

КИНЕТИКА РЕАКЦИИ ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИД-ИОНОВ В РАСТВОРАХ АЛКАНОЛАМИНОВ

Д.А. Леонтьев, А.М. Багавеев, Р.М. Ахмадуллин, Х.Э. Харлампи

Дмитрий Анатольевич Леонтьев (ORCID 0009-0004-2724-3739), Артур Марселевич Багавеев (ORCID 0009-0008-1921-1576)*, Ренат Маратович Ахмадуллин (ORCID 0000-0002-3215-275X)

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «Ахмадуллины», ул. Сибирский тракт, 34, Казань, Российская Федерация, 420029

E-mail: dm.leontyev1@gmail.com, bagaveevartur1@gmail.com*, ahmadullinr@gmail.com

Харлампиий Эвклидович Харлампи (ORCID 0000-0003-3157-873X)

Кафедра общей химической технологии, Казанский Национальный Технологический Университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

E-mail: oxt@kstu.ru

Нефтегазохимическая промышленность является одной из наиболее стремительно развивающихся отраслей, которая играет ключевую роль в мировой экономике. Смесь легких углеводородов (метан, этан, пропан, бутан и др.), растворенных под давлением в нефти, составляет основу попутного нефтяного газа (ПНГ). В ПНГ также содержится коррозионно-активный сероводород, требующий эффективного удаления. Одной из современных технологий очистки ПНГ от сероводорода является алканоламиновая очистка. Сульфиды алканоламинов, образующиеся при взаимодействии сероводорода с алканолaminaми, в процессе термической регенерации частично превращаются в термостабильные соли, что приводит к накоплению нежелательных примесей в растворе. Авторами настоящей работы предложен способ жидкофазной некаталитической окислительной регенерации алканоламинов с выделением элементной серы. Исследованы основные кинетические закономерности реакции окисления сульфидов моноэтаноламина, метилдиэтаноламина и диэтаноламина в зависимости от начальной концентрации сульфида алканолamina и температуры. Среди трех исследованных сульфидов алканоламинов наиболее высокой скоростью окисления обладает сульфид диэтаноламина. Для сульфида моноэтаноламина наблюдается дробный порядок реакции окисления, для сульфида диэтаноламина второй и для сульфида метилдиэтаноламина – первый. Наименьшая энергия активации реакции окисления наблюдается для сульфида диэтаноламина и составляет 26,8 кДж/моль, 32,8 кДж/моль для моноэтаноламина и 38,0 кДж/моль для метилдиэтаноламина. Предэкспоненциальный множитель для сульфида диэтаноламина равен 34,13 с⁻¹, для сульфида моноэтаноламина 215,45 с⁻¹, для сульфида метилдиэтаноламина 347,38 с⁻¹. На примере сульфида диэтаноламина определено уравнение скорости реакции некаталитического окисления, определен порядок реакции по сульфиду алканолamina и кислороду, рассчитана кажущаяся энергия активации.

Ключевые слова: сероочистка, алканоламины, сульфид алканолamina, элементная сера, жидкофазное окисление

KINETICS OF THE LIQUID-PHASE OXIDATION REACTION OF SULFIDE IONS IN ALKANOLAMINE SOLUTIONS

D.A. Leontyev, A.M. Bagaveev, R.M. Akhmadullin, Kh.E. Kharlampidi

Dmitriy A. Leontyev (ORCID 0009-0004-2724-3739), Artur M. Bagaveev (ORCID 0009-0008-1921-1576)*, Renat M. Akhmadullin (ORCID 0000-0002-3215-275X)

Limited Liability Company «Scientific and Technical Center «Akhmadullins», Sibirskiy trakt, 34, Kazan, 420029, Russia

E-mail: dm.leontyev1@gmail.com, bagaveevartur1@gmail.com*, ahmadullinr@gmail.com

Kharlampiy E. Kharlampidi (ORCID 0000-0003-3157-873X)

Department of General Chemical Technology, Kazan National Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, 420015, Russia

