

**Исследование механизма адсорбционной очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ модифицированным отходом энергетики для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду**

© 2026. Р. Я. Исхакова, к. т. н., доцент,  
Л. А. Николаева, д. т. н., зав. кафедрой,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51,  
e-mail: imreginaiskh@gmail.com, larisani16@mail.ru

В статье представлены результаты исследования процесса адсорбции анионных синтетических поверхностно-активных веществ из водных сред отходом энергетики – карбонатным шламом водоподготовки тепловых электрических станций, модифицированным связующим материалом – парафином (ШМП). Сорбционная ёмкость ШМП по додецилсульфату натрия (ДСН) составляет 22,1 мг/г. На основе изотерм Ленгмюра рассчитаны константы адсорбционного равновесия, изостерические теплоты адсорбции, значения свободной энергии Гиббса по уравнению Гиббса-Гельгольца. Установлено, что процесс протекает самопроизвольно. Определены основные термодинамические характеристики процесса адсорбции, на основании которых установлено, что на полученном сорбционном материале протекает физическая адсорбция. Для исследования механизма адсорбции на ШМП проведено экспериментальное определение кинетических показателей процесса. Адсорбция ДСН на ШМП реализуется на 80–90 % в первые 40–50 мин. Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии адсорбционной очистки сточных вод ШМП на этапе локальной очистки сточных вод промышленных предприятий. Предлагаемый подход к очистке водных сред является экологически безопасным, вовлекает отходы энергетики в качестве вторичных материальных ресурсов и позволит снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду.

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, адсорбция, отход производства, анионные поверхностно-активные вещества, термодинамические характеристики.

**Study of the mechanism of adsorption wastewater treatment from surfactants by modified energy waste to reduce anthropogenic impact on the environment**

© 2026. R. Ya. Iskhakova ORCID: 0000-0003-0339-9849, L. A. Nikolaeva ORCID: 0000-0002-7200-2318  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066,  
e-mail: imreginaiskh@gmail.com, larisani16@mail.ru

The article presents the results of a study of the anionic synthetic surfactants adsorption by energy waste – carbonate sludge from water treatment of thermal power plants, modified by a binding material – paraffin-modified sludge (PMS). Paraffin wax was used as a binding component; it is hydrophobic, insoluble, and has sorption capacity for the adsorbed surfactants. It was experimentally established that introduction of the binding component in an amount of 30 wt. % is the most appropriate. The sorption capacity of PMS is 22.1 mg/g. The adsorption isotherm belongs to type I according to the Brunauer, Emmett, and Teller classification, which indicates monomolecular adsorption. The constants of adsorption equilibrium, isosteric heats of adsorption were calculated based on Langmuir isotherms. The values of Gibbs free energy were calculated using the Gibbs-Helmholtz equation. It was found that the process occurs spontaneously. The main thermodynamic characteristics of the adsorption process were determined, based on which it was established that physical adsorption occurs on the obtained sorption material due to Van der Waals forces. To study the adsorption mechanism on PMS, an experimental determination of kinetic dependencies was carried out. The adsorption of sodium dodecyl sulfate (SDS) by PMS is realized by 80–90 % in the first 40–50 minutes. The activation energy of adsorption is 7.64 kJ/mol. The obtained research results can be used to develop the adsorption wastewater treatment technology in industrial enterprises. The environmentally safe proposed technology involves energy waste as secondary material resources and reduces the anthropogenic load on the environment.

**Keywords:** wastewater treatment, adsorption, industrial waste, anionic surfactants, thermodynamic characteristics.

Загрязнение природных водоёмов при недостаточной очистке сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ (АСПАВ) представляет собой актуальную проблему, связанную с экологической безопасностью [1–3].

Повышенная концентрация АСПАВ в сточных водах промышленных предприятий может наблюдаться в случаях нарушения нормальной работы и эксплуатации оборудования при: одновременном сливе больших объёмов отработанных моющих растворов, содержащих высокие концентрации АСПАВ, после окончания цикла мойки/обезжиривания деталей или оборудования; аварийном переполнении моечных или обезжиривающих ванн; неисправности оборудования (разрыв трубопроводов, неисправность клапанов или повреждение резервуаров для хранения моющих концентратов или отработанных растворов; отказ систем дозирования и автоматики и пр.); пусконаладочных работах, ремонте и пр. [4].

При попадании АСПАВ в сточные воды возникает ряд проблем, связанных с их извлечением [5–7]. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) подавляют деятельность активного ила на биологических очистных сооружениях (как предприятий, так и городских), вызывая гибель микроорганизмов и нарушение нормального режима эксплуатации станций биологической очистки; происходит интенсивное пенообразование на очистных сооружениях, затрудняющее их работу. Высокие концентрации ПАВ токсичны для водных организмов, снижают способность водоёмов к самоочищению.

Одним из перспективных методов очистки является сорбционное удаление ПАВ из сточных вод. При этом особый интерес представляют сорбционные материалы, полученные из отходов производства [8, 9].

В настоящее время для извлечения из водных сред АСПАВ используются различные отходы и материалы, отличающиеся по их адсорбционной способности к АСПАВ, мг/г: летучая зола тепловых электрических станций (6,83 мг/г) [10], бентонит (18,32 мг/г) [11], композитные металл-органические каркасы, усиленные оксидом графена (24,48 мг/г) [12], целлюлоза из медицинских отходов (ватных шариков), модифицированная одним из самых электрохимически стабильных органических катионов  $[NR_4^+]$  (32,5 мг/г) [13]. Основным недостатком разработанных материалов является высокая стоимость их получения.

Важным этапом является модификация отходов. Парафин обладает низкоэнергетической поверхностью и может рассматриваться как эффективный компонент для адсорбции АСПАВ [14].

Цель данной работы – исследование механизма процесса адсорбции анионных синтетических поверхностно-активных веществ карбонатным шламом, модифицированным парафином (ШМП), для повышения эффективности очистки сточных вод промышленных и коммунальных предприятий.

### **Объекты и методы исследования**

Объектом исследования является материал на основе карбонатного шлама энергетики. В экспериментальных исследованиях использовали шлам Набережночелнинской ТЭЦ. Химический состав шлама определяли методом рентгенографического качественного фазового анализа с применением дифрактометра D 8 ADVANCE (Bruker, Германия) [15]. Согласно проведённому анализу, в шламе присутствуют (масс. %): кальцит  $CaCO_3$  –  $71,0 \pm 0,1$ ; брусит  $Mg(OH)_2$  –  $8,50 \pm 0,03$ ; порландит  $Ca(OH)_2$  –  $1,00 \pm 0,02$ ; кварц  $SiO_2$  –  $0,60 \pm 0,01$ ; прочие вещества –  $19,0 \pm 0,2$ . Также в шламе содержатся гуминовые вещества – до 15,0 масс. %, а именно на его поверхности имеется типовой набор функциональных групп гуминовых веществ: гидроксильных –ОН, иминогруппы =NH, метильной – $CH_3$ , метиленовой = $CH_2$  групп, ароматических –HC=CH– – связей, –COOH – карбоксильных групп и –ОН – спиртовых групп, что установлено методом газовой хромато-масс-спектрометрии.

