

УДК 544.47, 54.058

## ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ CO<sub>2</sub> В СРЕДЕ ТРИФТОРУКСУСНОЙ КИСЛОТЫ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА

Иванова Мария Сергеевна<sup>1</sup>,  
ims.06@mail.ru

Вишнецкая Марина Викторовна<sup>2</sup>,  
mvvishnetskaya@mail.ru

Томский Кирилл Олегович<sup>1</sup>,  
kirilltom@mail.ru

<sup>1</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Россия, 678174, г. Мирный, ул. Ойунского, 14.

<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65.

**Актуальность** проблемы выбросов в атмосферу диоксида углерода в настоящее время не подвергается сомнению. Крупными источниками выбросов в атмосферу диоксида углерода являются объекты горной и нефтегазовой промышленности. Одной из особенностей диоксида углерода является его химически устойчивая молекула, которая может сохраняться в неизменном виде в атмосфере длительное время. Наиболее рациональным решением утилизации диоксида углерода из продуктов горения углеводородов является его поглощение с получением новых продуктов, которые могут найти применение в химической промышленности. Основными недостатками существующих на сегодняшний день способов удаления диоксида углерода являются невысокая конверсия очищаемых газов, высокая стоимость проведения процесса, а также реализуемость процесса при больших количествах очищаемых газов в отходящих.

**Цель:** определение оптимальных параметров каталитического улавливания CO<sub>2</sub> из отходящих газов горной и нефтегазовой промышленности в растворах трифторуксусной кислоты.

**Объекты:** диоксид углерода, растворы трифторуксусной кислоты различной концентрации, концентрированная трифторуксусная кислота.

**Методы.** Очистка продуктов горения углеводородов от CO<sub>2</sub> проводилась путем пропускания его через раствор трифторуксусной кислоты, отработанная кислота регенерировалась кислородом воздуха. Исследовались абсорбционные способности растворов трифторуксусной кислоты в зависимости от концентраций растворов и значения pH. Абсорбцию CO<sub>2</sub> в растворах трифторуксусной кислоты определяли при стандартных условиях. Непоглотившийся CO<sub>2</sub> абсорбировали раствором щелочи, кислотность которого постоянно фиксировали потенциометром. Количество абсорбированного диоксида углерода определяли потенциометрическим титрованием содержащего лавушки.

**Результаты.** Показано, что каталитическая очистка дымовых газов от CO<sub>2</sub> при использовании растворов трифторуксусной кислоты протекает при стандартных условиях с полным улавливанием диоксида углерода.

### Ключевые слова:

Экология, промышленные газы, каталитическая очистка от CO<sub>2</sub>, трифторуксусная кислота, катализатор.

### Введение

Несомненно, на сегодняшний день выбросы диоксида углерода в окружающую среду считаются одной из самых важных проблем нефтегазовой отрасли. Одной из главных причин возникновения парникового эффекта, приводящего к потеплению климата повсеместно, считается образование продуктов горения углеводородных топлив, в основном диоксида углерода [1–3]. Для удаления диоксида углерода из продуктов горения углеводородов сегодня известны много различных технологий, работающих на химических, физико-химических и химических принципах [4–8]. Существующие на сегодняшний день методы улавливания диоксида углерода обладают рядом недостатков, основными из которых являются: образование большого количества неиспользуемых отходов, использование значительного количества технологических элементов при очистке. Существенным недостатком сорбционных методов очистки (абсорбционных и адсорбционных) выбросных газов является

необходимость многократной регенерации поглощающих растворов или частичной замены твердого сорбента, что значительно усложняет технологическую схему, увеличивает капитальные вложения и затраты на эксплуатацию. Наиболее интересными методами очистки отходящих дымовых газов являются каталитические методы. Преимуществами данной группы методов являются: высокая степень очистки, компактность, небольшая металлоемкость, высокая производительность, легкость автоматического управления. Недостатками каталитических методов очистки являются большие эксплуатационные расходы.

Каталитические технологии, используемые для улавливания нежелательных компонентов из отходящих дымовых газов, сегодня в мире занимают лидирующие позиции. Из них наиболее привлекательными являются технологии окисления, использующие в качестве окислителя экологически чистые реагенты, такие как молекулярный кислород. Сложность использования молекулярного кислорода в качестве

окислителя в подобных реакциях заключается в его активации, так как при стандартных условиях его реакционная способность крайне низка. Химическая реакция кислорода в синглетном состоянии почти со всеми соединениями происходит с незначительной скоростью. Поэтому окислительные каталитические реакции с кислородом протекают в многофазных системах при довольно жестких условиях по температуре с образованием катион-радикалов (O·, HO·) [9].