E-mail: oxt@kstu.ru

The petrochemical and oil-and-gas industry is one of the most rapidly developing sectors and plays a key role in the global economy. A mixture of light hydrocarbons (methane, ethane, propane, butane, etc.) dissolved under pressure in crude oil constitutes the basis of associated petroleum gas (APG). APG also contains corrosive hydrogen sulfide, which requires effective removal. One of the modern technologies for hydrogen sulfide removal from APG is alkanolamine gas sweetening. Alkanolamine sulfides formed during the interaction of hydrogen sulfide with alkanolamines partially transform into heat-stable salts during thermal regeneration, which leads to the accumulation of undesirable impurities in the solution. In the present work, a method of liquid-phase non-catalytic oxidative regeneration of alkanolamines with the formation of elemental sulfur is proposed. The main kinetic features of the oxidation reaction of monoethanolamine, methyldiethanolamine, and diethanolamine sulfides were investigated as a function of the initial concentration of alkanolamine sulfide and temperature. Among the three alkanolamine sulfides studied, diethanolamine sulfide exhibits the highest oxidation rate. A fractional reaction order is observed for the oxidation of monoethanolamine sulfide, a second-order reaction for diethanolamine sulfide, and a first-order reaction for methyldiethanolamine sulfide. The lowest activation energy of the oxidation reaction is observed for diethanolamine sulfide and equals 26.8 kJ/mol, while the values for monoethanolamine and methyldiethanolamine sulfides are 32.8 kJ/mol and 38.0 kJ/mol, respectively. The pre-exponential factor for diethanolamine sulfide is 34.13 s^{-1} , for monoethanolamine sulfide 215.45 s^{-1} , and for methyldiethanolamine sulfide 347.38 s^{-1} . Using diethanolamine sulfide as an example, the rate equation of the non-catalytic oxidation reaction was determined, the reaction orders with respect to alkanolamine sulfide and oxygen were established, and the apparent activation energy was calculated.

Keywords: desulfurization, alkanolamines, alkanolamine sulfide, elemental sulfur, liquid-phase oxidation

Для цитирования:

Леонтьев Д.А., Багавеев А.М., Ахмадуллин Р.М., Харлампиدي Х.Э. Кинетика реакции жидкофазного окисления сульфид-ионов в растворах алканоломинов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 49–55. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6985.

For citation:

Leontyev D.A., Bagaveev A.M., Akhmadullin R.M., Kharlampidi Kh.E. Kinetics of the liquid-phase oxidation reaction of sulfide ions in alkanolamine solutions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 49–55. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6985.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день химия серы и ее соединений является стремительно развивающейся отраслью химической науки [1]. В частности, сероочистка попутного нефтяного газа (ПНГ) является одной из ключевых стадий нефтепереработки [2, 3]. Сероводород, содержащийся в ПНГ, вызывает интенсивную коррозию оборудования, поэтому его удаление требует применения эффективных, но энергоемких процессов очистки [4].

Существуют различные методы удаления сероводорода из ПНГ, которые условно можно разделить на 3 группы: абсорбционные, адсорбционные и каталитические [5]. При высоком содержании

сероводорода используют абсорбционные методы очистки, однако осуществление полной очистки по данному методу невозможно [6]. Для более тонкого удаления остаточных количеств сероводорода применяют адсорбционные методы [7], недостатком которых являются крайне высокие эксплуатационные затраты. Каталитическую очистку используют при наличии в ПНГ примесей, не поддающихся очистке сорбционными способами [8, 9].

Ключевую роль в удалении сероводорода из ПНГ занимают абсорбционные процессы с участием водных растворов алканоломинов (моноэтаноламина (МЭА), диэтаноламина (ДЭА) и метилдиэтаноламина (МДЭА)) в качестве абсорбентов

сероводорода [10-15]. Абсорбция сероводорода алканолaminaми осуществляется за счет их химического взаимодействия [16]:

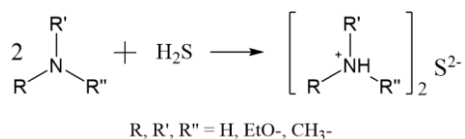


Схема 1. Взаимодействие алканоламинов с сероводородом
Scheme 1. Interaction of alkanolamines with hydrogen sulfide

Однако, несмотря на распространенность данного метода очистки ПНГ, указанный способ имеет существенный недостаток, заключающийся в необходимости термической регенерации абсорбента, которая сопровождается большими теплоэнергетическими затратами и образованием нерегенерируемых продуктов термической деструкции алканоламинов [17-19]. Проведенные ранее исследования [20] сообщают о возможности осуществления регенерации абсорбента путем окисления сульфидов алканоламинов кислородом воздуха, с последующим отделением элементарной серы от алканоламинов, вместо традиционной термической десорбции [21]:

