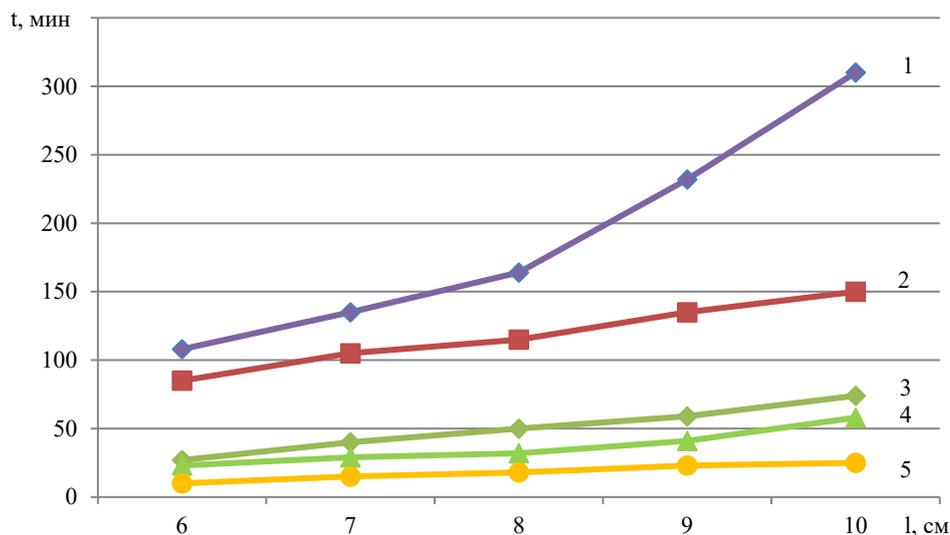


Рис. 2. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от высоты сорбционного слоя цеолитсодержащей породы (от 5 до 10 см): 1 — метилэтилкетон; 2 — трихлорэтан; 3 — трихлорэтилен; 4 — дихлорэтан; 5 — этилацетат

Отметим, что для всех исследованных хлорорганических соединений (трихлорэтан, дихлорэтан, трихлорэтилен) оказались почти одинаковыми углы наклона прямых (рис. 2). Это свидетельствует об аддитивности процесса сорбции для хлорорганических соединений.

Важный параметр органической молекулы — дипольный момент. Он характеризует асимметрию распределения зарядов в электрически нейтральной молекуле, что позволяет формировать электрические диполи, одинаковые по величине заряда  $+g$  и  $-g$ . Дипольный момент молекулы определяется в результате векторного сложения дипольных моментов отдельных связей. Дипольные моменты органических соединений характеризуют полярные свойства молекулы, а также определяют направление, силу межмолекулярных электростатических взаимодействий и сорбционные свойства пористых материалов.

На рис. 3 показана зависимость времени удерживания модельных сорбатов ( $t_{уд}$ ) от температуры их кипения ( $T_{кип}$ , °C) и дипольных моментов ( $\mu$ , D).