Определены основные физико-технические характеристики шлама: насыпная плотность –  $540,0 \pm 0,3$  кг/м<sup>3</sup>, влажность шлама –  $2,50 \pm 0,04$  масс. %, pH – 8,83, гранулометрический состав представлен фракциями 0,05–1,40 мм. При проведении экспериментальных исследований влажность шламовой пульпы была снижена с 87 до 3 % путём термической сушки в сушильном шкафу при температуре 120 °C на протяжении 2 часов.

В качестве связующего компонента использовали парафин, который обладает гидрофобностью, нерастворимостью и сорбционной способностью к поглощаемым АСПАВ. Экспериментально установлено, что наиболее целесообразным является введение связующего компонента в количестве 25–30 масс. %. Водопоглощение ШМП составило 0,1 %. Для исследования сорбционной ёмкости ШМП по-

лучали гранулы диаметром 1,0–1,5 мм путём продавливания через формующую фильеру (сито).

Проведены экспериментальные исследования по определению сорбционной ёмкости ШМП с использованием модельных растворов АСПАВ, для приготовления которых использовали додецилсульфат натрия (ДСН) (ГСО 8049-94), как наиболее часто встречающийся представитель АСПАВ. Концентрацию ДСН определяли экстракционно-фотометрическим методом с метиленовым синим на фотокolorиметре КФК-3 с учётом коэффициента разбавления. Исходная концентрация модельного раствора ДСН – 45 мг/дм<sup>3</sup>. При определении сорбционной ёмкости в статических условиях использован метод постоянных концентраций и переменных навесок. Температуру поддерживали с использованием прибора с магнитной мешалкой US-1500A с функцией нагрева (ULAB Manufacturing, Китай).

В экспериментальных исследованиях использованы растворы объёмом 100 см<sup>3</sup>; масса навески составляла 0,05; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,5; 1; 2 г; время проведения эксперимента 1 сут.

Для определения сорбционной ёмкости ШМП к АПАВ использовали выражение:

$$A = \frac{(C_0 - C_p)V}{m}, \quad (1)$$

где  $A$  – сорбционная ёмкость, мг/г;  $C_0$  – исходная концентрация ДСН в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_p$  – равновесная концентрация ДСН в рас-

творе, мг/дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса навески, г;  $V$  – объём раствора, дм<sup>3</sup>.

Для статистической обработки результатов измерений и вычисления погрешностей оценки измеряемой величины использовали ГОСТ Р 8.736-2011.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена изотерма адсорбции, полученная в статических условиях.

Как видно из рисунка 1, полученная изотерма относится к I типу по классификации Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ), которая свидетельствует о мономолекулярной адсорбции. Также данный тип изотерм характерен для микропористых материалов. Сорбционная ёмкость ШМП по АСПАВ составляет 22,1 мг/г, что сопоставимо с результатами, полученными с применением различных материалов и отходов, описанных ранее. Для изучения механизма процесса адсорбции на ШМП провели экспериментальное исследование в статических условиях при различных температурах (К): 293, 313, 323, 333. Полученные изотермы адсорбции представлены на рисунке 2.

На основании полученных изотерм адсорбции выбрана постоянная величина адсорбции, по которой построены изостеры, позволяющие выявлять зависимость концентрации от температуры (рис. 3).

По данным, представленным на рисунке 3, рассчитывается изостерическая теплота ад-