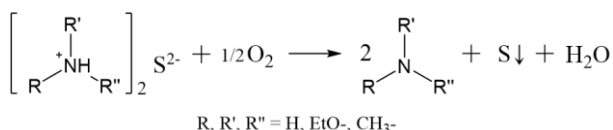


Схема 2. Окисление сульфидов алканоламинов кислородом
Scheme 2. Oxidation of alkanolamine sulfides by oxygen

Целью настоящей работы является изучение кинетических закономерностей жидкофазного окисления кислородом сульфидов алканоламинов для выявления наиболее активного в данной реакции алканолamina.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе в качестве реагентов использованы моноэтаноламин (99,70%, ГОСТ 19234-87), метилдиэтаноламин (99,70%, ТУ 2423-005-11159873-2010), диэтаноламин (99,70%, ТУ 2423-178-00203335-2004), вода дистиллированная (ГОСТ 6709-72), серная кислота (ГОСТ 4204-77) сульфид натрия (ГОСТ 596-89).

Приготовление растворов алканоламинов

В работе были использованы 15% водный раствор моноэтаноламина, 30% водный раствор диэтаноламина, 30% водный раствор метилдиэтаноламина, приготовленные гравиметрическим методом.

Насыщение сероводородом растворов алканоламинов

В трехгорлый реактор объемом 1000 мл, снабженный термопарой и соединенный со склянкой Дрекслея, загружали 300 мл 10%-ой серной кислоты. Из делительной воронки при непрерывном перемешивании, в реактор медленно прикапывали 230 мл 10% раствора сульфида натрия, не допуская повышения температуры выше 40 °С. Образующийся сероводород поступал в склянку Дрекслея, наполненную расчетным количеством раствора алканолamina, и далее поглощался за счет образования сульфидов алканоламинов.

Проведение кинетических исследований

Окисление сульфидов проводили в стеклянном трехгорловом цилиндрическом реакторе объемом 100 см³. В реактор загружали 50 мл раствора алканолamina, насыщенного сероводородом. Кислород из баллона подавали в реакционный раствор со скоростью 150 ч⁻¹. Избыток кислорода из реактора отводили в атмосферу через обратный водяной холодильник. Реакционную смесь перемешивали со скоростью 1500 об/мин. Температура реакционной массы составляла 70 °С. По ходу эксперимента через определенные промежутки времени прекращалась подача кислорода, отключалась магнитная мешалка, отбирались пробы, в которых количественно определялось содержание сульфидов в соответствии с методикой [22].

Расход кислорода до и после реактора окисления определяли по разности показаний газового счетчика ГСБ-400 во времени.

Концентрацию кислорода в воздухе определяли на сенсоре KE-25 (GS Oxygen Sensor), 7,7 ~ 15,0 мВ, точность измерения ±1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено сравнительное исследование скорости реакции жидкофазного окисления сульфидов алканоламинов кислородом (рис. 1). Среди трех исследованных сульфидов алканоламинов наиболее высокая скорость реакции наблюдалась у сульфида диэтаноламина. Предполагалось, что данный результат может быть обусловлен совокупностью физико-химических факторов: более низкой энергией активации реакции окисления; меньшей стабильностью комплекса сероводорода с ДЭА по сравнению с МЭА и МДЭА; образованием в процессе окисления промежуточных продуктов (дисульфидов, полисульфидов), ускоряющих реакцию; а также структурными особенностями ДЭА – наличием двух гидроксильных групп и отсутствием объемных заместителей, что облегчает доступ кислорода.

