

Очистка газовых выбросов нефтегазоконденсатных месторождений на гетерогенном катализаторе (на примере Среднеботуобинского месторождения)

© 2026. М. С. Иванова, к. х. н., доцент,
К. О. Томский, к. т. н., заведующий кафедрой,
Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58,
e-mail: ims.06@mail.ru

Образующиеся при сгорании углеводородного топлива диоксиды углерода и серы могут улавливаться несколькими способами. Из них наиболее эффективным и экономически целесообразным способом является каталитический. Целью данной работы является изучение процесса каталитической очистки от диоксидов углерода и серы газов горения попутного нефтяного газа Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (СБНГКМ) во фторсодержащих средах, таких как суспензии фторида кальция с различными концентрациями, и определение оптимальных параметров проведения процесса очистки от диоксидов углерода и серы в рассматриваемых суспензиях. Исследование каталитической очистки от диоксидов углерода и серы в среде суспензий фторидов кальция проводили при атмосферном давлении и температуре, равной 25 °С. Диоксиды углерода и серы пропускали через систему, состоящую из суспензии фторида кальция с концентрациями в пределах от 0,05 М до 1,4 М. Для определения влияния скорости подачи очищаемых газов на сорбцию суспензией фторида кальция CO_2 пропускали при скоростях подачи от 0,03 до 0,118 л/мин. Для восстановления каталитической способности отработанной суспензии фторида кальция через систему пропускали кислород воздуха в течение 1 ч. В результате проведенной регенерации каталитическая система полностью восстанавливала свои окислительные способности. В работе показана принципиальная возможность проведения каталитической очистки газов горения в среде фторида кальция от CO_2 и SO_2 . На примере попутного нефтяного газа СБНГКМ определены оптимальные параметры очистки: скорость подачи газов в сорбент, равная 100 мл/мин, и концентрация каталитической системы, равная 0,4 моль/л.

Ключевые слова: диоксид углерода, каталитическая очистка выбросов газов, фторид кальция, выбросы углекислого газа, гетерогенные фторсодержащие системы, активация диоксида углерода.

Purification of gas emissions of Srednebotuobinskoe oil-gas condensate field on a heterogeneous catalyst

© 2026. M. S. Ivanova ORCID: 0000-0003-3272-9253, K. O. Tomskii ORCID: 0000-0001-7612-5393
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58, Belinskogo St., Yakutsk, Russia, 677027,
e-mail: ims.06@mail.ru

Carbon and sulfur dioxide formed during the combustion of hydrocarbon fuels can be captured in several ways. Of these, catalytic capture is the most effective and cost-effective. The aim of this study was to investigate the catalytic removal of carbon dioxide and sulfur from associated petroleum gas combustion gases at the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field in fluorine-containing media, such as calcium fluoride suspensions with varying concentrations, and to determine the optimal parameters for the removal of carbon dioxide and sulfur from these suspensions. The catalytic removal of carbon dioxide and sulfur from calcium fluoride suspensions was studied at atmospheric pressure and a temperature of 25 °C. Carbon and sulfur dioxides were passed through a system consisting of a calcium fluoride suspension with concentrations ranging from 0.05 M to 1.4 M. To determine the effect of the feed rate of the gases being purified on the sorption of the calcium fluoride suspension, CO_2 was passed at feed rates from 0.03 to 0.118 L/min. To restore the catalytic capacity of the spent calcium fluoride suspension, atmospheric oxygen was passed through the system for 1 hour. As a result of the regeneration, the catalytic system completely restored its oxidizing capacity. The study demonstrates the fundamental possibility of catalytic purification of combustion gases in a calcium fluoride environment to remove CO_2 and SO_2 . Using the associated petroleum gas of the Srednebotuobinskoye oil condensate field as an example, the optimal purification parameters were determined: a gas feed rate to the sorbent of 100 mL/min and a catalytic system concentration of 0.4 mol/L.

Keywords: carbon dioxide, catalytic purification of gas emissions, calcium fluoride, carbon dioxide emissions, heterogeneous fluorine-containing systems, carbon dioxide activation.

Одним из самых крупных месторождений, разрабатываемых на сегодняшний день в одном из арктических регионов Российской Федерации, является Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение (СБНГКМ). Рассматриваемое месторождение является одним из самых перспективных источников углеводородного сырья не только на территории Восточной Сибири, но и во всей Российской Федерации. Ещё одной особенностью месторождения является то, что СБНГКМ находится в довольно большой изоляции от инфраструктурных объектов, что усложняет различные возможности переработки попутного нефтяного газа, добываемого с месторождения. Таким образом, вопрос утилизации попутного нефтяного газа, а также продукта его горения является актуальной задачей в условиях СБНГКМ.

На сегодняшний день согласно № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 02 июля 2021 г. компании недропользователи должны сокращать выбросы парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода.

Спрос на энергию быстрой индустриализации приводит к крупномасштабному сжиганию ископаемого топлива, что вызывает чрезмерные выбросы углекислого газа и диоксида серы [1, 2]. Поскольку пагубное воздействие CO_2 и SO_2 на окружающую среду привлекло значительное внимание, были разработаны различные стратегии для уменьшения накопления диоксидов углерода и серы в атмосфере, среди которых улавливание и утилизация считаются многообещающими вариантами сокращения выбросов CO_2 и SO_2 . В настоящее время разработано множество абсорбентов указанных диоксидов для облегчения их улавливания и десорбции. Тем не менее, значительная энергия, необходимая для регенерации сорбента и отделения диоксидов, не способствует реализации стратегии по уменьшению выбросов кислых газов в атмосферу [3–5].

Доля углеводородного топлива, используемого в качестве энергоносителя, постоянно растёт. В ближайшем обозримом будущем говорить о возможности перехода на альтернативные, неуглеводородные источники энергии практически невозможно [6, 7]. Несмотря на то, что доля используемого природного газа, считающегося одним из наиболее экологичных видов топлива, постоянно растёт [8], говорить о полной безопасности данного вида топлива для окружающей среды невозможно [9, 10].

В результате полного сгорания любого углеводородного топлива неизбежным остаётся образование диоксида углерода, одного из самых распространённых парниковых газов на планете [11]. Вместе с тем, с увеличением содержания сернистых соединений во многих месторождениях, наряду с диоксидом углерода, ещё одним ожидаемым кислым газом в продуктах горения является диоксид серы [12, 13].