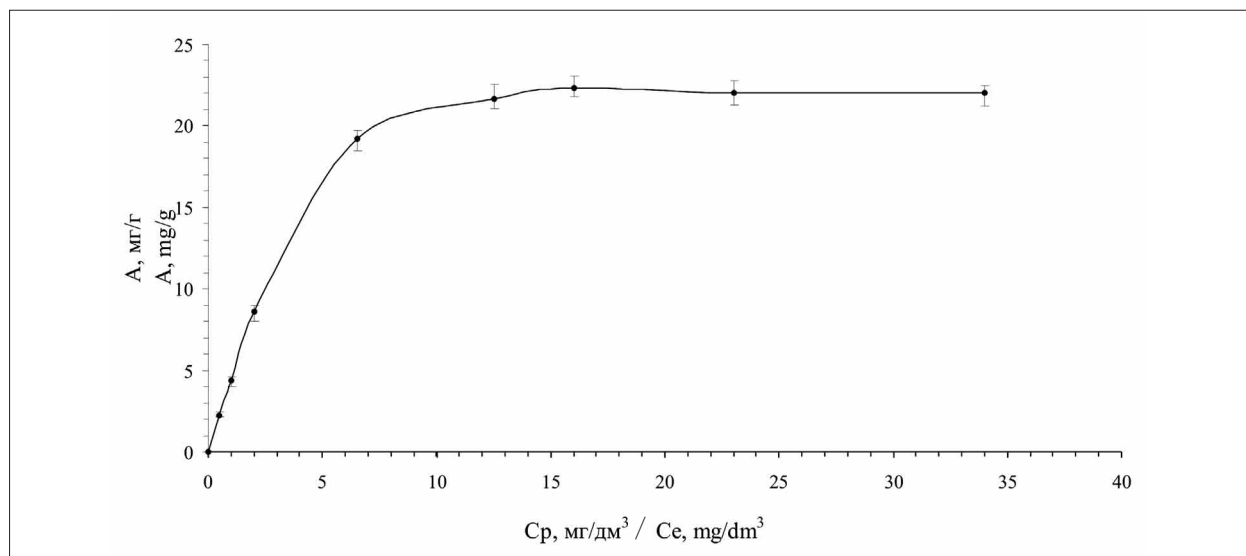
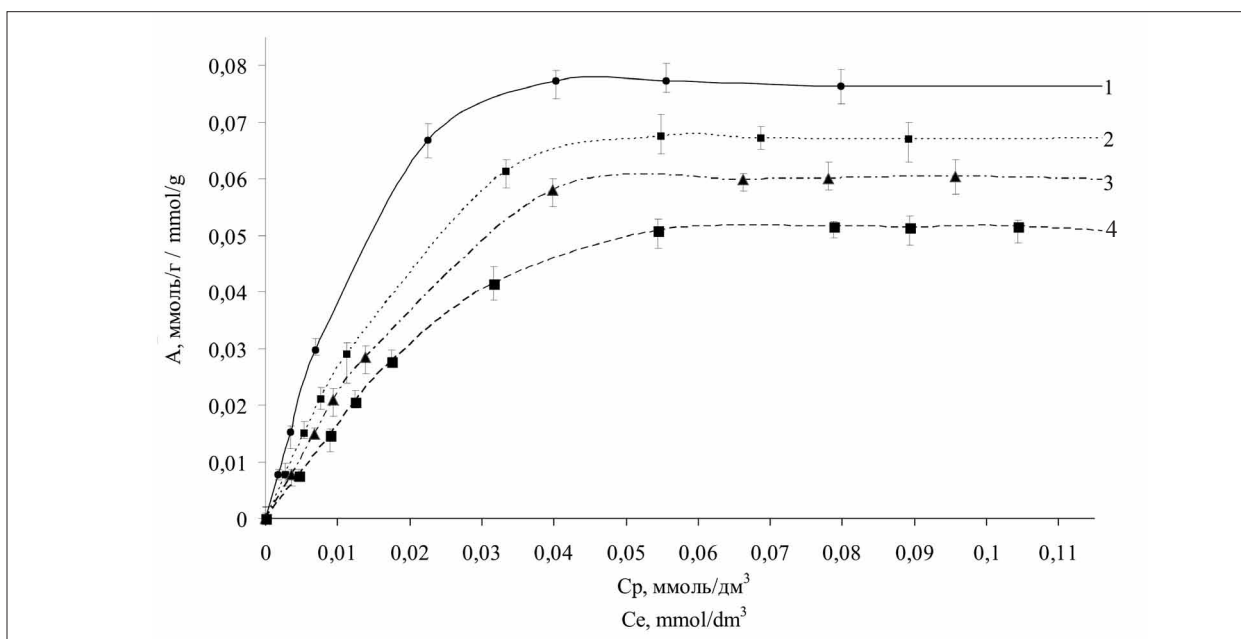
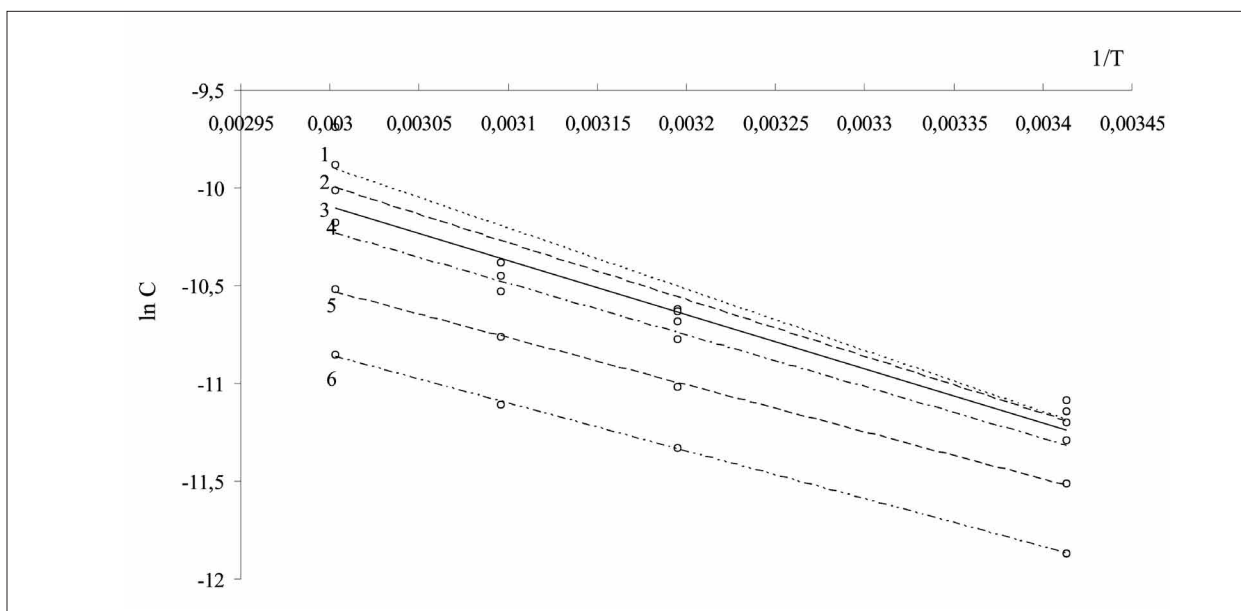


Рис. 1. Изотерма адсорбции додецилсульфата натрия (ДСН) карбонатным шламом, модифицированным парафином (ШМП). *Примечание: здесь и далее:*

Fig. 1. Adsorption isotherm of sodium dodecyl sulfate (SDS) by paraffin-modified sludge (PMS) *Note: here and further: A – sorption capacity; C<sub>e</sub> – SDS equilibrium concentration in solution*



**Рис. 2.** Изотермы адсорбции ДСН ШМП при различных температурах:  
1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К  
**Fig. 2.** Adsorption isotherms of SDS by PMS at different temperatures:  
1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 323 K, 4 – 333 K



**Рис. 3.** Изостеры адсорбции при  $A = \text{const}$ : 1 – 0,052 ммоль/г; 2 – 0,05 ммоль/г; 3 – 0,048 ммоль/г;  
4 – 0,045 ммоль/г; 5 – 0,038 ммоль/г; 6 – 0,03 ммоль/г  
**Fig. 3.** Adsorption isosteres at  $A = \text{const}$ : 1 – 0.052 mmol/g; 2 – 0.05 mmol/g; 3 – 0.048 mmol/g;  
4 – 0.045 mmol/g; 5 – 0.038 mmol/g; 6 – 0.03 mmol/g

сорбции при данной степени заполнения как тангенс угла наклона каждой прямой к оси абсцисс.

Изостерическая теплота адсорбции  $Q$ , Дж/моль, определяется по формуле (2):

$$Q = RT^2 \left( \frac{\partial \ln C}{\partial T} \right)_A = \frac{RT^2}{C} \left( \frac{\partial C}{\partial T} \right)_A, \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль·К;  $T$  – температура, К.

Приняв допущение, что изостерическая теплота адсорбции  $Q$  не зависит от температуры, что допустимо в узком интервале температур, уравнение интегрируется и представляется в виде (3):

$$\ln C = -\frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T} + \text{const.} \quad (3)$$

При этом  $\text{tg}\alpha = -\frac{Q}{R}$ . С помощью рисунка 4 определяются значения изостерической теплоты адсорбции (табл. 1). Величина изостерической теплоты адсорбции отрицательна, т. е. процесс адсорбции экзотермический, что характерно для физической адсорбции, обусловленной ван-дер-ваальсовыми силами.

Изостерическая теплота адсорбции позволяет учитывать неоднородность поверхности и различия в силах взаимодействия между адсорбатом и различными участками поверхности.

Для определения констант равновесия (констант Ленгмюра) изотермы адсорбции приводятся в виде уравнений Ленгмюра, которые описываются зависимостью в виде:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty K_L} \frac{1}{C_p}, \quad (4)$$

где  $K_L$  – константа Ленгмюра;  $A_\infty$  – предельная адсорбция, ммоль/г.