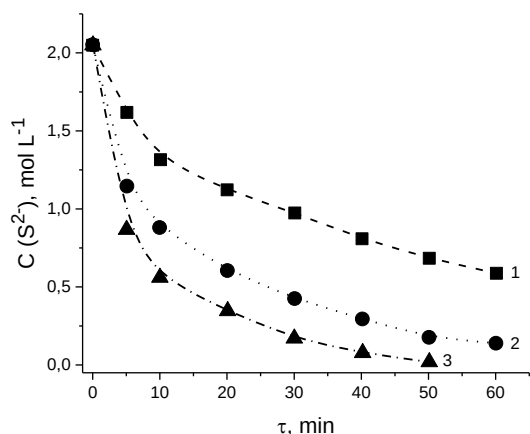


Рис. 1. Кинетические кривые окисления сульфида метилдиэтанолamina (1), моноэтанолamina (2) и диэтанолamina (3)
Fig. 1. Kinetic curves of oxidation of methyl diethanolamine sulfide (1), monoethanolamine sulfide (2), and diethanolamine sulfide (3)

С целью подтверждения выдвинутых предположений дифференциальным методом, при раз-

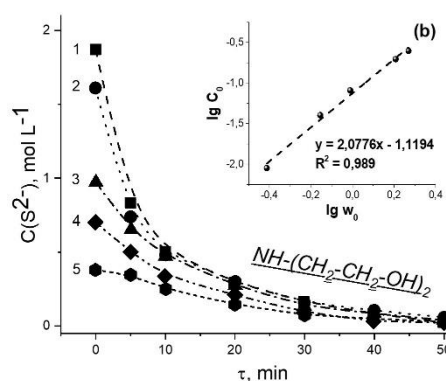
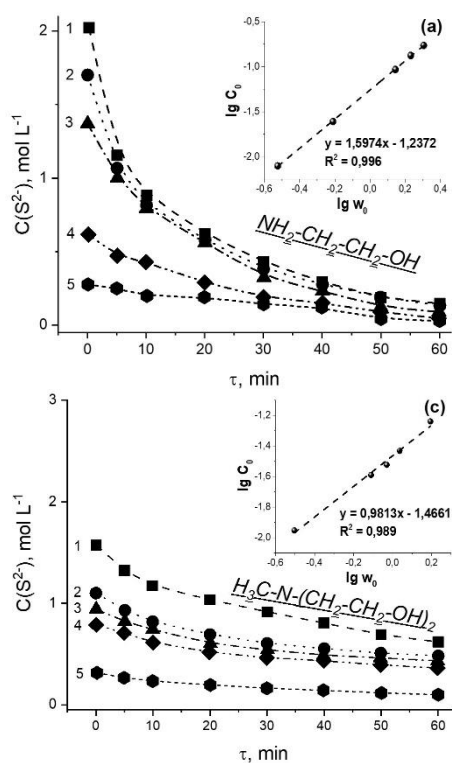


Рис. 2. Окисление сульфидной серы кислородом в зависимости от начальной концентрации (моль/л) сульфида алканолamina:
(a) сульфид моноэтанолamina: 1 - 2,023; 2 - 1,705; 3 - 1,386; 4 - 0,614; 5 - 0,295; (b) сульфид диэтанолamina: 1 - 1,884; 2 - 1,614; 3 - 0,977; 4 - 0,705; 5 - 0,386; (c) сульфид метилдиэтанолamina: 1 - 1,563; 2 - 1,094; 3 - 0,938; 4 - 0,781; 5 - 0,313. На вставках: Логарифмическая зависимость начальной скорости окисления от начальной концентрации сульфида алканолamina

Fig. 2. Oxidation of sulfide sulfur by oxygen as a function of the initial concentration (mol/l) of alkanolamine sulfide: (a) monoethanolamine sulfide: 1 - 2.023; 2 - 1.705; 3 - 1.386; 4 - 0.614; 5 - 0.295; (b) diethanolamine sulfide: 1 - 1.884; 2 - 1.614; 3 - 0.977; 4 - 0.705; 5 - 0.386; (c) methyldiethanolamine sulfide: 1 - 1.563; 2 - 1.094; 3 - 0.938; 4 - 0.781; 5 - 0.313. Inset: Logarithmic relationship between the initial oxidation rate and the initial concentration of alkanolamine sulfide

Исходя их полученных результатов исследований, наименьшая энергия активации наблюдается для сульфида диэтанолamina, что подтверждает выдвинутое ранее предположение и обуславливает более высокую скорость реакции окис-

ления среди трех исследуемых сульфидов алканолamines.

Результаты проведенных кинетических исследований свидетельствуют о дробном (для сульфида МЭА), втором (для сульфида ДЭА) и первом (для сульфида МДЭА) порядках реакций по сульфиду.