Основные методы, используемые для очистки газов горения от диоксидов углерода и серы, можно разделить на два типа – сорбционные и каталитические [14, 15]. Наиболее интересным и эффективным способом очистки газов от нежелательных компонентов из представленных способов является применение каталитических методов. Существенным преимуществом каталитических методов очистки дымов от диоксидов углерода и серы можно назвать высокую эффективность технологического оборудования, используемого для этих целей [16, 17]. Основным лимитирующим фактором использования каталитических методов очистки, как правило, считается высокая стоимость используемых реагентов и сложность регенерации катализаторов [18, 19].

Ещё одной проблемой сорбционных методов очистки газов от кислых компонентов является дальнейшая утилизация поглощённых газов. В отличие от физической сорбции диоксидов углерода и серы, одновременное преобразование CO_2 и SO_2 при сорбции в ценные химические вещества представляет собой наиболее привлекательный вариант [20, 21]. В последние десятилетия конверсия диоксидов углерода и серы вызвала серьёзную обеспокоенность и активно изучалась [22, 23]. Однако в большинстве процессов конверсии необходимы чистые газы или газы высокого давления, а это означает, что CO_2 и SO_2 из атмосферы или промышленных выбросов нельзя применять напрямую в качестве источника сырья для дальнейшего использования, и, таким образом, этот вопрос по-прежнему остаётся нерешённым при улавливании и отделении диоксидов углерода и серы. Поэтому реализация одновременного улавливания и преобразования диоксидов углерода и серы на месте выбросов в промышленных масштабах остаётся сложной задачей. Появление эффективных абсорбентов и развитие возможности использования диоксидов углерода и серы являются одной из наиболее интересных задач современности [24].

Выбрасываемый диоксид серы, как кислый газ, может образовывать кислотные дожди и смог, наносящие вред окружающей среде; кроме того, этот газ может негативно влиять на здоровье человека. Типичная концентрация диоксида серы в дымовых газах находится в пределах 0,05–0,3 об. %. Улавливание оксида серы (IV) из дымовых газов является сложной задачей из-за его низкой концентрации. Для улавливания низких концентраций SO_2 существует несколько методов, таких как абсорбция ионными жидкостями и сорбция на основе кальция [25]. Хотя абсорбция SO_2 через ионные жидкости имеет некоторые преимущества, так как используемые жидкости не летучи и не горючи, основными её недостатками являются высокая стоимость и высокая вязкость. Поэтому применение этих жидкостей весьма ограничено. Кроме того, сорбенты на основе кальция являются нерегенеративными, что ограничивает их использование для очистки дымовых газов крупных заводов. Среди различных методов абсорбция газа является подходящим методом для улавливания газообразных загрязнителей, таких как CO_2 и SO_2 из дымовых газов. Некоторые свойства сорбентов, такие как термическая стабильность, сделали их подходящими материалами для разделения и регенерации.

В работе представлен каталитический способ очистки отходящих газов горения углеводородного топлива с кислыми компонентами от диоксидов углерода и серы в среде суспензий фторида кальция. Особенности очистки газов таким способом являются простота регенерации используемого катализатора, проведение процесса очистки при нежёстких условиях, при атмосферном давлении и стандартной температуре, и при этом достигается почти полная очистка отходящих дымовых газов от диоксидов углерода и серы.

Целью работы является определение оптимальных параметров очистки диоксидов углерода и серы в среде фторидов кальция и изучение возможности регенерации катализатора кислородом воздуха.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели в работе решается ряд задач, связанных с подбором оптимальных условий проведения очистки, и проводятся экспериментальные исследования для восстановления способности суспензий фторидов кальция улавливать оксиды углерода (IV) и серы (IV).

Определение компонентного составапутного нефтяного газа проводили по ГОСТ 31371.3-2008. Состав газа определяли на газовом хроматографе SHIMADZU GC-2010 Plus. Исследование каталитической очистки диоксидов серы и углерода в среде суспензий фторидов кальция проводили при стандартных условиях.

Получение SO_2 для проведения исследований производилось реакцией взаимодействия сульфита натрия с соляной кислотой. Полученный диоксид серы пропускали через систему, состоящую из суспензии фторида кальция с различными концентрациями, в пределах от 0,05 М до 1,4 М. При тех же концентрациях фторида кальция исследовали поглощение диоксида углерода, который в систему пропускали из баллона.

Для поддержания равномерности содержания фторида кальция вследствие гетерогенности системы суспензию в постоянном режиме перемешивали с помощью магнитной мешалки.

Для определения окончания превращений системой диоксида серы на выходе из системы непрореагировавший SO_2 улавливали 0,001 М раствором бихромата калия, по изменению окраски последнего определяли пропускание диоксида серы через систему с суспензией фторида кальция.

Диоксид углерода, который после насыщения каталитической системы не сорбировался в суспензию на выходе, поглощали 0,4 М NaOH. Затем количество диоксида углерода, которое не было поглощено системой, высчитывали с использованием pH-титрования 1 М раствором соляной кислоты.

Исследование возможности очистки от диоксидов углерода и серы проводили при различных скоростях подачи очищаемых газов от 0,03 до 0,118 л/мин. Скорость подачи газа изменяли краном тонкой регулировки.

Для восстановления каталитической способности отработанной суспензии фторида кальция через систему пропускали кислород воздуха в течение 1 ч. В результате проведённой регенерации каталитическая система полностью восстанавливала свои окислительные способности.

Все количественные данные оценивали с помощью коэффициента Стьюдента при уровне доверительной вероятности $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых испытаний были получены хроматографические пики, представленные на рисунке 1.