В качестве растворителя при протекании окислительных реакций распространено использование трифторуксусной кислоты (ТФК) [10–22], связанное с тем, что она способна растворять молекулярный кислород. В [22] было показано, что молекулярный кислород способен образовывать прочные комплексы с фторсодержащими соединениями (ФС).

В данной работе предлагается каталитический способ очистки отходящих дымовых газов, образующихся в результате горения углеводородных газов, от парникового газа – CO<sub>2</sub> – с применением растворов ТФК. Природный газ большинства месторождений России не содержит сернистых соединений. Основными веществами, выбрасываемыми в воздушный бассейн при сжигании газообразного углеводородного топлива, являются продукты полного сгорания – двуокись углерода и водяной пар. Преимуществом предлагаемого подхода является проведение процесса при стандартных давлении и температуре, а также использование достаточно неагрессивной среды растворов ТФК, не требующее больших эксплуатационных расходов.

#### Экспериментальные исследования

Очистку отходящих газов от диоксида углерода исследовали при стандартных параметрах температуры и давления (20 °С, 101,3 кПа) (рис. 1). Исследуемый газ с постоянной скоростью пропускали через емкость с раствором ТФК. Количество не вступившего в реакцию диоксида углерода определяли путем потенциометрического титрования раствора щелочи, в котором он улавливался. При этом показатель кислотности приемника газа постоянно контролировался.

В качестве титранта при проведении анализа использовался 1 М раствор соляной кислоты. При этом количество абсорбированного улавливаемого газа определяли по разнице между пропущенным количеством и результатом потенциометрического титрования.

#### Обсуждение результатов

Роль трифторуксусной кислоты заключается в образовании промежуточного карбоксильного радикала, продукт преобразования последнего представляет собой щавелевую кислоту [12].

ТФК в данных взаимодействиях является катализатором при наличии растворенного кислорода в нем. Расход кислорода при этом восполняется насыщением системы кислородом воздуха. Роль трифторуксусной кислоты в данном случае заключается не только в растворении кислорода, но и в приведении его из слабореакционной формы в активную форму. В данной работе было исследована роль концентрации трифторуксусной кислоты и pH среды на поглощение CO<sub>2</sub>.

При увеличении концентрации кислоты от 0,1 до 10,5 М количество поглотившегося диоксида углерода меняется незначительно (рис. 2). Заметное изменение абсорбированного диоксида углерода наблюдается при переходе к безводной кислоте.

Влияние кислотности среды на абсорбцию парникового газа показано на рис. 3. Как показывают полученные данные, наибольшая абсорбция наблюдается при значении кислотности равной 4,2. При уменьшении значения pH количество поглотившегося газа уменьшается, что наблюдается и при увеличении значения кислотности среды.

Данный способ очистки от CO<sub>2</sub> заключается в пропускании очищаемых газов через емкость, содержащую 5,0...10,5 М водного раствора трифторуксусной кислоты. После насыщения в отработанный раствор подается воздух для регенерации каталитических свойств, и отделяются образовавшиеся побочные продукты путем отстаивания, затем производится утилизация последних. В момент регенерации одного коллектора поток газа направляется на второй коллектор (рис. 4).