С целью оценки кажущейся энергии активации реакции окисления сульфидов алканолamines была исследована температурная зависимость эффективной константы скорости в интервале 30-70 °С (рис. 3). Значения кажущихся энергий активации составляют 32,8 кДж/моль (для сульфида МЭА), 26,8 кДж/моль (для сульфида ДЭА) и 38 кДж/моль (для сульфида МДЭА) (Произведение тангенса угла наклона кривой, построенной в координатах $\ln k$ от $1000/T$ и газовой постоянной).

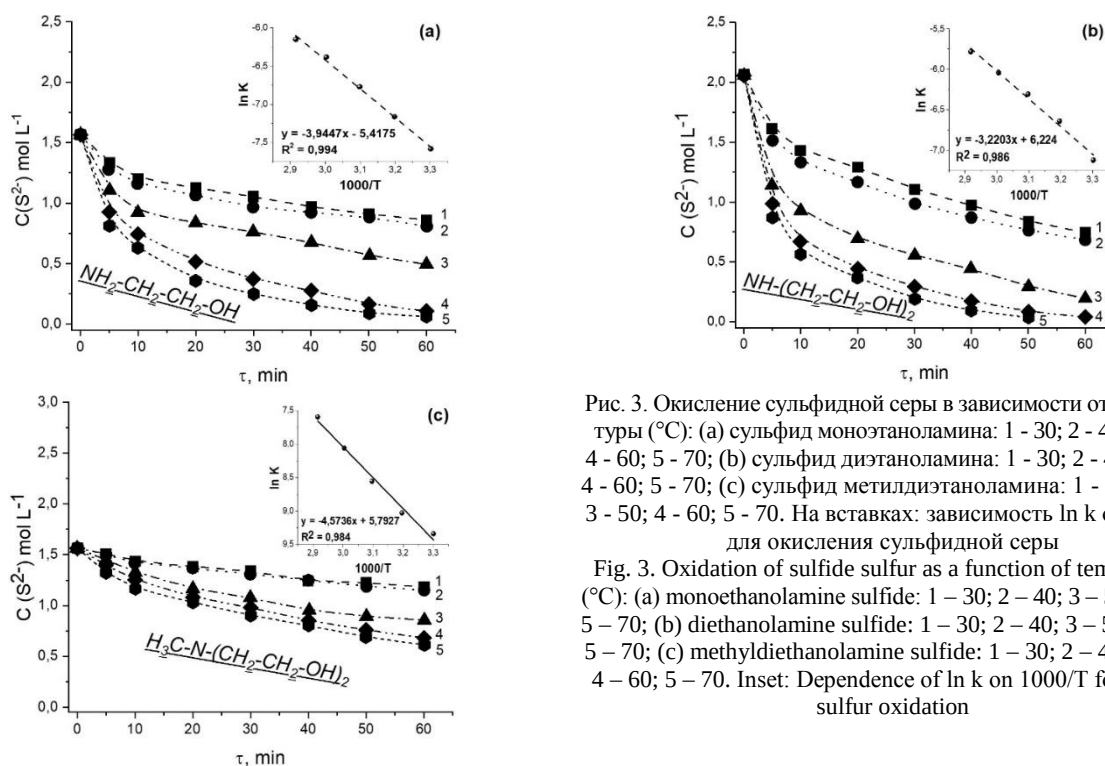


Рис. 3. Окисление сульфидной серы в зависимости от температуры (°C): (a) сульфид моноэтаноламина: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70; (b) сульфид диэтаноламина: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70; (c) сульфид метилдиэтаноламина: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70. На вставках: зависимость $\ln k$ от $1000/T$ для окисления сульфидной серы

Fig. 3. Oxidation of sulfide sulfur as a function of temperature (°C): (a) monoethanolamine sulfide: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70; (b) diethanolamine sulfide: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70; (c) methyldiethanolamine sulfide: 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60; 5 - 70. Inset: Dependence of $\ln k$ on $1000/T$ for sulfide sulfur oxidation

Таблица

Кинетические параметры реакции окисления сульфидной серы в растворах различных алканоломинов
Table. Kinetic parameters of the sulfide sulfur oxidation reaction in solutions of various alkanolamines

Алканоламин	Порядок реакции по сульфидной сере	Энергия активации, [кДж/моль]	Предэкспоненциальный множитель, [с ⁻¹]
15% МЭА	Дробный	32,8	215,45
30% ДЭА	2	26,8	34,13
30% МДЭА	1	38,0	347,38