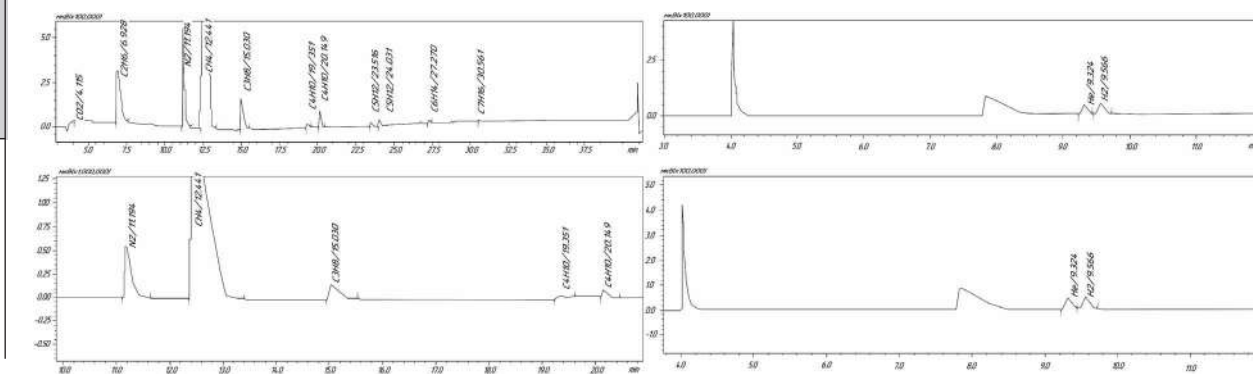


Рис. 1. Хроматограмма состава попутного нефтяного газа Среднеботуобинского НГКМ
Fig. 1. Chromatogram of the associated petroleum gas composition from the Srednebotuobinskoye oil-gas condensate field

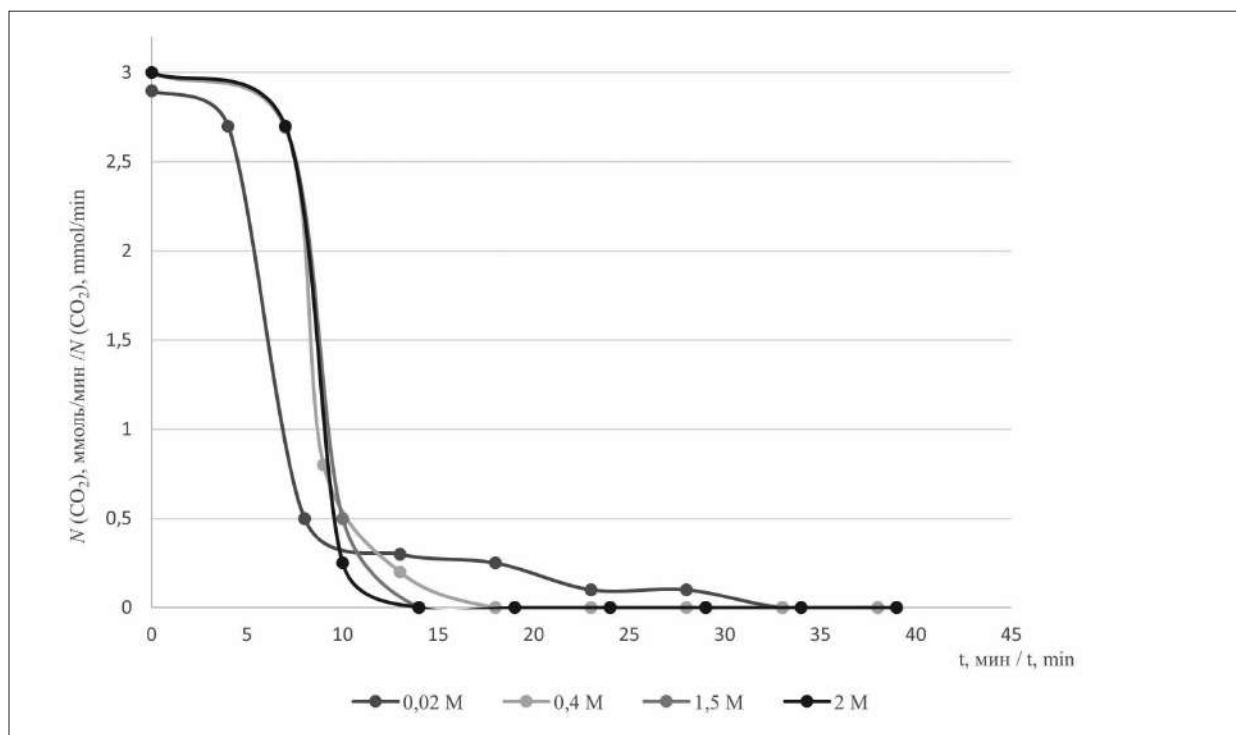


Рис. 2. Зависимость скорости поглощения диоксида углерода от времени пропускания газа при различных концентрациях суспензии фторида кальция
Fig. 2. Dependence of the rate of carbon dioxide absorption on the gas transmission time at different concentrations of calcium fluoride suspension

Обработка полученных данных показала следующий состав попутного нефтяного газа в мольных долях, %: $\text{He} - 0,43$, $\text{H}_2 - 0,0019$, $\text{CO}_2 - 0,0134$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 3,23$, $\text{O}_2 - 0,0258$, $\text{N}_2 - 6,35$, $\text{CH}_4 - 87,63$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 4,64$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0,016$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0,55$, $\text{neo-C}_5\text{H}_{12} - 0,0035$, $i\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0,0166$, $n\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0,07$, $\text{C}_6\text{H}_{14} - 0,0104$, $\text{C}_7\text{H}_{16} - 0,0048$, $n\text{-C}_8\text{H}_{18} - 0,0037$, $\text{R-SH} - 0,0008$.

Результаты показывают, что доля углеводородных компонентов в попутном нефтяном газе составляет более 93 % мол. Дальнейшее сжигание газа такого состава приводит к образованию основного компонента парникового газа – диоксида углерода, а также диоксида серы.

В результате проведенных исследований по поглощению диоксида серы суспензиями фторида кальция различных концентраций были получены кривые, представленные на рисунке 2. Как видно из представленных данных, в первые моменты пропускания происходит полное поглощение очищаемого газа, о чём свидетельствуют начальные прямолинейные участки кривых, значения которых практически не отличаются от скоростей подачи газов в систему.