Полученные значения в координатах  $\frac{1}{A} = f\left(\frac{1}{C_p}\right)$  представлены на рисунке 4. Отрезок, отсекаемый на рисунке 4 по оси ординат,

равен  $\frac{1}{A_\infty}$ , а тангенс угла наклона прямой со-

ответствует  $\frac{1}{K_L A_\infty}$ . Результаты представлены в таблице 2. Используя найденные из эксперимента значения констант равновесия, рассчитаны значения свободной энергии Гиббса для процесса сорбции по уравнению Гиббса-Гельмгольца (табл. 2) [16] по формуле (5):

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_L, \quad (5)$$

где  $\Delta G^0$  – стандартная энергия Гиббса, кДж/моль.

Значения свободной энергии Гиббса с повышением температуры изменяются незначительно. Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса адсорбции [17].

Полученные значения используются для расчёта удельной поверхности гранул  $S_{уд}$

Таблица 1 / Table 1  
Значения изостерической теплоты адсорбции (Q) / Isosteric heat of adsorption (Q) values

A, ммоль/г / mmol/g	0,03	0,038	0,045	0,048	0,05	0,052
Q, кДж/моль / kJ/mol	-16,47	-23,14	-23,46	-23,63	-24,45	-26,13

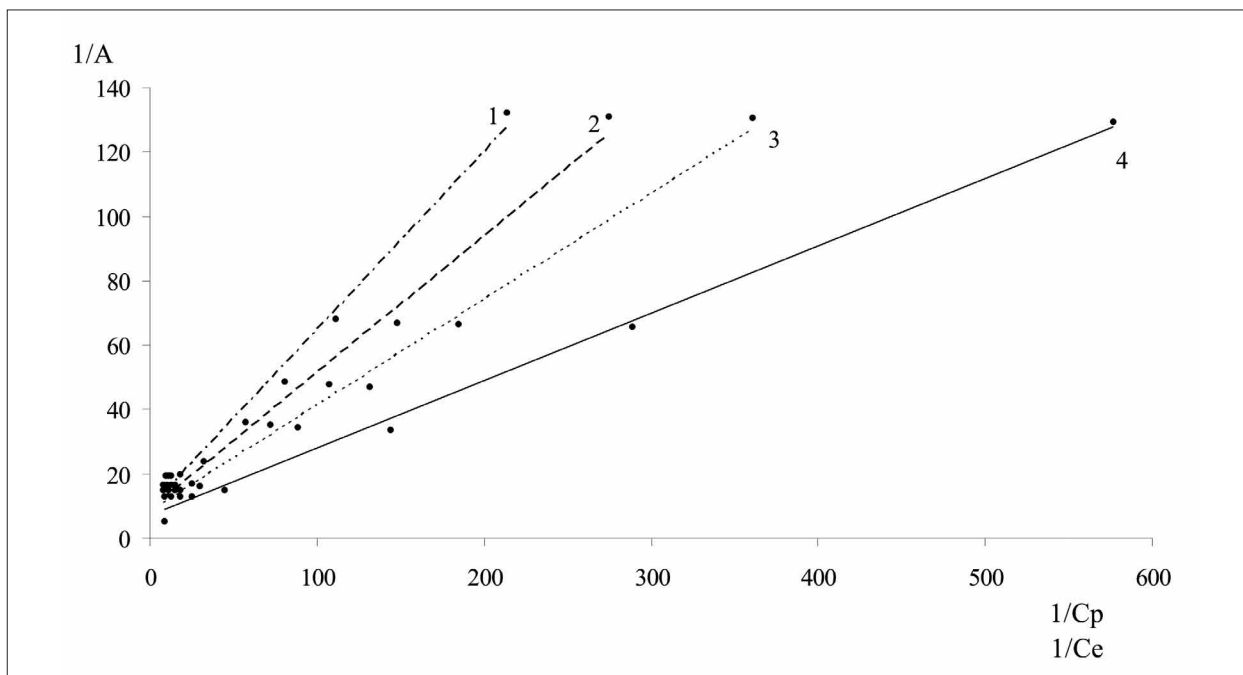


Рис. 4. Изотермы адсорбции в координатах линейного уравнения Ленгмюра при различных температурах: 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К  
Fig. 4. Adsorption isotherms in the coordinates of the linear Langmuir equation at different temperatures: 1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 323 K, 4 – 333 K

Таблица 2 / Table 2

Параметры адсорбционного равновесия (модель Ленгмюра)  
Parameters of adsorption equilibrium (Langmuir model)

Параметр Parameter	Температура (Т), К / Temperature (T), K			
	293	313	323	333
$A_{\infty}$ , ммоль/г / mmol/g	0,1362	0,1182	0,1131	0,1055
$K_L$	35,19	25,76	20,84	17,15
$\Delta G^0$ , кДж/моль / kJ/mol	-8,67	-8,45	-8,15	-7,86

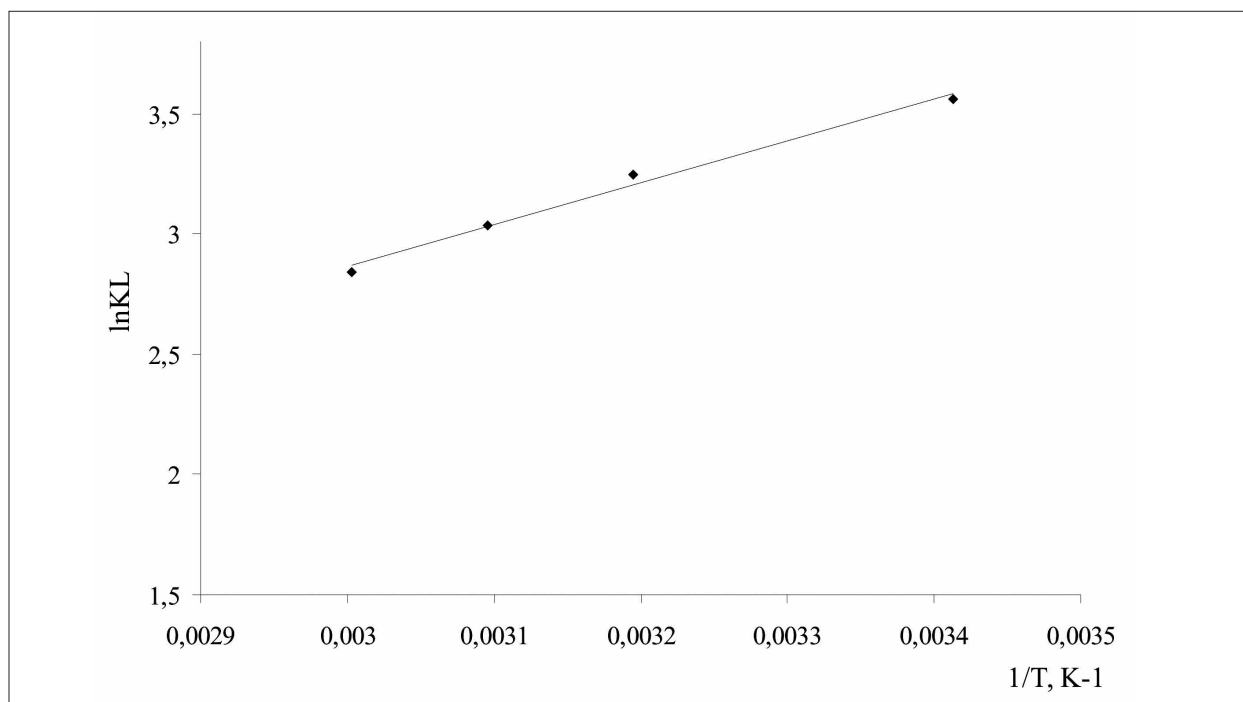


Рис. 5. Зависимость изменения  $\ln K_L$  от обратной температуры  
Fig. 5. Dependence of the change in  $\ln K_L$  on the inverse temperature