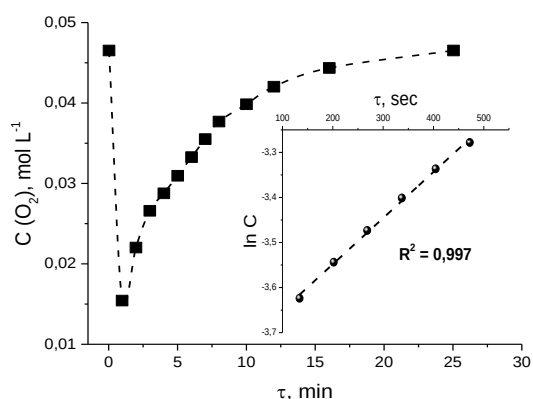


Рис. 4. Кинетическая кривая расходования кислорода в реакции окисления сульфида диэтаноламина
Fig. 4. Kinetic curve of oxygen consumption in the oxidation of diethanolamine sulfide

Таким образом, диэтаноламин является наиболее активным реагентом из трех исследованных алканоломинов, и реакция некаталитического окисления его сульфида представляет интерес для дальнейшего более подробного изучения.

Кинетические исследования окисления сульфидной серы, направленные на определение порядка реакции по кислороду, выполнены на примере сульфида диэтаноламина.

Как видно из рис. 4, логарифмическая зависимость концентрации кислорода от времени представляет собой прямую, что свидетельствует о первом порядке реакции по кислороду.

С учетом полученных данных, расчетное уравнение скорости реакции некаталитического окисления сульфида диэтаноламина имеет следующий вид:

$$v = 34,13 \cdot \exp(26800/RT) \cdot [[(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2\text{NH}]_2\text{S}]^2 \cdot [\text{O}_2]^1,$$

где:

R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж·моль⁻¹·К⁻¹),
T – температура в Кельвинах.

Представленное уравнение отражает комплексную кинетику многостадийного процесса окисления сульфида диэтаноламина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного сравнительного исследования кинетических закономерностей реакции окисления сульфидов алканолламинов кислородом установлены порядки реакции по сульфидной сере для различных растворов алканолламинов – дробный для моноэтаноламина, второй для диэтаноламина и первый для метилдиэтаноламина.

Определены энергии активации реакции окисления сульфидной серы – 32,8 кДж/моль для моноэтаноламина, 26,8 кДж/моль для диэтаноламина и 38 кДж/моль для метилдиэтаноламина

Установлено, что сульфид диэтаноламина проявляет наибольшую реакционную способность. Для данного соединения определено расчетное уравнение скорости некаталитического окисления, характеризующее кинетические особенности и энергетические параметры процесса.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева Е.Д., Оськин П.В., Ковалева А.А., Осина К.В. Применение анион-радикалов серы в органическом синтезе. Определение форм серы спектральными методами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67 Вып. 3. С. 6-18. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6875.
2. Aminuddin M.S., Bustamab M.A., Johari K. Latest technological advances and insights into capture and removal of hydrogen sulfide: a critical review. *RSC Sustain*. 2024. N 2. P. 757-803. DOI: 10.1039/D3SU00484H.
3. Исмагилов Ф.Р., Ахмадуллин Р.М. Технологии сбора, подготовки и очистки природных и попутных сернистых газов. Старый Оскол: ООО "Тонкие наукоемкие технологии". 2026. 540 с.
4. Madan A., Hussein A., Akhtar A., Sohail S. A review on internal corrosion of pipelines in the oil and gas industry due to hydrogen sulfide and the role of coatings as a solution. *Corros. Rev.* 2025. V. 43. N 2. P. 189-208. DOI: 10.1515/correv-2024-0114.
5. Pudi A., Rezaei M., Signorini V., Andersson M.P., Baschetti M.G., Mansouri S.S. Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Sep. Pur. Technol.* 2022. V. 298. 121448. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121448.
6. Cui X., Lv W., Ye H., Dong H. Development of a selective sequential process for H₂S enrichment and CO₂ capture in aqueous MDEA solutions. *J. Clean. Prod.* 2024. V. 478. 143858. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143858
7. Камышников А.С., Охлобистин А.О., Каратун О.Н., Стороженко В.Н., Зорина-Тихонова Е.Н., Берберова Н.Т. Разработка принципиальной технологической схемы процесса адсорбционной сероочистки бензиновой фракции в присутствии силикагеля, модифицированного пивалатом цинка(II). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 2. С. 92-99. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6705.
8. Georgiadis A.G., Charisiou N.D., Goula M.A. Removal of Hydrogen Sulfide From Various Industrial Gases: A Review of The Most Promising Adsorbing Materials. *Catalysts*. 2020. V. 10. N 5. P. 521. DOI: 10.3390/catal10050521.
9. Alguacil F.J. Recent Advances in H₂S Removal from Gas Streams. *Appl. Sci.* 2023. V. 13. N 5. P. 3217. DOI: 10.3390/app13053217.
10. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа. М.: Химия. 2001. 568 с.
11. Бекиров Т.М. Первичная переработка природных газов. М.: Химия. 1987. 256 с.
12. Мурин В.И. Технология переработки природного газа и конденсата. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2002. 517 с.