Для определения влияния концентрации суспензии на количество окисляемого диоксида углерода были посчитаны площади под

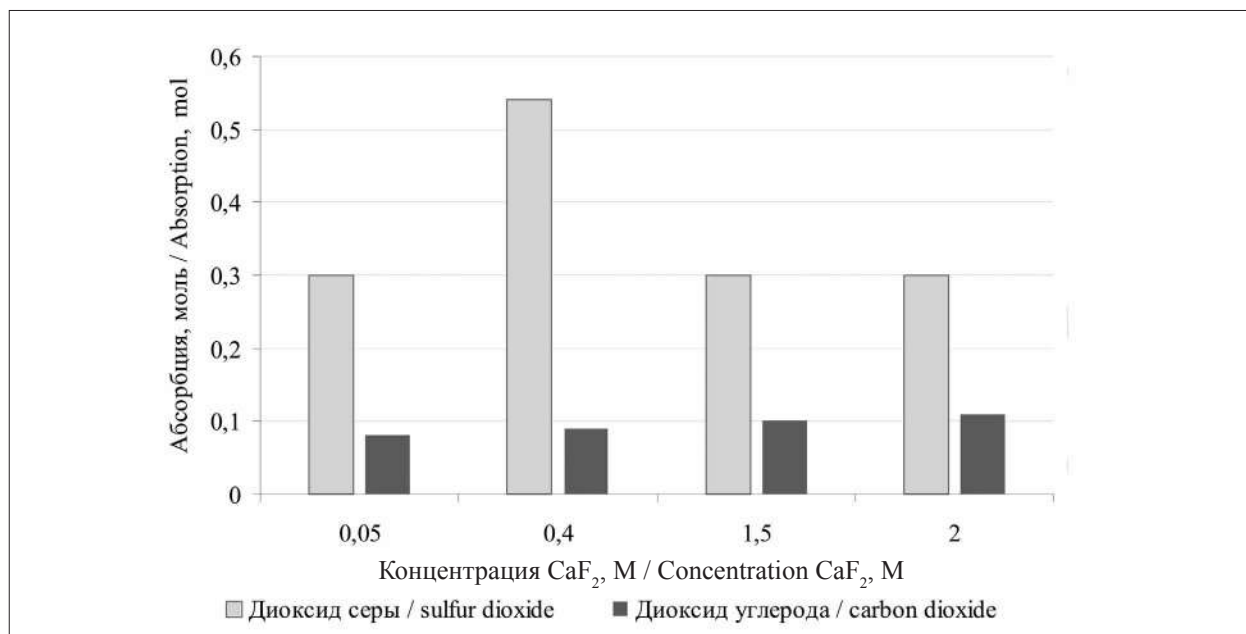


Рис. 3. Зависимость количества поглощённого газа от концентрации фторида кальция (при расчёте на 1 л суспензии)

Fig. 3. Dependence of the absorbed gas amount on the concentration of calcium fluoride (per 1 liter of suspension)

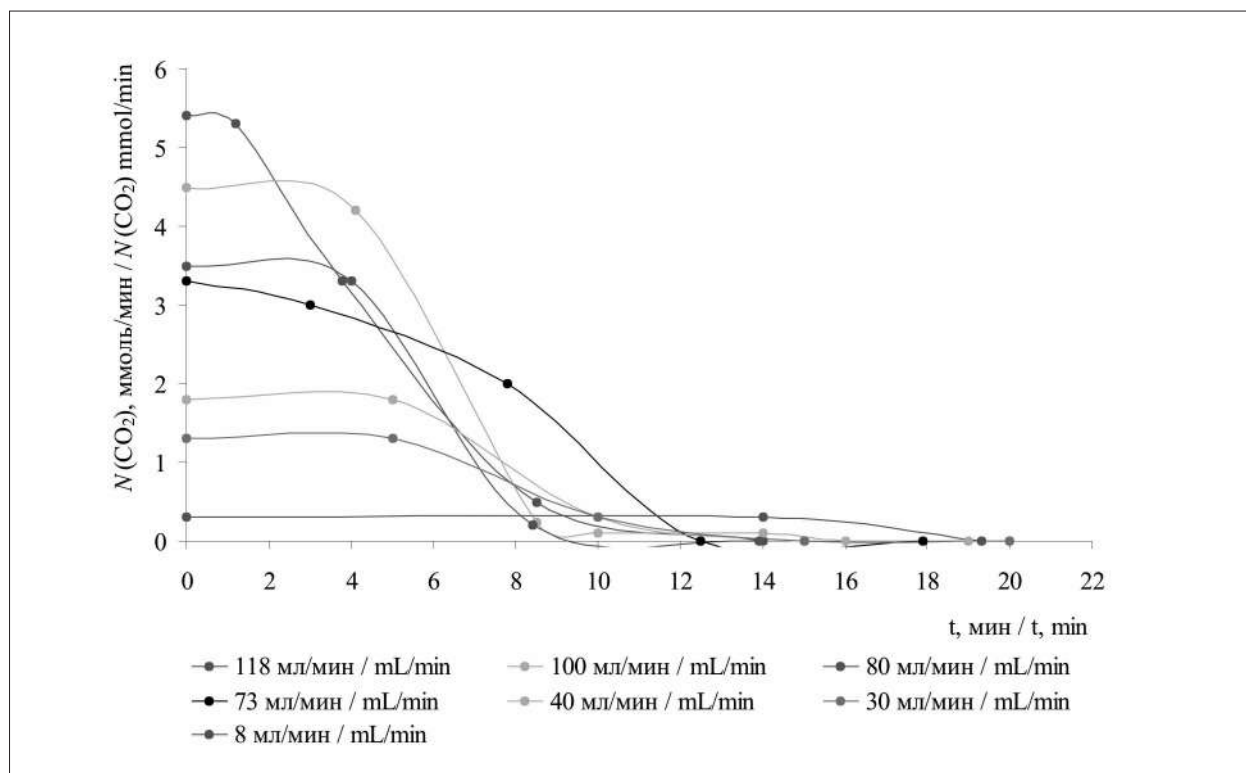


Рис. 4. Зависимость молярной скорости поглощения диоксида углерода от времени при различных скоростях подачи газа

Fig. 4. Dependence of the molar rate of carbon dioxide absorption on time at different gas flow rates

экспериментальными кривыми. Полученные результаты свидетельствуют о том, что, начиная с концентрации фторида кальция, равной 0,4 М, количество улавливаемого диоксида углерода лежит в пределах ошибки определения (рис. 3).