разработанного адсорбционного материала. Удельная поверхность определяется по формуле (6):

$$S_{уд} = A_{\infty} \cdot N_A \cdot S_0, \quad (6)$$

где  $S_0$  – площадь, которую занимает одна молекула ДСН на поверхности разработанного материала, м<sup>2</sup>;  $S_{уд}$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/г,  $N_A$  – число Авогадро,  $6,002 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Площадь молекулы ДСН составляет  $0,64 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup> [1]. Расчётное значение удельной поверхности материала составляет 52,24 м<sup>2</sup>/г.

Для более полного понимания процесса адсорбции ДСН на полученном материале проведён расчёт термодинамических параметров: энтальпии и энтропии процесса. Для расчёта энтальпии адсорбции  $\Delta H^0$  использовали уравнение (7):

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^0}{RT} + C. \quad (7)$$

Построен график зависимости  $\ln K_L$  от значения  $1/T, K^{-1}$ , (рис. 5).

По полученным значениям определяли энтальпию адсорбции как:  $\Delta H^0 = -Rtg\alpha$ . Далее проводили расчёт значений энтропии процессов адсорбции при разных температурах по уравнению (8):

$$\Delta S^0 = \frac{\Delta H^0 + \Delta G^0}{T}. \quad (8)$$

Рассчитанные термодинамические характеристики представлены в таблице 3.

Физическая адсорбция является экзотермическим процессом. Согласно принципу Ле Шателье, повышение температуры смещает равновесие системы в сторону эндотермического процесса – десорбции, что также способствует уменьшению скорости адсорбции. Таким образом, проведённые экспериментальные исследования и их обобщения свидетельствуют о протекании физической сорбции исследуемых примесей на поверхности материала.

Таблица 3 / Table 3

Термодинамические характеристики адсорбции ДСН ШМП  
Thermodynamic characteristics of SDS adsorption by PMS

Параметр / Parameter	Температура (Т), К / Temperature (T), K			
	293	313	323	333
$\Delta H^0$ , кДж/моль / kJ/mol	-14,46			
$\Delta G^0$ , кДж/моль / kJ/mol	-8,67	-8,45	-8,15	-7,86
$\Delta S^0$ , кДж/(моль·К) / kJ/(mol·K)	-19,76	-19,19	-19,52	-19,8

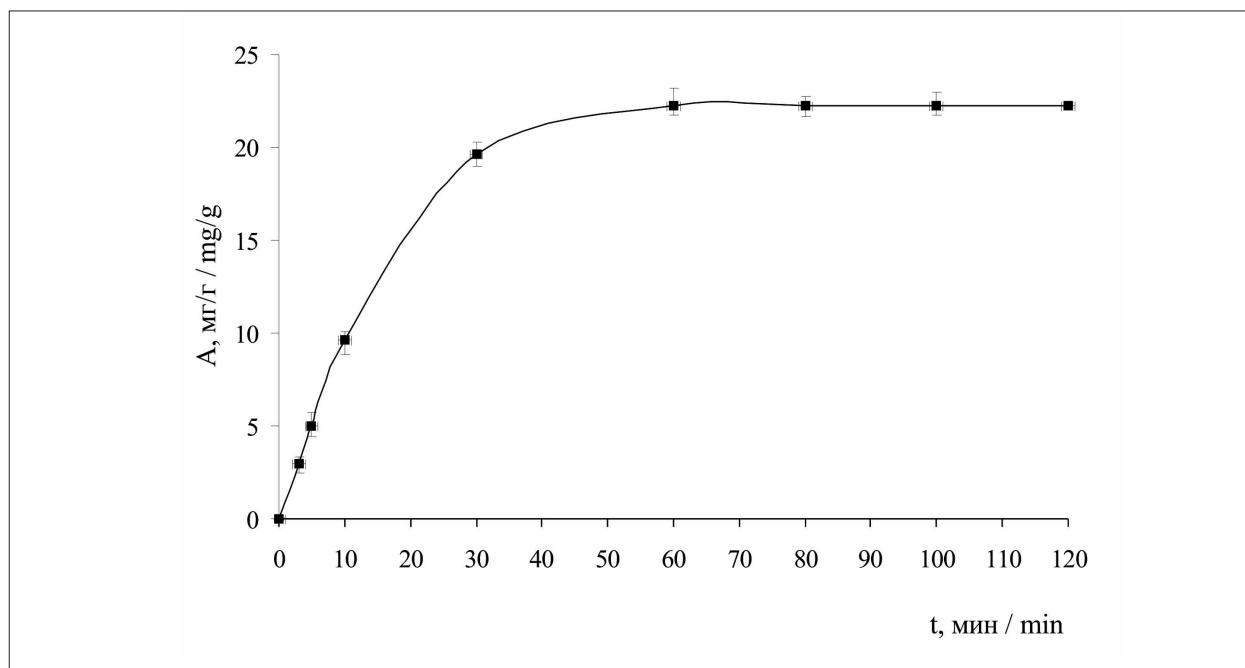


Рис. 6. Кинетическая кривая адсорбции ДСН ШМП  
Fig. 6. Kinetic curve of SDS adsorption by PMS

Для исследования механизма адсорбции на ШМП проведено экспериментальное определение кинетических зависимостей. Кинетическая кривая адсорбции ДСН представлена на рисунке 6.

Адсорбция ДСН ШМП реализуется на 80–90 % в первые 40–50 мин. Продолжительность адсорбции  $\tau$  составляет 60 мин.

Для исследования механизма процесса адсорбции получены кинетические кривые при различных температурах (рис. 7).

Процесс адсорбции ДСН ШМП рассматривается как обратимая реакция первого порядка [18]. В подобной реакции скорость равна разности скоростей прямой и обратной реакций, каждая из которых является реакцией первого порядка и определяется из уравнения (9):

$$-\frac{dx}{dt} = v_1 - v_2 = k_1(a - x) - k_2(b + x), \quad (9)$$

где  $a, b$  – исходные количества веществ, моль/дм<sup>3</sup>;  $x$  – количество вещества, прореагировавшего на момент времени  $\tau$ , моль/дм<sup>3</sup>;

$k_1$  и  $k_2$  – константы скоростей прямой и обратной реакции.