REFERENCES

1. Dmitrieva E.D., Oskin P.V., Kovaleva A.A., Osina K.V. Application of sulfur radical anions in organic synthesis. Determination of forms of sulfur. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 3. P. 6-18. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6875.
2. Aminuddin M.S., Bustamab M.A., Johari K. Latest technological advances and insights into capture and removal of hydrogen sulfide: a critical review. *RSC Sustain*. 2024. N 2. P. 757-803. DOI: 10.1039/D3SU00484H.
3. Ismagilov F.R., Akhmadullin R.M. Technologies for collection, treatment, and purification of natural and associated sulfur-containing gases. Stary Oskol: ООО "Tonkie naukoemkie tekhnologii". 2026. 540 p. (in Russian).
4. Madan A., Hussein A., Akhtar A., Sohail S. A review on internal corrosion of pipelines in the oil and gas industry due to hydrogen sulfide and the role of coatings as a solution. *Corros. Rev.* 2025. V. 43. N 2. P. 189-208. DOI: 10.1515/correv-2024-0114.
5. Pudi A., Rezaei M., Signorini V., Andersson M.P., Baschetti M.G., Mansouri S.S. Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Sep. Pur. Technol.* 2022. V. 298. 121448. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121448.
6. Cui X., Lv W., Ye H., Dong H. Development of a selective sequential process for H₂S enrichment and CO₂ capture in aqueous MDEA solutions. *J. Clean. Prod.* 2024. V. 478. 143858. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143858
7. Kamyshnikova A.S., Okhlobystin A.O., Karatun O.N., Storozhenko V.N., Zorina-Tikhonova E.N., Berberova N.T. Development of a conceptual process flow diagram for adsorption desulfurization of a gasoline fraction in the presence of silica gel modified with zinc(II) pivalate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 2. P. 92-99 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6705.
8. Georgiadis A.G., Charisiou N.D., Goula M.A. Removal of Hydrogen Sulfide From Various Industrial Gases: A Review of The Most Promising Adsorbing Materials. *Catalysts*. 2020. V. 10. N 5. P. 521. DOI: 10.3390/catal10050521.
9. Alguacil F.J. Recent Advances in H₂S Removal from Gas Streams. *Appl. Sci.* 2023. V. 13. N 5. P. 3217. DOI: 10.3390/app13053217.
10. Manovyan A.K. Technology of primary processing of crude oil and natural gas. M.: Khimiya. 2001. 568 p. (in Russian).
11. Bekirov T.M. Primary processing of natural gases. M.: Khimiya. 1987. 256 p. (in Russian).
12. Murin V.I. Technology of processing of natural gas and condensate. M.: ООО "Nedra-Biznesstentr". 2002. 517 p. (in Russian).