Как видно из представленных данных на рисунке 3, максимальное количество SO_2 сорбируется при концентрации CaF_2 , равной 0,4 М. Таким образом, для дальнейшего определения влияния скорости подачи на сорбцию диоксида углерода была выбрана суспензия с концентрацией 0,4 М CaF_2 .

Скорость подачи диоксидов в сорбционную систему варьировала от 8 до 118 мл/мин. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Увеличение скорости более, чем в 14 раз не ухудшает поглотительные способности рассматриваемой системы. По данным представленных кривых в первые минуты пропускания газов поглощение происходит полное, что подтверждается рассчитанной скоростью поглощения газа каталитической системой, равной скорости подачи газов. Общее количество поглощённого газа, рассчитанное по полученным кривым, представлено на рисунке 5.

При этом количество поглощаемого диоксида углерода при изменении скорости

подачи от 8 до 100 мл/мин постоянно растёт, что объясняется увеличением количества подаваемого газа в систему. Дальнейшее возрастание скорости подачи газа приводит к резкому уменьшению абсорбции подаваемого газа примерно на 40 %, что происходит вследствие уменьшения времени взаимодействия каталитической системы с подаваемым диоксидом углерода.

Технологическая схема каталитической очистки отходящих дымовых газов от диоксидов серы и углерода представлена на рисунке 6. Очищаемый газ подаётся в систему, состоящую из ёмкости с 0,4 М фторидом кальция. При прохождении очищаемого газа через суспензию фторида кальция происходит избирательное поглощение диоксидов углерода и серы. При насыщении каталитической системы очищаемыми газами поток газа направляется на вторую систему с раствором фторида кальция. Регенерация отработанной суспензии проводится пропуском воздуха в систему.

Заключение

В работе обоснован и экспериментально подтверждён принципиально новый подход

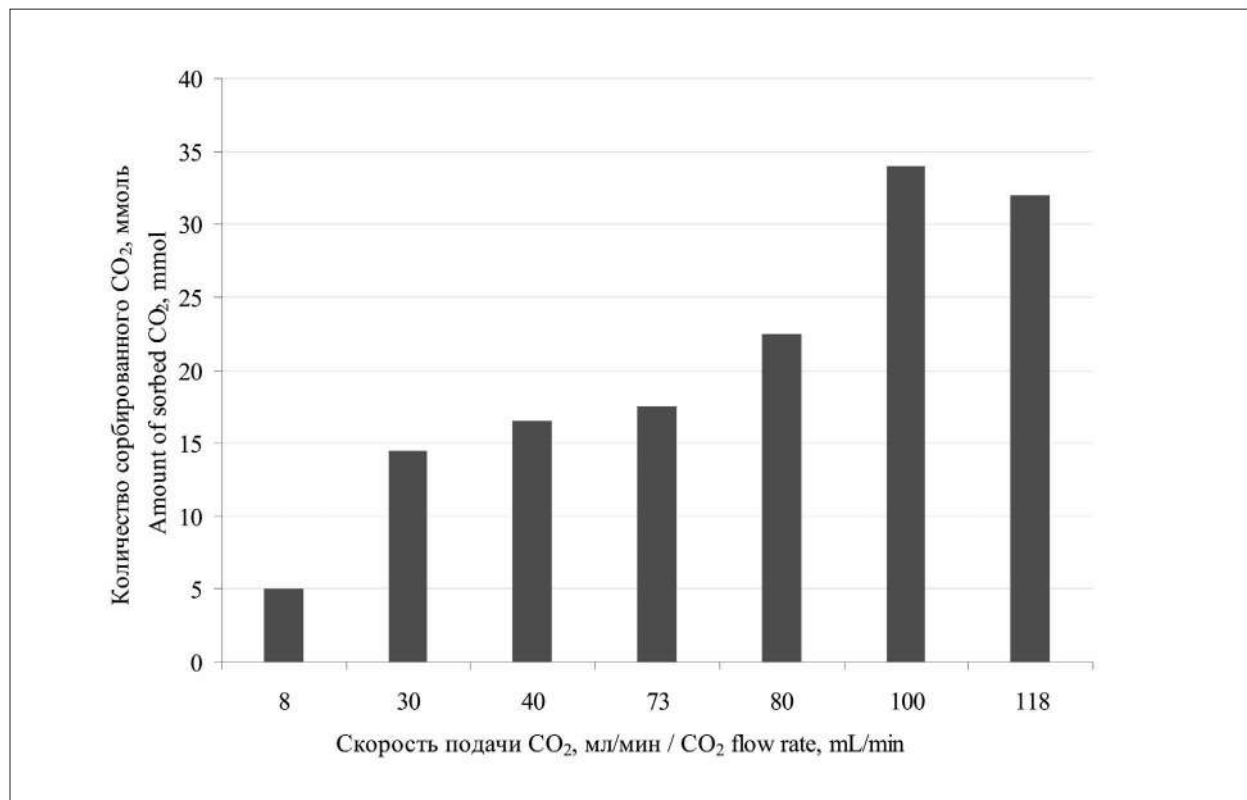


Рис. 5. Зависимость общего количества поглощённого газа от скорости подачи диоксида углерода
Fig. 5. Dependence of the total amount of absorbed gas on the rate of carbon dioxide supply