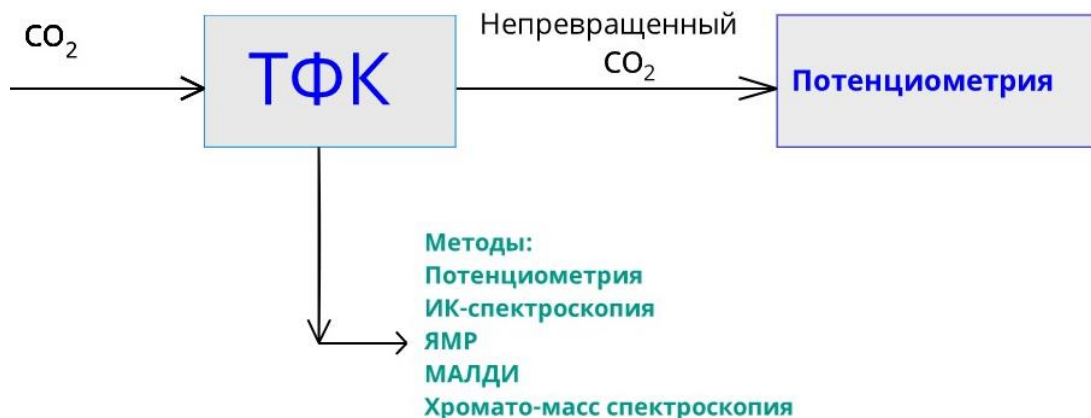


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental setup

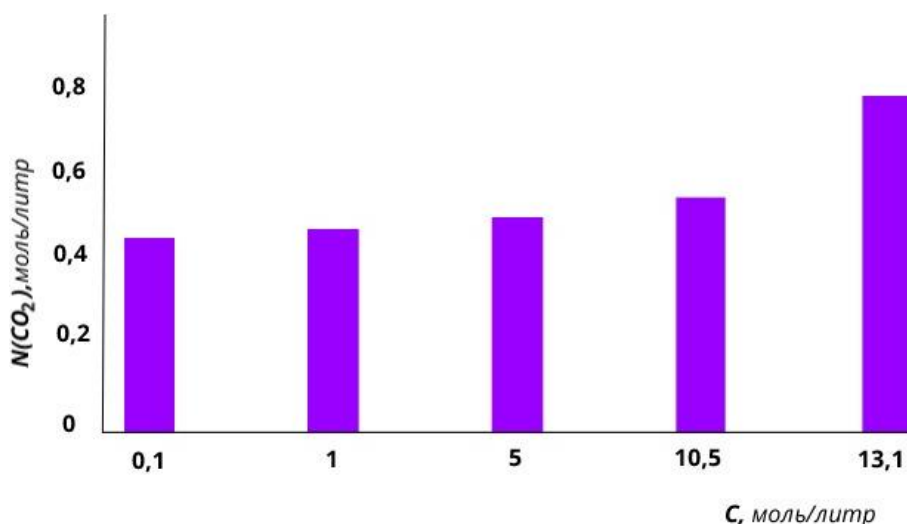


Рис. 2. Зависимость количества абсорбированного CO<sub>2</sub> от концентрации раствора трифторуксусной кислоты  
 Fig. 2. Dependence of the amount of CO<sub>2</sub> absorbed on trifluoroacetic acid solution concentration

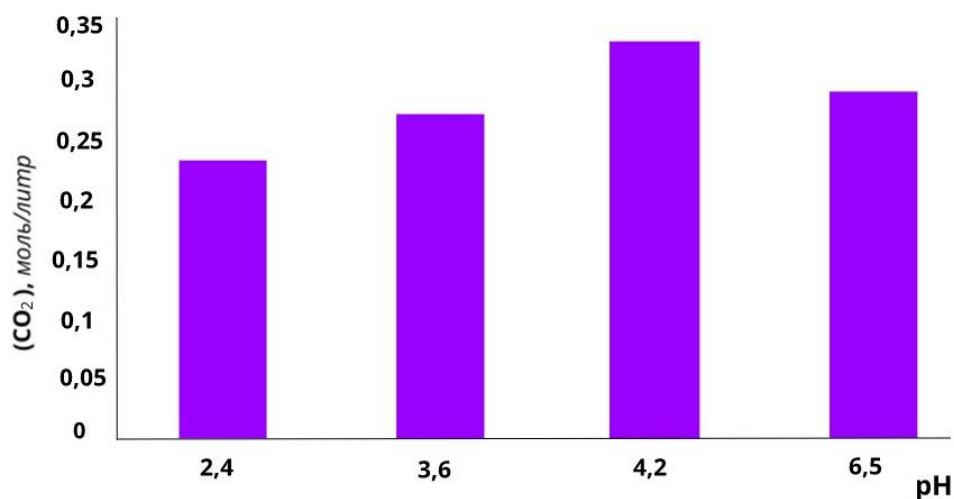


Рис. 3. Абсорбция диоксида углерода в зависимости от кислотности среды  
 Fig. 3. Carbon dioxide absorption depending on medium acidity