После преобразований уравнение имеет вид (10):

$$k = k_1 + k_2 = \frac{1}{\tau} \ln \left( \frac{x_\infty}{x_\infty - x} \right), \quad (10)$$

где  $x_\infty$  – количество прореагировавшего вещества на момент достижения равновесия, моль/дм<sup>3</sup>;  $k$  – эффективная константа скорости реакции.

По рисунку 8, на котором отражена зависимость изменения  $\frac{\ln(C_0 - C_\infty)}{C - C_\infty}$  по времени  $\tau$ ,

определили эффективную константу скорости реакции  $k$  как тангенс угла наклона. При этом

известно, что  $\frac{k_1}{k_2} = K_C$ , где  $K_C$  – константа равновесия, которую можно определить как

$$K_C = \frac{C_\infty}{C_0 - C_\infty}, \text{ где } C_\infty \text{ – концентрация в момент}$$

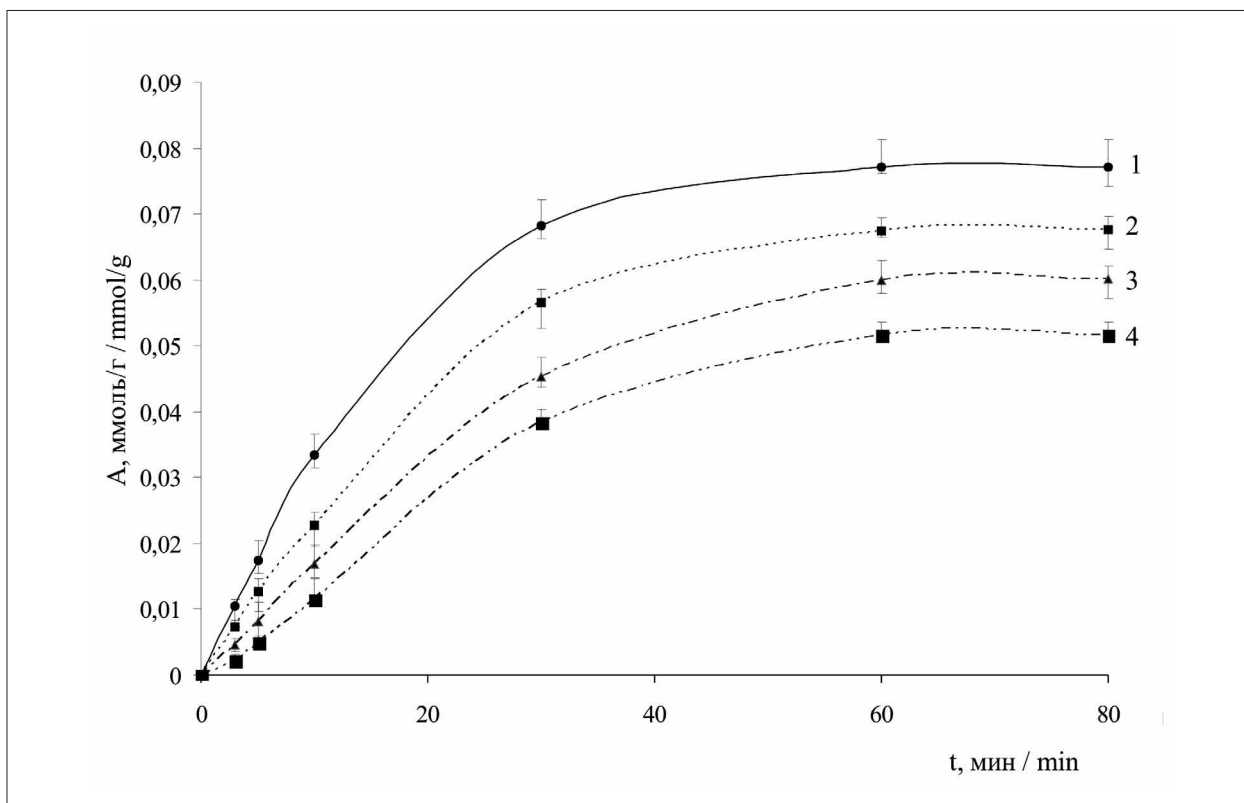


Рис. 7. Кинетические кривые адсорбции ДСН ШМП при различных температурах:  
 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К  
 Fig. 7. Kinetic curves of SDS adsorption by PMS at different temperatures:  
 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К

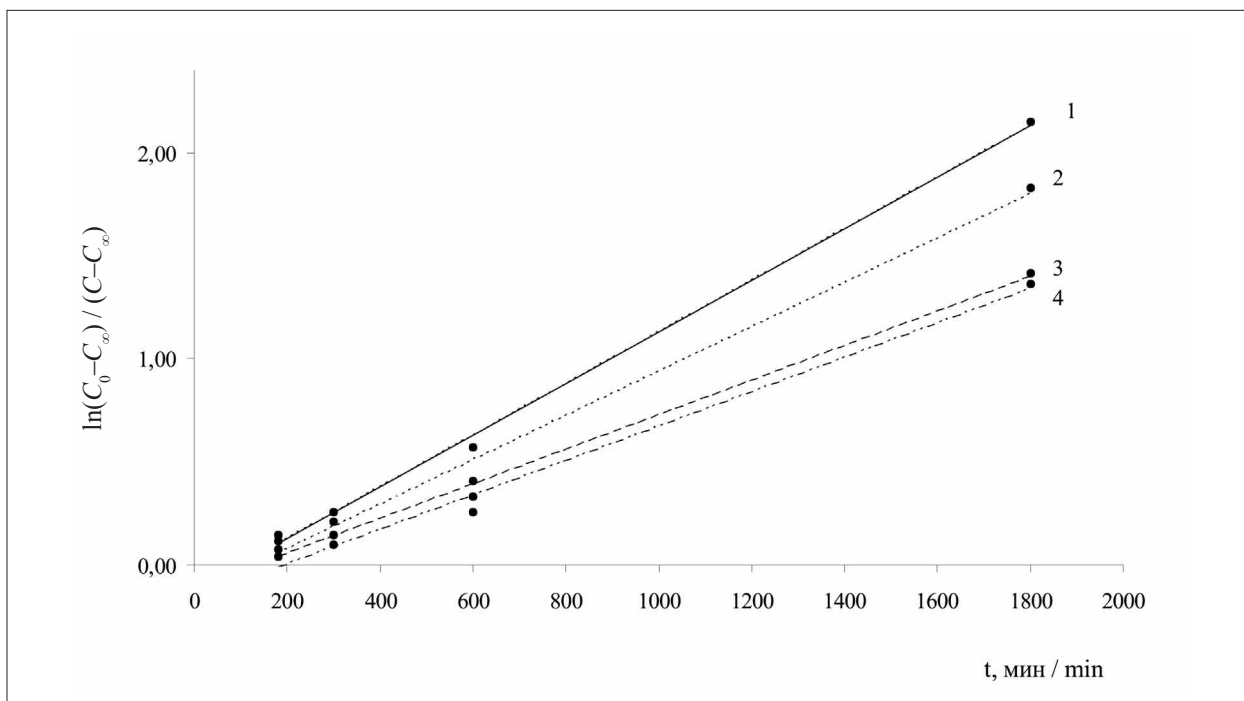


Рис. 8. Кинетические кривые адсорбции ДСН ШМП при различных температурах  
 в координатах  $\ln(C_0 - C_\infty) / (C - C_\infty)$ : 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К  
 Fig. 8. Kinetic curves of SDS adsorption by PMS at different temperatures  
 in coordinates  $\ln(C_0 - C_\infty) / (C - C_\infty)$ : 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К