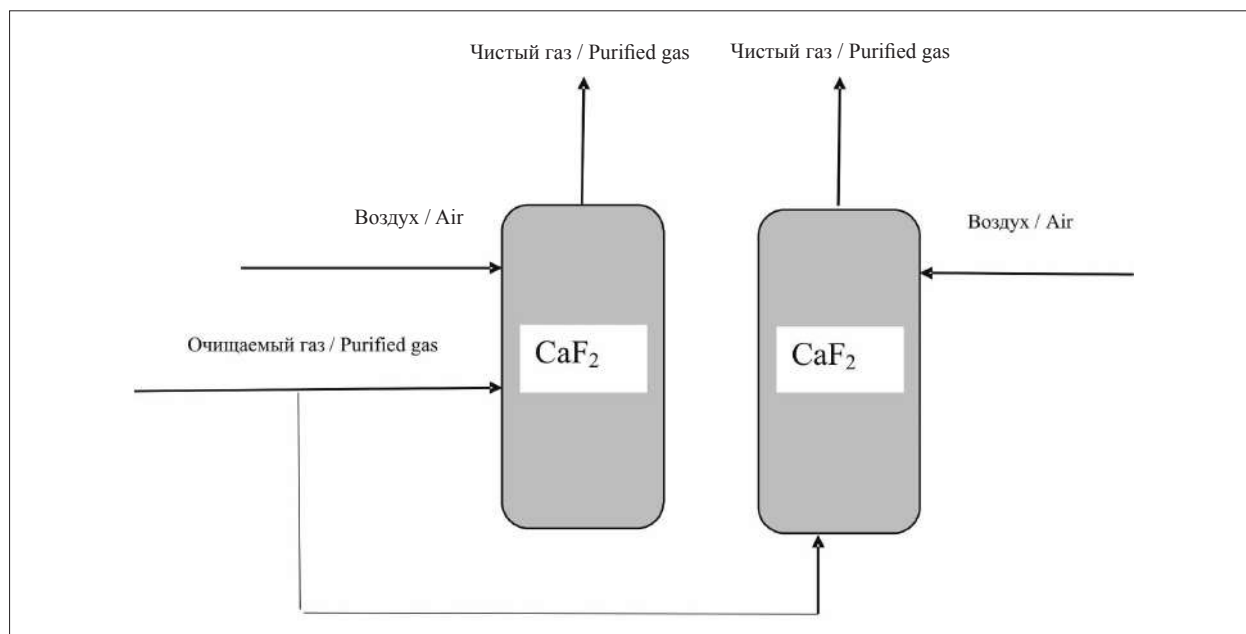


Рис. 6. Технологическая схема каталитической очистки отходящих дымовых газов от диоксидов серы и углерода
Fig. 6. Technological scheme of exhaust fumes catalytic purification from sulfur and carbon dioxide

к очистке газовых выбросов нефтегазоконденсатных месторождений от кислых компонентов с использованием гетерогенной фторсодержащей системы – суспензии фторида кальция.

В отличие от традиционных сорбционных методов (например, на основе ионных жидкостей или нерегенерируемых кальциевых сорбентов) и гомогенных фторсодержащих сред, предложенная система обладает рядом уникальных черт:

- впервые показана возможность использования суспензии CaF_2 в качестве каталитической среды для одновременного улавливания и активации CO_2 и SO_2 при стандартных условиях (атмосферное давление, 25°C);

- установлена способность системы к полной регенерации окислительных свойств при пропуске кислорода воздуха, что решает проблему утилизации отработанных катализаторов и снижает эксплуатационные затраты.

Теоретическая значимость работы выходит за рамки прикладной задачи очистки газов и вносит вклад в фундаментальные представления о гетерогенном катализе во фторсодержащих средах.

Работа развивает теорию, согласно которой фторсодержащие среды способны переводить растворённый кислород в активную форму, что ведёт к образованию промежуточных пероксосоединений. Эти соединения, в свою очередь, инициируют активацию стабильной молекулы CO_2 , превращая её в реакционно-способную форму.

Теоретически обосновано преимущество перехода от гомогенных фторсодержащих систем к гетерогенным суспензиям. Показано, что такой переход позволяет преодолеть фундаментальные трудности разделения продуктов реакции и снизить агрессивность среды, сохранив при этом высокую каталитическую активность.

Выявлены зависимости сорбционной способности от концентрации суспензии и скорости потока газа. Показано существование порогового значения концентрации ($0,4\text{ M}$), выше которого увеличение количества активного компонента не приводит к росту поглощения, что указывает на лимитирование процесса на стадии химического взаимодействия, а не диффузии.

Практическая ценность работы обусловлена ориентацией на реальные условия эксплуатации СБНГКМ и других удалённых арктических месторождений. Метод не требует жёстких условий (высокое давление, экстремальные температуры) и сложной инфраструктуры, что критически важно для месторождений, удалённых от промышленных центров. Кроме того, CaF_2 – доступный и распространённый на территории РФ реагент. Использование фторида кальция в сочетании с лёгкой регенерацией кислородом воздуха существенно снижает стоимость очистки по сравнению с применением дорогостоящих и вязких ионных жидкостей или нерегенерируемых сорбентов.

В дальнейшем перспективным направлением является исследование возможности направленного синтеза ценных продуктов (например, щавелевой кислоты) из активированного CO₂ непосредственно в суспензии, что позволит перейти от простой очистки к производству товарной продукции из отходов сгорания.

Литература

1. Gambhir A., Tavoni M. Direct air carbon capture and sequestration: how it works and how it could contribute to climate-change mitigation // *One Earth*. 2019. V. 1. No. 4. P. 405–409. doi: 10.1016/j.oneear.2019.11.006
2. Wu H., Chen W., Wu J., Zheng Z., Duan L. Synergistic removal of SO_x and NO_x in CO₂ compression and purification in oxy-fuel combustion power plant // *Energy Fuels*. 2019. V. 33. No. 12. P. 12621–12627. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b03284
3. Антонов К.Л., Поддубный В.А., Маркелов Ю.И., Бувевич А.Г., Медведев А.Н., Манжуров И.Л. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России // *Арктика: экология и экономика*. 2018. № 1. С. 56–67. doi: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67
4. Эшмухамедов М.А., Понамарёва Т.В., Раевская Е.Г. Очистка газовых выбросов от диоксида серы с помощью активированного гранулированного сорбента // *Химическая безопасность*. 2020. Т. 4. № 1. С. 170–182. doi: 10.25514/CHS.2020.1.17012
5. Khairulin S.R., Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A., Salnikov A.V., Loginov L.I., Philippov A.G., Vildanov A.F., Mazgarov A.M. Carbon materials for cleaning gases from hydrogen sulfide and prospects for their use in base technologies for associated petroleum gas treatment // *Chemistry for sustainable development*. 2018. V. 26. No. 6. P. 679–689. doi: 10.15372/CSD820180615
6. Bellamy R., Geden O., Fridahl M., Cox E., Palmer J. Editorial: Governing carbon dioxide removal // *Front. Clim.* 2021. V. 3. Article No. 816346. doi: 10.3389/fclim.2021.816346
7. Moustakas N.G., Lorenz F., Dilla M., Peppel T., Strunk J. Pivotal role of holes in photocatalytic CO₂ reduction on TiO₂ // *Chemistry*. 2021. V. 27. No. 68. P. 17213–172196. doi: 10.1002/chem.202103070
8. Yu H.B., Huang J.H., Jiang L.B., Leng L.J., Yi K.X., Zhang W., Zhang C.Y., Yuan X.Z. *In situ* construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO₂ reduction // *Appl. Catal. B: Environ.* 2021. V. 298. Article No. 120618. doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120618
9. Шепелев И.И., Пиляева О.В., Еськова Е.Н., Кирюшин Е.В. Решение проблем очистки газовых выбросов в глинозёмном производстве // *Проблемы региональной экологии*. 2020. № 1. С. 111–115. doi: 10.24411/1728-323X-2020-11111