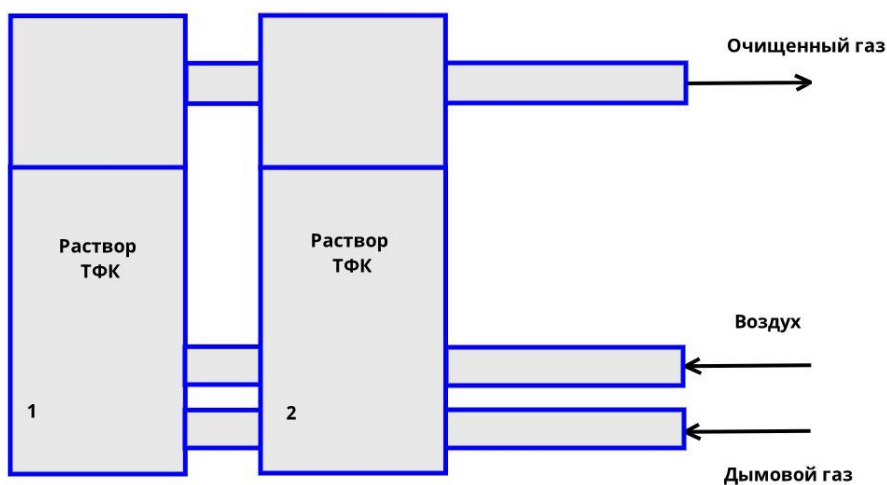


Рис. 4. Схема процесса снижения выбросов CO<sub>2</sub> применительно к открытым, подземным и скважинным методам добычи полезных ископаемых

Fig. 4. Scheme of reducing CO<sub>2</sub> emissions in relation to open, underground and borehole methods of mining

Исследование показало, что растворы трифторуксусной кислоты в присутствии растворенного кислорода способны проводить превращения диоксида углерода с образованием С-С-связи (щавелевой кислоты). Данный факт свидетельствует о возможности проведения очистки продуктов горения углеводородов от CO<sub>2</sub> при стандартных условиях. Также в работе определены оптимальные параметры кислотности среды и концентрации раствора кислоты.

По результатам, полученным в работе, предлагается использование растворов ТФК для очистки основного компонента парниковых газов, образующегося в результате сжигания топлива в промышленных предприятиях. Представленный способ позволяет проводить очистку газов от диоксида углерода при стандартных условиях. При этом предложенный способ отличается простотой регенерации, нетоксичностью используемого катализатора.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования по утилизации диоксида углерода – продукта сгорания углеводородных топлив в горной промышленности. Результаты исследования показали, что очистка от

диоксида углерода может проводиться без больших затрат энергии при стандартных условиях, при этом процесс может быть реализован вне зависимости от концентрации диоксида углерода в выбросах. Подобная очистка дымовых выбросов отличается простотой регенерации катализатора (насыщение системы кислородом воздуха) и получением ценных продуктов (щавелевой кислоты) и возможных присадок к моторному топливу, природа которых была показана ранее в работе [12].

В спектрах MALDI-TOF сухого остатка продуктов превращения CO<sub>2</sub> в этих системах наблюдаются сигналы с массой молекулярного катиона массами 376, 409 и 440, которым могут соответствовать соединения с брутто-формулой C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>, C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>7</sub>·2HO<sub>2</sub> и C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>5</sub>·3HO<sub>2</sub>.

По данным потенциометрического титрования выход щавелевой кислоты составляет 23 мас. % от поглощенного CO<sub>2</sub>.