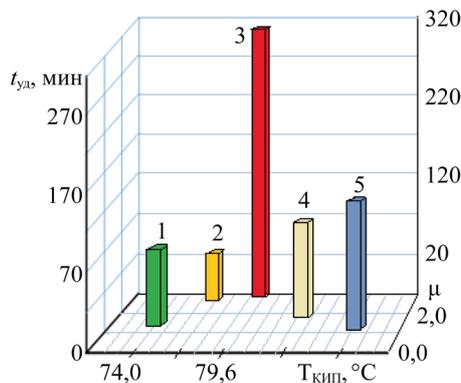


Рис. 3. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и дипольных моментов: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Как видно из рис. 3, существенно различается время выхода этилацетата (2) и метилэтилкетона (3), хотя у них близкие значения дипольных моментов и температур кипения. Метилэтилкетон удерживается значительно дольше ( $t_{уд} = 314$  мин), чем этилацетат ( $t_{уд} = 26$  мин), дихлорэтан ( $t_{уд} = 61$  мин), трихлорэтилен ( $t_{уд} = 88$  мин), и трихлорэтан ( $t_{уд} = 152$  мин). Отметим, что по классификации Роршнайфера в системе «сорбат — сорбент» метилэтилкетон определяет дисперсионное взаимодействие. Очевидно, что ведущую роль в этом процессе играют силы Ван-дер-Ваальса, и время сорбции более существенно. Это связано также с тем, что метилэтилкетон характеризуется более высокой полярностью (дипольный момент —  $\mu = 2,84D$ ), а также более высокой температурой кипения ( $T_{кип} = 79,6$  °C).

Показатель преломления тоже определяет полярность модельных органических веществ. Он связан с молекулярной рефракцией, является мерой электронной поляризуемости оболочки молекулы вещества.

На рис. 4 представлена зависимость времени удерживания модельных сорбатов от температур их кипения ( $T_{\text{кип}}$ , °C) и показателя преломления ( $n_D^{20}$ ).

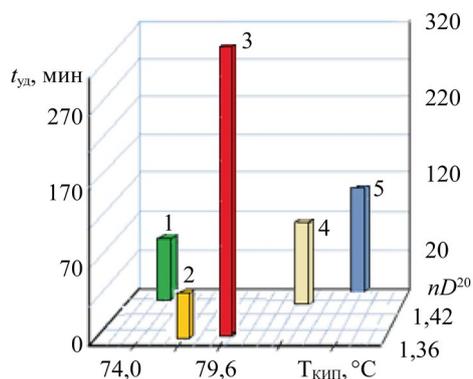


Рис. 4. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и показателя преломления: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Как видно из рис. 4, этилацетат и метилэтилкетон близки по двум параметрам:

- температура кипения (соответственно 77,1 °C и 79,6 °C);
- преломление (соответственно 1,37 и 1,38).

Метилэтилкетон характеризуется более высоким временем удерживания по сравнению с другими исследуемыми сорбатами. По-видимому, это объясняется более высокой энергией ориентационного взаимодействия метилэтилкетона с поверхностью сорбента.

Рис. 5 позволяет рассмотреть плотность сорбатов во взаимосвязи со временем удерживания и температурой кипения.

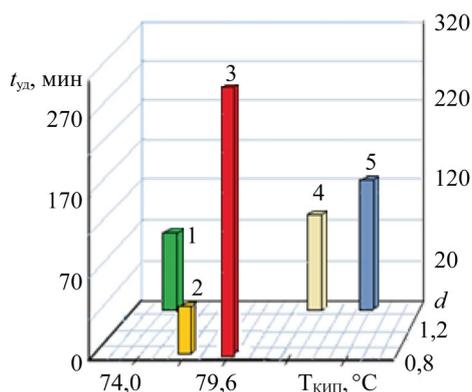


Рис. 5. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и плотности: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Итак, в рамках представленной научной работы установлено, что сорбционная емкость рассмотренных материалов варьируется от 34 % до 72 %. Особенно высокий показатель (72 %) — у этилацетата ( $C_4H_8O_2$ ). Другие его характеристики: дипольный момент — 2,48; время удерживания модельных органических веществ в 10-сантиметровом сорбционном слое — 26 мин; показатель преломления при температуре 20 °C — 1,3720; температура кипения — 77,1 °C; плотность — 0,9 г/см<sup>3</sup>. Метилэтилкетон схож с этилацетатом по таким показателям, как температура кипения, плотность, преломление и дипольный момент. Однако из рассмотренных сорбатов его сорбционная емкость минимальна (34 %), а время удерживания — самое продолжительное (314 мин).