10. Блиновская Я.Ю., Мазлова Е.А. Выбросы парниковых газов при добыче и переработке угля: состояние проблемы и технологии сокращения // *Учёные записки РГГМУ*. 2019. № 54. С. 145–154. doi: 10.33933/2074-2762-2019-54-145-154
11. Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т., Поташева О.В. Оценка влияния развития экономики на состояние окружающей среды и выбросы парниковых газов // *Дружковский вестник*. 2018. № 2. С. 203–215.
12. Leonov V.Ye., Serdyuk A.D. The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018. V. 10. No. 5. P. 1015–1024. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024
13. Носырев М.А., Комляшев Р.Б., Ильина С.И., Кабанов О.В. Очистка газовых выбросов от диоксида серы на промышленных предприятиях // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 8. С. 24–27. doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-24-27
14. Газалеева Г.И., Дмитриева Е.Г., Демин А.И. Применение карбамидного метода для очистки отходящих агломерационных газов от диоксида серы // *Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 9. С. 1086–1092. doi: 10.32339/0135-5910-2019-9-1086-1091
15. Черемисина О.В., Пономарева М.А., Болотов В.А. Утилизация технологических газов перспективными сорбционными материалами // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2020. Т. 20. № 2. С. 93–100. doi: 10.14529/met200209
16. Masoud S.M., Vorobyeva D.V., Petropavlovskikh D.A., Bruneaub Ch., Osipov S.N. Fluorine-containing ruthenium-based olefin metathesis catalysts // *Russ. Chem. Rev.* 2021. V. 90. No. 4. P. 419–450. doi: 10.1070/RCR4984
17. Shokova E.A., Tafeenko V.A., Kovalev V.V. Trifluoroacetic anhydride as an activator in the acylation of aryl methyl ketones with carboxylic acids // *Russ. J. Org. Chem.* 2020. V. 56. No. 10. P. 1770–1774. doi: 10.1134/S1070428020100164
18. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., Khorasheh F., Ghotbi C. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO₂ // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 380. Article No. 134968. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134968
19. Kong Z., Xue Y., Hao T., Wu J., Zhang Y., Rong C., Chen H., Song L., Li D., Pan Y., Li Y. Carbon-neutral treatment of *N,N*-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO₂ reduction and bio-energy cleaner production // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 380. Article No. 134880. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134880
20. Abhishek K., Shrivastava A., Vimal V., Gupta A.K., Bhujbal S.K., Biswas J.K., Singh L.S., Ghosh P., Pandey A., Sharma P., Kumar M. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review // *Sci. Total*

Environ. 2022. V. 853. Article No. 158562. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158562

21. Ozcan M.C., Karaman B.P., Oktar N., Dogu T. Dimethyl ether from syngas and effect of CO₂ sorption on product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15 // *Fuel*. 2022. V. 330. Article No. 125607. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125607

22. Ruan H., Wu S., Chen X., Zou J., Liao J., Cui H., Dong Y., Qiu Y., Shen J. Capturing CO₂ with NaOH solution from reject brine *via* an integrated technology based on bipolar membrane electrodialysis and hollow fiber membrane contactor // *Chem. Eng. J.* 2022. V. 450. Article No. 138095. doi: 10.1016/j.cej.2022.138095

23. Sooriyan S.K., Ibrahim N., Hanif M.A., Hasan M., Abdullah S., Adriansyah A.A., Setianto B., Syafiuddin A. Performance optimization of sulfur dioxide (SO₂) desulfurization by oil palm-based activated carbon using box-behnken design // *Biointerf. Res. Appl. Chem.* 2022. V. 12. No. 6. P. 7972–7982. doi: 10.33263/BRIAC126.79727982

24. Hu X., Bobbink F.D., van Muyden A., Talebi Amiri M., Bonnin A., Maréchal F., Nazeeruddin M.K., Qi Z., Dyson P.J. Cycloaddition of biogas-contained CO₂ into epoxides via ionic polymer catalysis: an experimental and process simulation study // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021. V. 60. No. 49. P. 17942–17948. doi: 10.1021/acs.iecr.1c03895

25. Alkhatib I.I.I., Khalifa O., Bahamon D., Abu-Zahra M.R.M., Vega L.F. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO₂ and H₂S removal // *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 277. Article No. 119516. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119516

26. Vishnetskaya M.V., Mel'nikov M.Ya. Transformation of organic and inorganic compounds in trifluoroacetic acid // *Russ. J. Phys. Chem.* 2016. V. 90. No. 9. P. 1909–1911. doi: 10.1134/S0036024416090314

References

1. Gambhir A., Tavoni M. Direct air carbon capture and sequestration: how it works and how it could contribute to climate-change mitigation // *One Earth*. 2019. V. 1. No. 4. P. 405–409. doi: 10.1016/j.oneear.2019.11.006

2. Wu H., Chen W., Wu J., Zheng Z., Duan L. Synergistic removal of SO_x and NO_x in CO₂ compression and purification in oxy-fuel combustion power plant // *Energy Fuels*. 2019. V. 33. No. 12. P. 12621–12627. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b03284

3. Antonov K.L., Poddubny V.A., Markelov Yu.I., Buevich A.G., Medvedev A.N., Manzhurov I.L. Some results of greenhouse gases monitoring in the Arctic region of Russia // *Arctic: ecology and economy*. 2018. No. 1. P. 56–67 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67