Как показали результаты проведенных исследований, оптимальным значением pH среды для абсорбции диоксида углерода является 4,2, а концентрация раствора кислоты влияет незначительно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Negative emissions. P. 1. Research landscape and synthesis / J.C. Minx, W.F. Lamb, M.W. Callaghan, S. Fuss, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Beringer, T. Khanna, D. Lenzi, J.L. Vicente, M. del Mar Zamora Dominguez, T. Amann, W. de Oliveira Garcia, J. Hartmann, G. Luderer, G.F. Nemet, J. Rogelj, P. Smith, J. Wilcox // *Environmental Research Letters*. – 2018. – V. 13. – № 6. – P. 1–29.
2. Integrated assessment of carbon dioxide removal / W. Rickels, F. Reith, D. Keller, A. Oschlies, M.F. Quaas // *Earth's future*. – 2018. – V. 6. – № 3. – P. 565–582.
3. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle / D.P. Keller, A. Oschlies, A. Lenton, E.W. Littleton, V. Scott, N.E. Vaughan // *Current Climate Change Reports*. – 2018. – V. 4. – № 3. – P. 250–265.
4. Carbon dioxide Fischer-Tropsch synthesis: a new path to carbon-neutral fuels / Y.H. Choi, Y.J. Jang, H. Park, W.Y. Kim, Y.H. Lee, S.H. Choi, J.S. Lee // *Applied catalysis B: environmental*. – 2017. – V. 202. – P. 605–610.
5. Sch'del C., Schuur E.A.G., Bader M.K.F. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // *Nature climate change*. – 2016. – V. 6. – № 10. – P. 950–953.
6. Anuwattana R., Patkool C., Chawakitchareon P. Carbon dioxide adsorption using activated carbon via chemical vapor deposition process // *Engineering Journal*. – 2016. – V. 20. – № 4. – P. 59–68.
7. Carbon dioxide adsorption on nitrogen enriched carbon adsorbents: experimental, kinetics, isothermal and thermodynamic studies / C. Goel, N. Bhunia, P.K. Vajpai, N. Kaur // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. – 2016. – V. 16. – P. 50–63.
8. Лапидус А.Л., Голубева И.А., Жагфаров Ф.Г. Газохимия. – М.: ЦентрЛит-НефтеГаз, 2008. – 450 с.
9. Активация молекулярного кислорода в трифторуксусной кислоте / М.В. Вишнецкая, М.С. Иванова, В.Н. Солжан, Г.М. Жидомиров, М.Я. Мельников // *Журнал физической химии*. – 2012. – Т. 86. – № 5. – С. 889–891.
10. Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photodegradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid // *Chemosphere*. – 2017. – V. 181. – P. 26–36.
11. Превращения CO<sub>2</sub> в растворах трифторуксусной кислоты / М.В. Вишнецкая, М.С. Иванова, О.М. Свичкарев, Е.М. Буды-

- нина, М.Я. Мельников // *Журнал физической химии*. – 2013. – Т. 87. – № 5. – С. 742–744.
12. Вишнецкая М.В., Мельников М.Я. Особенности превращения органических и неорганических веществ в трифторуксусной кислоте // *Журнал физической химии*. – 2016. – Т. 90. – № 9. – С. 1434–1436.
13. Мацуо М., Отоси С. Соединения фтора. – М.: Мир, 1990. – 405 с.
14. Асланов Л.А., Захаров М.А., Абрамычева Н.Л. Ионные жидкости в ряду растворителей. – М.: МГУ, 2005. – 272 с.
15. Koshi J.K. Formation and oxidation of alkyl radicals by cobalt (III) complexes // *Journal of the American Chemical Society*. – 1968. – V. 90. – № 19. – P. 5196–5207.
16. Гидропероксидное окисление трудноокисляемых субстратов: беспрецедентный разрыв связи С-С в алканах, окисление молекулярного азота / А.Е. Гехман, И.П. Столяров, Н.В. Ершова, Н.И. Моисеева, И.И. Моисеев // *Кинетика и катализ*. – 2004. – Т. 45. – № 1. – С. 45–66.
17. Гехман А.Е., Моисеева Н.И., Моисеев И.И. Разложение пероксида водорода, катализируемое соединениями ванадия (V): пути образования озона // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 1995. – № 4. – С. 605–618.
18. Гехман А.Е., Моисеева Н.И., Моисеев И.И. Пероксокомплексы ванадия в катализе превращений пероксида водорода в трифторуксусной кислоте // *Координационная химия*. – 1992. – Т. 18. – С. 3–12.
19. Образование O<sub>3</sub> при каталитическом разложении H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / А.Е. Гехман, Н.И. Моисеева, Э.А. Блюмберг, И.И. Моисеев // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 1985. – № 11. – С. 2653–2657.
20. Hart N., Buehler C.A. Peroxytrifluoroacetic acid-boron fluoride as a source of positive hydroxyl // *The Journal of Organic Chemistry*. – 1964. – V. 29. – № 8. – P. 2397–2400.
21. Катализируемое ванадием (+5) окисление бензола и его производных гидропероксидами / Н.И. Моисеева, А.Е. Гехман, Э.А. Блюмберг, И.И. Моисеев // *Кинетика и катализ*. – 1988. – Т. 29. – С. 970–974.
22. Бучаченко А.Л. Комплексы молекулярного кислорода с органическими молекулами // *Успехи химии*. – 1985. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 195–212.