13. Николаев В.В., Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. Основные процессы физической и физико-химической переработки газа. М.: ОАО Изд-во «Недра». 1998. 184 с.
14. Стрижов И.Н., Ходанович И.Е. Добыча газа. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 376 с.
15. Song X., Zhang Y., Wu C., Sheng X., Zhao H. Exploration of H₂S capture by alkanolamines. *Struct. Chem.* 2019. V. 30. P. 2419-2428. DOI: 10.1007/s11224-019-01373-2.
16. Askari M., Salehi E., Baluchi A. Intensification of hydrogen sulfide absorption by diethanolamine in industrial scale via combined simulation and data-based optimization strategies. *Chem. Eng. Res. Des.* 2022. V. 188. P. 545-554. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.10.004.
17. Alizadeh M., Shahavi M.H., Ganji D.D. Performance enhancement of nano PCM solidification in a hexagonal storage unit with innovative fin shapes dealing with time-dependent boundary conditions. *Energy Rep.* 2022. V. 8. P. 8200-8214. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.06.041.
18. Shirokikh S., Kalmykov D., Matveev D., Bazhenov S. Reclaiming of Amine CO₂ Solvent Using Extraction of Heat Stable Salts in Liquid-Liquid Membrane Contactor. *Membranes*. 2023. V. 13. N 2. P. 230. DOI: 10.3390/membranes13020230.
19. Grushevenko E.A., Safronov P.A., Grudkovskaya V.K., Petrova I.V., Bazhenov S.D. Methods for Improving the Electromembrane Regeneration Efficiency of Industrial Alkanolamine Absorbents. *Pet. Chem.* 2024. V. 64. P. 1327-1337. DOI: 10.1134/S0965544124080206.
20. Meyer F., Bignaud C., Poulain B. Selective Electrochemical Regeneration of Aqueous Amine Solutions to Capture CO₂ and to Convert H₂S into Hydrogen and Solid Sulfur. *Appl. Sci.* 2021. V. 11. N 21. P. 9851. DOI: 10.3390/app11219851.
21. Sergienko N., Lumbaque E.C., Radjenovic J. (Electro)catalytic oxidation of sulfide and recovery of elemental sulfur from sulfide-laden streams. *Water Res.* 2023. V. 245. P. 120651. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120651.
22. ASTM / UOP: UOP 209-00.
13. Nikolaev V.V., Busygina N.V., Busygin I.G. Main processes of physical and physicochemical gas processing. M.: ОАО Izd-vo "Nedra". 1998. 184 p. (in Russian).
14. Strizhov I.N., Khodanovich I.E. Gas production. Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy. 2003. 376 p. (in Russian).
15. Song X., Zhang Y., Wu C., Sheng X., Zhao H. Exploration of H₂S capture by alkanolamines. *Struct. Chem.* 2019. V. 30. P. 2419-2428. DOI: 10.1007/s11224-019-01373-2.
16. Askari M., Salehi E., Baluchi A. Intensification of hydrogen sulfide absorption by diethanolamine in industrial scale via combined simulation and data-based optimization strategies. *Chem. Eng. Res. Des.* 2022. V. 188. P. 545-554. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.10.004.
17. Alizadeh M., Shahavi M.H., Ganji D.D. Performance enhancement of nano PCM solidification in a hexagonal storage unit with innovative fin shapes dealing with time-dependent boundary conditions. *Energy Rep.* 2022. V. 8. P. 8200-8214. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.06.041.
18. Shirokikh S., Kalmykov D., Matveev D., Bazhenov S. Reclaiming of Amine CO₂ Solvent Using Extraction of Heat Stable Salts in Liquid-Liquid Membrane Contactor. *Membranes*. 2023. V. 13. N 2. P. 230. DOI: 10.3390/membranes13020230.
19. Grushevenko E.A., Safronov P.A., Grudkovskaya V.K., Petrova I.V., Bazhenov S.D. Methods for Improving the Electromembrane Regeneration Efficiency of Industrial Alkanolamine Absorbents. *Pet. Chem.* 2024. V. 64. P. 1327-1337. DOI: 10.1134/S0965544124080206.
20. Meyer F., Bignaud C., Poulain B. Selective Electrochemical Regeneration of Aqueous Amine Solutions to Capture CO₂ and to Convert H₂S into Hydrogen and Solid Sulfur. *Appl. Sci.* 2021. V. 11. N 21. P. 9851. DOI: 10.3390/app11219851.
21. Sergienko N., Lumbaque E.C., Radjenovic J. (Electro)catalytic oxidation of sulfide and recovery of elemental sulfur from sulfide-laden streams. *Water Res.* 2023. V. 245. P. 120651. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120651.
22. ASTM / UOP: UOP 209-00.

Поступила в редакцию 13.01.2026

Принята к опубликованию 02.02.2026

Received 13.01.2026

Accepted 02.02.2026