4. Eshmukhamedov M.A., Ponamaryova T.V., Raevskaya E.G. Purification of gas emissions from sulfur dioxide by means of activated granulated sorbent // *Chemical safety science*. 2020. V. 4. No. 1. P. 170–182 (in Russian). doi: 10.25514/CHS.2020.1.17012

5. Khairulin S.R., Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A., Salnikov A.V., Loginov L.I., Philippov A.G., Vildanov A.F., Mazgarov A.M. Carbon materials for cleaning gases from hydrogen sulfide and prospects for their use in base technologies for associated petroleum gas treatment // *Chemistry for sustainable development*. 2018. V. 26. No. 6. P. 679–689. doi: 10.15372/CSD820180615

6. Bellamy R., Geden O., Fridahl M., Cox E., Palmer J. Editorial: Governing carbon dioxide removal // *Front. Clim.* 2021. V. 3. Article No. 816346. doi: 10.3389/fclim.2021.816346

7. Moustakas N.G., Lorenz F., Dilla M., Peppel T., Strunk J. Pivotal role of holes in photocatalytic CO₂ reduction on TiO₂ // *Chemistry*. 2021. V. 27. No. 68. P. 17213–172196. doi: 10.1002/chem.202103070

8. Yu H.B., Huang J.H., Jiang L.B., Leng L.J., Yi K.X., Zhang W., Zhang C.Y., Yuan X.Z. *In situ* construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO₂ reduction // *Appl. Catal. B: Environ.* 2021. V. 298. Article No. 120618. doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120618

9. Shepelev I.I., Pilyaeva O.V., Eskova E.N., Kiryushin E.V. Solving the problems of cleaning gas emissions in alumina production // *Problems of regional ecology*. 2020. No. 1. P. 111–115 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2020-11111

10. Blinovskaya Ya.Yu., Mazlova E.A. Greenhouse gas emissions at coal production and processing: problem status and decrease technologies // *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019. No. 54. P. 145–154 (in Russian). doi: 10.33933/2074-2762-2019-54-145-154

11. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. Evaluation of the impact of the development of economics on the state of the environment and greenhouse gas emissions // *Druckerovskij vestnik*. 2018. No. 2. P. 203–215 (in Russian).

12. Leonov V.Ye., Serdyuk A.D. The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018. V. 10. No. 5. P. 1015–1024. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024

13. Nosyrev M.A., Komlyashev R.B., Ilyina S.I., Kabanov O.V. Purification of gas emissions from sulfur dioxide at industrial plants // *Ecology and Industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 8. P. 24–27 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-24-27

14. Gazaleeva G.I., Dmitrieva E.G., Demin A.I. Application of carbamid method for sintering off-gases cleaning of sulfur dioxide // *Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2019. V. 75. No. 9. P. 1086–1092 (in Russian). doi: 10.32339/0135-5910-2019-9-1086-1091

15. Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Bolotov V.A. Utilization of technological gases by perspective sorption

materials // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2020. V. 20. No. 2. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.14529/met200209

16. Masoud S.M., Vorobyeva D.V., Petropavlovskikh D.A., Bruneau Ch., Osipov S.N. Fluorine-containing ruthenium-based olefin metathesis catalysts // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. No. 4. P. 419–450. doi: 10.1070/RCR4984

17. Shokova E.A., Tafeenko V.A., Kovalev V.V. Tri-fluoroacetic anhydride as an activator in the acylation of aryl methyl ketones with carboxylic acids // Russ. J. Org. Chem. 2020. V. 56. No. 10. P. 1770–1774. doi: 10.1134/S1070428020100164

18. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., Khorasheh F., Ghotbi C. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO₂ // J. Clean. Prod. 2022. V. 380. Article No. 134968. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134968

19. Kong Z., Xue Y., Hao T., Wu J., Zhang Y., Rong C., Chen H., Song L., Li D., Pan Y., Li Y. Carbon-neutral treatment of *N,N*-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO₂ reduction and bio-energy cleaner production // J. Clean. Prod. 2022. V. 380. Article No. 134880. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134880

20. Abhishek K., Shrivastava A., Vimal V., Gupta A.K., Bhujbal S.K., Biswas J.K., Singh L.S., Ghosh P., Pandey A., Sharma P., Kumar M. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review // Sci. Total Environ. 2022. V. 853. Article No. 158562. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158562

21. Ozcan M.C., Karaman B.P., Oktar N., Dogu T. Dimethyl ether from syngas and effect of CO₂ sorption on

product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15 // Fuel. 2022. V. 330. Article No. 125607. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125607

22. Ruan H., Wu S., Chen X., Zou J., Liao J., Cui H., Dong Y., Qiu Y., Shen J. Capturing CO₂ with NaOH solution from reject brine *via* an integrated technology based on bipolar membrane electrodialysis and hollow fiber membrane contactor // Chem. Eng. J. 2022. V. 450. Article No. 138095. doi: 10.1016/j.cej.2022.138095

23. Sooriyan S.K., Ibrahim N., Hanif M.A., Hasan M., Abdullah S., Adriansyah A.A., Setianto B., Syafiuddin A. Performance optimization of sulfur dioxide (SO₂) desulfurization by oil palm-based activated carbon using box-behnen design // Biointerf. Res. Appl. Chem. 2022. V. 12. No. 6. P. 7972–798215. doi: 10.33263/BRIAC126.79727982

24. Hu X., Bobbink F.D., van Muyden A., Talebi Amiri M., Bonnin A., Maréchal F., Nazeeruddin M.K., Qi Z., Dyson P.J. Cycloaddition of biogas-contained CO₂ into epoxides via ionic polymer catalysis: an experimental and process simulation study // Ind. Eng. Chem. Res. 2021. V. 60. No. 49. P. 17942–17948. doi: 10.1021/acs.iecr.1c03895

25. Alkhatib I.I.I., Khalifa O., Bahamon D., Abu-Zahra M.R.M., Vega L.F. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO₂ and H₂S removal // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 277. Article No. 119516. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119516

26. Vishnetskaya M.V., Mel'nikov M.Ya. Transformation of organic and inorganic compounds in trifluoroacetic acid // Russ. J. Phys. Chem. 2016. V. 90. No. 9. P. 1909–1911. doi: 10.1134/S0036024416090314