Поступила 10.09.2019 г.

**Информация об авторах**

**Иванова М.С.**, кандидат химических наук, доцент базовой кафедры нефтегазового дела НК «Роснефть» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном.

**Вишнецкая М.В.**, доктор химических наук, профессор кафедры промышленной экологии Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина.

**Томский К.О.**, кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой нефтегазового дела НК «Роснефть» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном.

UDC 544.47, 54.058

## CLEANING GAS EMISSIONS FROM CO<sub>2</sub> THROUGH TRIFLUOROACETIC ACID IN OIL AND GAS PRODUCTION

**Mariya S. Ivanova**<sup>1</sup>,  
ims.06@mail.ru

**Marina V. Vishnetskaya**<sup>2</sup>,  
mrvishnetskaya@mail.ru

**Kirill O. Tomskey**<sup>1</sup>,  
kirilltom@mail.ru

<sup>1</sup> Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University, 14, Oyunskiy street, Mirny, 678174, Russia.

<sup>2</sup> Russian State University of Oil and Gas, 65, Leninskiy avenue, Moscow, 119991, Russia.

**The relevance** of the problem of carbon dioxide emissions into the atmosphere is not currently in doubt. Mining and oil and gas facilities are a major source of carbon dioxide emissions. One of the features of carbon dioxide is its chemically stable molecule, which can remain unchanged in the atmosphere for a considerable amount of time. The most rational solution for carbon dioxide utilization from the products of combustion of hydrocarbons is its absorption with the receipt of new products that may find application in chemical industry. The main disadvantages of the carbon dioxide removal methods available today are the low conversion of the cleaned gases, the significant cost of the process, and the feasibility of the process with large amounts of cleaned gases in the exhaust.

**The aim** of the research is to determine the optimal parameters of catalytic CO<sub>2</sub> capture from the exhaust gases of the mining and oil and gas industries in trifluoroacetic acid solutions.

**The objects** of research are carbon dioxide, trifluoroacetic acid solutions of various concentrations, concentrated trifluoroacetic acid.

**Methods.** Purification of combustion products of hydrocarbons from CO<sub>2</sub> was carried out by passing it through a solution of trifluoroacetic acid, the spent acid was regenerated with air oxygen. The absorption capacities of trifluoroacetic acid solutions were investigated depending on the concentrations of the solutions and the pH value. CO<sub>2</sub> absorption in trifluoroacetic acid solutions was determined under standard conditions. Unabsorbed CO<sub>2</sub> was absorbed with a solution of alkali, the acidity of which was constantly fixed with a potentiometer. The amount of carbon dioxide absorbed was determined by potentiometric titration of the trap.

**Results.** The paper shows that catalytic purification of flue gases from CO<sub>2</sub> when using trifluoroacetic acid solutions proceeds under standard conditions with complete trapping of carbon dioxide.

### Key words:

Ecology, industrial gases, catalytic removal of CO<sub>2</sub>, trifluoroacetic acid, catalyst.