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследования позволяют утверждать, что качественный сорбент можно получить, используя в качестве базы цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения. Такой материал очистит воду от основных органических загрязнителей. Как выяснилось, наилучший по сорбционной емкости результат будет при необходимости удалить этилацетат. Рассматриваемый сорбент заберет из воды 72 % этого вещества. Выявленный минимум связан с метилэтилкетонном. В этом случае фиксируется самая низкая, но приемлемая сорбционная емкость (34 %).

Таким образом, сорбционные характеристики природных цеолитов следует признавать хорошими. Результаты представленной научной работы можно использовать в технологических процессах очистки воды от основных загрязнителей.

## Список литературы / References

1. Baute-Pérez D, Santana-Mayor Á, Herrera-Herrera AV, Socas-Rodríguez B, Rodríguez-Delgado MA. Analysis of Alkylphenols, Bisphenols and Alkylphenol Ethoxylates in Microbial-Fermented Functional Beverages and Bottled Water: Optimization of a Dispersive Liquid-Liquid Microextraction Protocol Based on Natural Hydrophobic Deep Eutectic Solvents. *Food Chemistry*. 2021;377:131921. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131921>
2. Pradeep NV, Anupama S, Navya K, Shalini HN, Idris M, Hampannavar US. Biological Removal of Phenol from Wastewaters: A Mini Review. *Applied Water Science*. 2015;5:105–112. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0176-8>
3. Xiaowen Xie, Xiaoguo Ma, Lihui Guo, Yinming Fan, Guolong Zeng, Mengyuan Zhang, et al. Novel Magnetic Multi-Templates Molecularly Imprinted Polymer for Selective and Rapid Removal and Detection of Alkylphenols in Water. *Chemical Engineering Journal*. 2019;357:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.080>
4. Ighalo JO, Yap PS, Iwuozor KO, Aniagor CO, Tianqi Liu, Dulta K, et al. Adsorption of Persistent Organic Pollutants (POPs) from the Aqueous Environment by Nano-Adsorbents: A Review. *Environmental Research Reviews*. 2022;212:113123. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113123>
5. Казаков Д.А., Вольхин В.В., Боровкова И.С., Попова Н.П. Повышение скорости биодegradации фенола в условиях усиления массопереноса. *Экология и промышленность России*. 2014;9:32–35. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-9-32-35>
- Kazakov DA, Vol'khin VV, Borovkova IS, Popova NP. Increase in Speed of Phenol Biodegradation under the Conditions of Mass Transfer Enhancement. *Ecology and Industry of Russia*. 2014;9:32–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-9-32-35>
6. Quijano G, Rocha-Ríos J, Hernández M, Villaverde S, Revah S, Muñoz R, et al. Determining the Effect of Solid and Liquid Vectors on the Gaseous Interfacial Area and Oxygen Transfer Rates in Two-Phase Partitioning Bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;175(1–3):1085–1089. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.020>
7. Фатьянова Е.В., Хатмуллина Р.М., Галактионова Е.Б., Яппарова Г.Р., Сафарова В.И. Органические соединения в донных отложениях реки Белой. *Безопасность жизнедеятельности*. 2017;11(203):25–30.
- Fatyanova EV, Khatmullina RM, Galaktionova EB, Yapparova GR, Safarova VI. Organic Compounds in the Belaya River Bottom Sediments. *Life Safety*. 2017;11(203):25–30. (In Russ.)
8. Дымникова О.В., Борман А.Э. Динамика антропогенного загрязнения реки Глубокой в Ростовской области. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;1:48–56. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-48-56>
- Dymnikova OV, Borman AE. Dynamics of Anthropogenic Pollution of the Glubokaya River in the Rostov Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;1:48–56. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-48-56>
9. Танеева А.В., Дмитриева А.В., Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф. Особенности газохроматографического метода контроля содержания фенолов в водной среде. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2023;2(88):7–18. URL: <http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2023/02/004.pdf> (дата обращения: 14.01.2025).
- Taneeva AV, Dmitrieva AV, Snigireva YuV, Novikov VF. Features of the Gas Chromatographic Method for Monitoring the Content of Phenols in an Aqueous Medium. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2023;2(88):7–18. (In Russ.) URL: <http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2023/02/004.pdf> (accessed: 14.01.2025).
10. Сомин В.А., Бетц С.А., Комарова Л.Ф. Использование сорбатов на основе природного сырья для очистки фенолсодержащих вод. *Экология и промышленность России*. 2016;20(12):14–17. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-14-17>
- Somin V, Betz S, Komarova L. The Use of Sorbents Based on Natural Raw Materials for the Purification of Phenol-Containing Waters. *Ecology and Industry of Russia*. 2016;20(12):14–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-14-17>
11. Татаринцева Е.А., Бухарова Е.А., Ольшанская Т.Н. Сорбционный материал для очистки воды от нефтепродуктов. *Экология и промышленность России*. 2014;7:21–28.
- Tatarintseva EA, Bukharova EA, Ol'shanskaya LN. Sorption Material for Water Cleaning from Petroleum Products. *Ecology and Industry of Russia*. 2014;7:21–28. (In Russ.)
12. Буров И.А., Тюрин А.Н., Якимов А.В. Ишкаев Т.Х., Изотов В.С., Кикило Д.А. и др. *Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение*. Казань: ФЭН; 2001. 176 с.
- Burov IA, Tyurin AN, Yakimov AV, Ishkaev TKh, Izotov VS, Kikilo DA, et al. *Zeolite-Bearing Rocks of Tatarstan and Their Application*. Kazan: Fen; 2001. 176 p. (In Russ.)