Таблица 4 / Table 4

Значения эффективных констант и констант адсорбции при различных температурах  
Values of effective constants and adsorption constants at different temperatures

Параметр Parameter	Температура (Т), К / Temperature (T), K			
	293	313	323	333
$k, 10^{-3}, c^{-1} / s^{-1}$	0,54	1,12	1,31	1,44
$k_1, 10^{-4}, c^{-1} / s^{-1}$	2,61	3,32	3,39	3,41

наступления адсорбционного равновесия. Решение системы уравнений позволяет определить константы  $k_1$ . Рассчитанные значения  $k$  и  $k_1$  представлены в таблице 4.

Логарифмические зависимости (рис. 8) имеют линейный вид, что подтверждает протекание адсорбции ионов в виде реакции первого порядка. При возрастании температуры происходит снижение констант скорости адсорбции, что свидетельствует о протекании физической адсорбции, которая происходит благодаря силам Ван-дер-Ваальса между молекулами адсорбента и адсорбата.

Для расчёта энергии активации адсорбции строится зависимость  $\ln k_1$  от значения  $1/T, K^{-1}$  (рис. 9). Расчёт значения энергии активации  $E_{акт}$  основан на решении уравнения Аррениуса (11):

$$k_1 = A \cdot e^{-\frac{E_{акт}}{RT}}, \quad (11)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель, как тангенс угла наклона:  $\operatorname{tg} \alpha = -\frac{E_{акт}}{R}$ .

Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. Полученное значение характерно для протекания физической адсорбции.

### Заключение

В работе исследован механизм адсорбции АСПАВ на материале, полученном из отхода энергетики со связующим. Экспериментально получены изотермы адсорбции, рассчитаны константы адсорбционного равновесия и изостерические теплоты адсорбции. Определены основные термодинамические и кинетические характеристики процесса адсорбции, которые свидетельствуют, что адсорбция носит физический характер и обусловлена ван-дер-ваальсовыми силами, процесс является экзотермическим. Определена энергия активации адсорбции. Продолжительность адсорбции додецилсульфата натрия на разработанном материале составляет 60 мин.

Таким образом, полученные результаты объясняют природу сорбционного извлечения

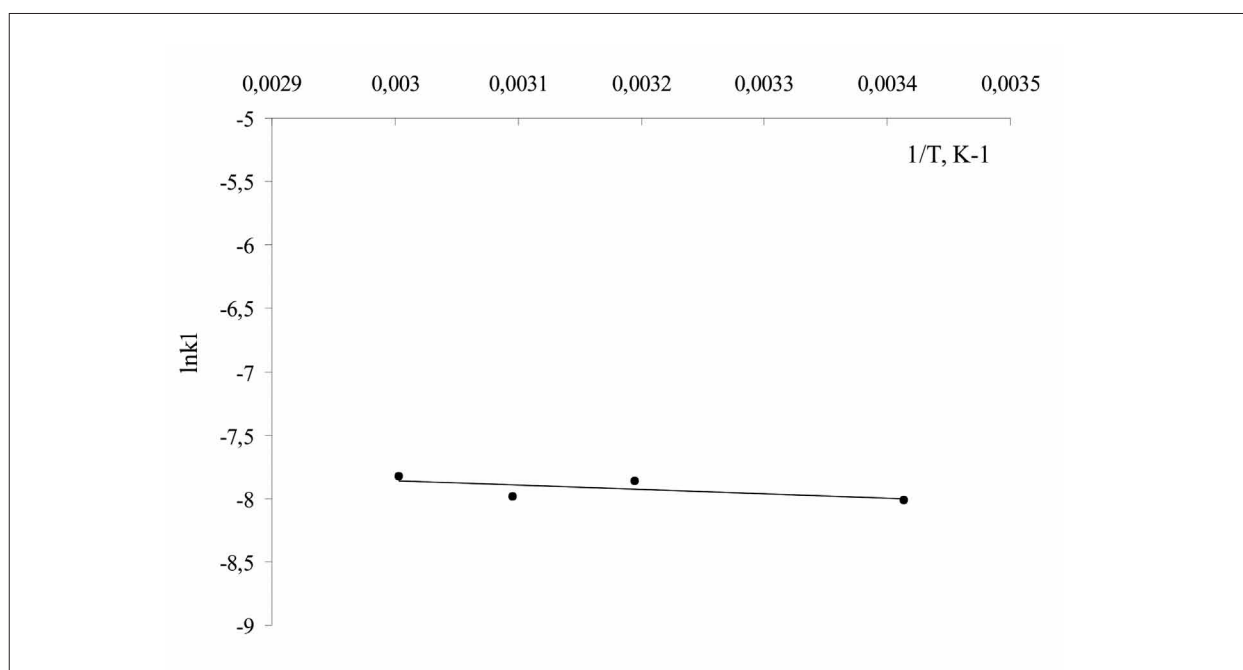


Рис. 9. Зависимость изменения  $\ln k_1$  от обратной температуры ( $1/T$ )  
Fig. 9. Dependence of the  $\ln k_1$  change on the inverse temperature ( $1/T$ )

АСПАВ на разработанном материале и могут быть использованы при разработке экологически безопасных технологий локальной очистки сточных вод.

*Работа выполнена за счёт предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан № 9 от 01.12.2025.*

### Литература

1. Шачнева Е.Ю. Поверхностно-активные вещества в объектах окружающей среды. Методы очистки сточных вод. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 65 с.
2. Liu X., Zorina T.G. Regional pollution and the geographical distribution of pollution intensive industries in China // Kazan State Power Engineering University Bulletin. 2024. V. 16. No. 3 (63). P. 106–119.
3. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // Water Res. 2018. V. 147. No. 12. P. 60–72. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.039
4. Ильин В.И. Технологические процессы и способы очистки производственных сточных вод. М.: ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2014. 103 с.
5. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Low A., Rabat N.E. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater // Journal of Environmental Management. 2020. V. 254. Article No. 109797. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109797
6. Закиров Р.К., Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С. Перспективы сонохимической обработки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные вещества // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 111–116. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116
7. Экспериментальные методы в очистке сточных вод: монография / гл. ред. М. ван Лосдрехт, П.Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович. Томск: изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. 346 с.
8. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Anionic surfactant adsorption on activated carbons produced from lignin and modified with cellulose sulfacetate // Colloid J. 2024. V. 86. P. 33–39. doi: 10.1134/S1061933X23601117
9. Шабуров Е.Л., Деревянко О.В., Федюхин А.В., Смятская Ю.А., Политаева Н.А. Определение теплотворной способности отработанных сорбентов из остаточной биомассы *Chlorella Sorokiniana* и ряски *Lemna minor* // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 113–121.

10. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Rabat N.E., Zulfiqar M., Ayoub M., Azizli K.A. Removal of anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water using fly ash adsorbent // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 458. Article No. 012043. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012043
11. Solińska A., Marchewka J., Sitarz M., Bajda T. Infrared spectroscopy: the key to elucidating the sorption mechanism of surfactants, dyes and pharmaceuticals on mineral composite material // Spectrochimica Acta A Mol. Biomol. Spectrosc. 2023. V. 299. Article No. 122758. doi: 10.1016/j.saa.2023.122758
12. Mkilima T., Zharkenov Y., Utepbergenova L., Abduova A., Sarypbekova N., Smagulova E., Abdulkalikova G., Kamidulla F., Zhumadilov I. Harnessing graphene oxide-enhanced composite metal-organic frameworks for efficient wastewater treatment // Water Cycle. 2024. V. 5. P. 86–98. doi: 10.1016/j.watcyc.2024.02.005
13. Zou M., Zhang H., Miyamoto N., Kano N., Okawa H. Adsorption of an anionic surfactant (sodium dodecyl sulfate) from an aqueous solution by modified cellulose with quaternary ammonium // Polymers (Basel). 2022. V. 14. No. 7. Article No. 1473. doi: 10.3390/polym14071473
14. Стрельцова Е.А., Гросул А.А. Адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и Твинов из водных растворов на парафине // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 1. С. 129–137.
15. Николаева Л.А., Исакова Р.Я. Адсорбционная очистка газовых выбросов отходом производства от оксидов азота // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 1 (93). С. 99–106.
16. Dolganov A.V., Balandina A.V., Chugunov D.B., Timonina A.S., Klimaeva L.A., Shingina V.V., Knyazev A.V. Kinetic and thermodynamic characteristics of the sorption of fluoride ions using a composite based on cellulose and alumina // Russ. J. Phys. Chem. 2020. V. 94. P. 2121–2125. doi: 10.1134/S0036024420100076
17. Сютова Е.А., Джигола Л.А. Исследование кинетических закономерностей твёрдофазного концентрирования ионов кальция природными сорбентами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 1. С. 64–78. doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2381
18. Yakovleva A.A., Nguyen T.T. Characteristics of sorption on surfaces of river sands with the participation of iron(III) ions // Russ. J. Phys. Chem. 2021. V. 95. P. 1216–1221. doi: 10.1134/S0036024421060285

### References

1. Shachneva E.Yu. Surfactants in the Environment. Wastewater Treatment Methods. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 65 p. (in Russian).
2. Liu X., Zorina T.G. Regional pollution and the geographical distribution of pollution intensive industries in China // Kazan State Power Engineering University Bulletin. 2024. V. 16. No. 3 (63). P. 106–119.

3. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // *Water Res.* 2018. V. 147. No. 12. P. 60–72. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.039
4. Il'in V.I. Technological processes and methods for treating industrial wastewater. Moscow: RKHTU im. D. I. Mendeleeva, 2014. 103 p. (in Russian).
5. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Low A., Rabat N.E. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater // *Journal of Environmental Management.* 2020. V. 254. Article No. 109797. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109797
6. Zakirov R.K., Akhmadullina F.Y., Balymova E.S. Prospects for sonochemical treatment of wastewater containing synthetic surfactants // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 111–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116
7. Experimental methods in wastewater treatment: monograph / Eds. M. van Losdrekht, P.H. Nil'sen, K. Lopes-Vaskes, D. Brdjanovic. Tomsk: izd-vo TGASU, 2020. 346 p. (in Russian).
8. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Anionic surfactant adsorption on activated carbons produced from lignin and modified with cellulose sulfoacetate // *Colloid J.* 2024. V. 86. P. 33–39. doi: 10.1134/S1061933X23601117
9. Shaburov E.L., Derevianko O.V., Fedyuhin A.V., Smyatskaya Yu.A., Politaeva N.A. Determination of thermal capacity of processed sorbents from residual biomass of *Chlorella Sorokiniana* and duckweed *Lemna minor* // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki.* 2019. V. 21. No. 3-4. P. 113–121 (in Russian).
10. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Rabat N.E., Zulfiqar M., Ayoub M., Azizli K.A. Removal of anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water using fly ash adsorbent // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. V. 458. Article No. 012043. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012043
11. Solińska A., Marchewka J., Sitarz M., Bajda T. Infrared spectroscopy: the key to elucidating the sorption mechanism of surfactants, dyes and pharmaceuticals on mineral composite material // *Spectrochimica Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2023. V. 299. Article No. 122758. doi: 10.1016/j.saa.2023.122758
12. Mkilima T., Zharkenov Y., Utepbergenova L., Abduova A., Sarypbekova N., Smagulova E., Abdulkalova G., Kamidulla F., Zhumadilov I. Harnessing graphene oxide-enhanced composite metal-organic frameworks for efficient wastewater treatment // *Water Cycle.* 2024. V. 5. P. 86–98. doi: 10.1016/j.watcyc.2024.02.005
13. Zou M., Zhang H., Miyamoto N., Kano N., Okawa H. Adsorption of an anionic surfactant (sodium dodecyl sulfate) from an aqueous solution by modified cellulose with quaternary ammonium // *Polymers (Basel).* 2022. V. 14. No. 7. Article No. 1473. doi: 10.3390/polym14071473
14. Streltsova E.A., Grosul A.A. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, alkylammonium chloride and Twins from water solution on the paraffin // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2014. V. 14. No. 1. P. 129–137 (in Russian).
15. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ya. Adsorption purification of gas emissions from industrial waste from nitrogen oxides // *Science and Technology in the Gas Industry.* 2023. No. 1 (93). P. 99–106 (in Russian).
16. Dolganov A.V., Balandina A.V., Chugunov D.B., Timonina A.S., Klimaeva L.A., Shingina V.V., Knyazev A.V. Kinetic and thermodynamic characteristics of the sorption of fluoride ions using a composite based on cellulose and alumina // *Russ. J. Phys. Chem.* 2020. V. 94. P. 2121–2125. doi: 10.1134/S0036024420100076
17. Syutova E.A., Dzhigola L.A. Study of kinetic regularities of solid-phase concentration of calcium ions by natural sorbents // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2020. V. 20. No. 1. P. 64–78 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2381
18. Yakovleva A.A., Nguyen T.T. Characteristics of sorption on surfaces of river sands with the participation of iron(III) ions // *Russ. J. Phys. Chem.* 2021. V. 95. P. 1216–1221. doi: 10.1134/S0036024421060285