### REFERENCES

- Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M.W., Fuss S., Hilaire J., Creutzig F., Beringer T., Khanna T., Lenzi D., Vicente J.L., Del Mar Zamora Dominguez M., Amann T., De Oliveira Garcia W., Hartmann J., Luderer G., Nemet G.F., Rogelj J., Smith P., Wilcox J. Negative emissions. P. 1. Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 1–29.
- Rickels W., Reith F., Keller D., Oschlies A., Quaas M.F. Integrated assessment of carbon dioxide removal. *Earth's future*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 565–582.
- Keller D.P., Oschlies A., Lenton A., Littleton E.W., Scott V., Vaughan N.E. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 250–265.
- Choi Y.H., Jang Y.J., Park H., Kim W.Y., Lee Y.H., Choi S.H., Lee J.S. Carbon dioxide Fischer–Tropsch synthesis: a new path to carbon-neutral fuels. *Applied catalysis B: environmental*, 2017, vol. 202, pp. 605–610.
- Schdel C., Schuur E.A.G., Bader M.K.F. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature climate change*, 2016, vol. 6, no. 10, pp. 950–953.
- Anuwattana R., Patkool C., Chawakitchareon P.P. Carbon dioxide adsorption using activated carbon via chemical vapor deposition process. *Engineering Journal*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 59–68.
- Goel C., Bhunia H., Bajpai P.K., Kaur H. Carbon dioxide adsorption on nitrogen enriched carbon adsorbents: experimental, kinetics, isothermal and thermodynamic studies. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2016, vol. 16, pp. 50–63.
- Lapidus A.L., Golubeva I.A., Zhagfarov F.G. *Gazokhimiya* [Gas chemistry]. Moscow, CentrLit-NefteGaz Publ., 2008. 450 p.
- Vishnetskaya M.V., Ivanova M.S., Solkan V.N., Zhidomirov G.M., Melnikov M.Ya. Activation of molecular oxygen in trifluoroacetic acid. *Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 86, no. 5, pp. 889–891.
- Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photodegradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid. *Chemosphere*, 2017, vol. 181, pp. 26–36.
- Vishnetskaya M.V., Ivanova M.S., Svichkarev O.M., Budynina E.M., Melnikov M.Ya. Transformations of CO<sub>2</sub> in trifluoroacetic acid solutions. *Journal of Physical Chemistry*, 2013, vol. 87, no. 5, pp. 742–744.
- Vishnetskaya M.V., Melnikov M.Ya. Osobennosti prevrashcheniya organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv v triflorokisloty [Features of conversion of organic and inorganic substances in trifluoroacetic acid]. *Journal of Physical Chemistry*, 2016, vol. 90, no. 9, pp. 1434–1436.
- Matsuo M., Otsi S. *Soedineniya flora* [Fluorine compounds]. Moscow, Mir Publ., 1990. 182 p.
- Aslanov L.A., Zakharov M.A., Abramycheva N.L. *Ionnye zhidkosti v ryadu rastvoriteley* [Ionic liquids in a series of solvents]. Moscow, MSU Publ., 2005. 272 p.
- Koshi J. K. Formation and oxidation of alkyl radicals by cobalt (III) complexes. *Journal of the American Chemical Society*, 1968, vol. 90, no. 19, pp. 5196–5207.
- Gekhman A.E., Stolyarov I.P., Ershova N.V., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Hydroperoxide oxidation of hardly oxidizable substrates: an unprecedented breaking of the C–C bond in alkanes, ox-

- idation of molecular nitrogen. *Kinetics and catalysis*, 2004, vol. 45, no. 1, pp. 40–60.
17. Gekhman A.E., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Decomposition of hydrogen peroxide catalyzed by vanadium (V) compounds: the pathways for the formation of ozone. *Russian Chemical Bulletin*, 1995, no. 4, pp. 584–598.
  18. Gehman A.E., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Vanadium peroxo complexes in the catalysis of hydrogen peroxide transformations in trifluoroacetic acid. *Coordination chemistry*, 1992, vol. 18, pp. 3–12. In Rus.
  19. Gekhman A.E., Moiseeva N.I., Blumberg E.A., Moiseev I.I. O<sub>3</sub> formation during the catalytic decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Izvestiya Akademii Nauk. Chemical series*, 1985, no. 11 pp. 2653–2657. In Rus.
  20. Hart H., Buehler C.A. Peroxytrifluoroacetic acid-boron fluoride as a source of positive hydroxyl. *The Journal of Organic Chemistry*, 1964, vol. 29, no. 8, pp. 2397–2400.
  21. Moiseeva N.I., Gekhman A.E., Blumberg E.A., Moiseev I.I. Vanadium (+5) catalyzed oxidation of benzene and its derivatives by hydroperoxides. *Kinetics and Catalysis*, 1988, vol. 29, pp. 970–974. In Rus.
  22. Buchachenko A.L. Complexes of molecular oxygen with organic molecules. *Advances in Chemistry*, 1985, vol. 54, Iss. 2, pp. 195–212. In Rus.

Received: 10 September 2019.

#### Information about the authors

**Mariya S. Ivanova**, Cand. Sc., associate professor, Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University.

**Marina V. Vishnetskaya**, Dr. Sc., professor, Russian State University of Oil and Gas.

**Kirill O. Tomsky**, Cand. Sc., associate professor, Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University.