**Об авторах:**

**Алина Вячеславовна Танеева**, кандидат химических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [alinataneeva@mail.ru](mailto:alinataneeva@mail.ru)

**Юлия Вячеславовна Снигирева**, аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [ORCID](#), [sneg987@mail.ru](mailto:sneg987@mail.ru)

**Радик Накибович Хизбуллин**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [rad-khizbullin@mail.ru](mailto:rad-khizbullin@mail.ru)

**Дарья Андреевна Шлыкова**, аспирант кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация г. Казань, ул. Красносельская, 51), [ORCID](#), [zagrek90@inbox.ru](mailto:zagrek90@inbox.ru)

**Вячеслав Федорович Новиков**, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [npo\\_aist@mail.ru](mailto:npo_aist@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов**

**А.В. Танеева:** разработка методологии, визуализация.

**Ю.В. Снигирева:** проведение исследования, написание черновика рукописи.

**Р.Н. Хизбуллин:** проведение исследования, формальный анализ.

**Д.А. Шлыкова:** валидация результатов.

**В.Ф. Новиков:** разработка концепции, научное руководство, рецензирование и редактирование рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Alina V. Taneeva**, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [alinataneeva@mail.ru](mailto:alinataneeva@mail.ru)

**Yuliya V. Snigireva**, Postgraduate Student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), [sneg987@mail.ru](mailto:sneg987@mail.ru)

**Radik N. Khizbullin**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Electric Stations Named after V.K. Shibanov Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [rad-khizbullin@mail.ru](mailto:rad-khizbullin@mail.ru)

**Darya A. Shlykova**, Postgraduate Student of the Electric Stations Named after V.K. Shibanov Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), [zagrek90@inbox.ru](mailto:zagrek90@inbox.ru)

**Vyacheslav F. Novikov**, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [npo\\_aist@mail.ru](mailto:npo_aist@mail.ru)

**Claimed contributorship:**

**AV Taneev:** methodology development, visualization.

**YuV Snigireva:** conducting research, manuscript drafting.

**RN Khizbullin:** conducting research, formal analysis.

**DA Shlykova:** validation of the results.

**VF Novikov:** concept development, academic advising, review and editing of the manuscript.

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

**All authors have read and approved the final manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 03.02.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 26.02.2025

**Принята к публикации / Accepted** 17.03.2025