

В. А. Аникин, Ф. Р. Гариева

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ПРИМЕРЕ РЕАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: диоксид углерода, моноэтаноламин (МЭА), пиперазин, оптимизация, абсорбер, улавливание, абсорбция, моделирование процесса.

Представлен опыт усовершенствования технологии получения товарного диоксида углерода на примере реального промышленного производства. Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к повышению эффективности использования углеродсодержащих потоков, а также необходимостью увеличения выхода товарной продукции при сохранении стабильности технологического процесса и соблюдении действующих производственных ограничений. Кроме того, вопросы рационального использования диоксида углерода приобретают особую значимость в условиях глобального снижения выбросов парниковых газов и развития технологий улавливания и переработки CO₂. Основной целью работы является увеличение выхода товарного диоксида углерода за счёт совершенствования абсорбционного процесса. Для достижения поставленной цели предложены два направления интенсификации абсорбционного процесса: увеличение концентрации моноэтаноламина в растворе абсорбента и применение промотора абсорбции, способствующего повышению эффективности массопереноса и увеличению степени извлечения диоксида углерода из газовой смеси. Исследование влияния повышения концентрации моноэтаноламина в растворе абсорбента и применения пиперазина в качестве промотора абсорбции проводилось методом математического моделирования в программном комплексе Aspen HYSYS v14.0 с использованием специализированного термодинамического пакета Acid Gas, предназначенного для расчёта процессов абсорбционной очистки газовых потоков от кислых компонентов. Моделирование позволило воспроизвести параметры действующей установки, оценить влияние предлагаемых изменений на работу технологической схемы и определить оптимальные концентрации для растворов абсорбента. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения промотора абсорбции для повышения эффективности технологии получения товарного диоксида углерода без существенного изменения существующего оборудования и с минимальными капитальными затратами. Предложенные решения могут быть использованы для модернизации действующих установок очистки газовых потоков на предприятиях химической промышленности.

V. A. Anikin, F. R. Garieva

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMMERCIAL CARBON DIOXIDE USING THE EXAMPLE OF REAL PRODUCTION

Keywords: carbon dioxide, monoethanolamine (MEA), piperazine, optimization, absorber, capture, absorption, process modeling.

The paper presents the experience of improving the technology for producing commercial carbon dioxide using the example of a real industrial facility. The relevance of the study is determined by the increasing requirements for improving the efficiency of carbon-containing stream utilization, as well as by the need to increase the yield of commercial products while maintaining the stability of the technological process and complying with existing operational constraints. In addition, the rational use of carbon dioxide has become particularly important in the context of the global reduction of greenhouse gas emissions and the development of technologies for CO₂ capture and utilization. The main objective of the work is to increase the yield of commercial carbon dioxide by improving the absorption process. To achieve this objective, two approaches to intensifying the absorption process were proposed: increasing the concentration of monoethanolamine in the absorbent solution and using an absorption promoter that enhances mass transfer efficiency and increases the degree of carbon dioxide removal from the gas mixture. The study of the effect of increasing the monoethanolamine concentration in the absorbent solution and using piperazine as an absorption promoter was carried out by mathematical modeling in the Aspen HYSYS v14.0 software package using the specialized Acid Gas thermodynamic package designed for the calculation of acid gas absorption processes. The modeling made it possible to reproduce the parameters of the operating unit, evaluate the influence of the proposed modifications on the technological scheme, and determine the optimal concentrations of the absorbent solutions. The results demonstrate the potential of using an absorption promoter to improve the efficiency of commercial carbon dioxide production technology without significant modification of existing equipment and with minimal capital costs. The proposed solutions can be used for the modernization of existing gas purification units at chemical industry enterprises.

Введение

В условиях усиления глобальной климатической повестки и реализации стратегий достижения углеродной нейтральности промышленным предприятиям требуется внедрение технологических решений, направленных на сокращение выбросов диоксида углерода и повышение эффективности его улавливания и переработки [1-10]. Особую актуальность приобретает совершенствование процессов абсорбционной очистки газовых потоков. Существенную

роль в решении данных задач играют цифровые технологии моделирования, позволяющие проводить комплексный анализ режимов работы оборудования, оценивать влияние технологических параметров и обосновывать выбор оптимальных решений без проведения дорогостоящих экспериментов. Практика применения современных программных комплексов на действующих промышленных производствах под-

тверждает их высокую эффективность при разработке и внедрении мероприятий по интенсификации процессов и поиску оптимальных режимов работы.

В рамках настоящей работы рассмотрен практический пример усовершенствования технологии получения товарного диоксида углерода на действующем производстве. В ходе исследования проанализированы два варианта интенсификации процесса улавливания CO_2 : Увеличение концентрации моноэтаноламина в растворе абсорбента и добавление промотора абсорбции пиперазина [11]. Первый вариант был реализован в промышленных условиях и подтверждён фактическими показателями работы установки с фиксацией достигнутого экономического эффекта от увеличения производительности. Второй вариант рассматривается как перспективное направление технологической модернизации, направленное на дальнейшее повышение эффективности абсорбционного процесса при сохранении действующих эксплуатационных ограничений и минимальном изменении аппаратного оформления.

Методика моделирования

Все технико-технологические расчёты выполнялись с использованием программного обеспечения Aspen HYSYS v14.0, в котором была разработана математическая модель рассматриваемого участка производства. Адекватность модели подтверждена путём сопоставления расчётных параметров с фактическими производственными данными действующей установки, что позволило обеспечить достоверность полученных результатов и корректность прогнозируемых режимов работы. Сопоставление результатов моделирования с фактическими технологическими параметрами показало, что коэффициент корреляции

Пирсона превышает 0,8, что свидетельствует об адекватности разработанной модели. Для дополнительной проверки и уточнения параметров теплообменного оборудования соответствующие аппараты были детально смоделированы в специализированном программном комплексе Aspen Exchanger Design and Rating (EDR), что обеспечило оценку тепловых нагрузок, коэффициентов теплопередачи и гидравлических характеристик с учётом реальных конструктивных особенностей оборудования [11-12]. Технологическая модель представлена на рисунках 1,2.

Экспериментальная часть

В рамках настоящего исследования объектом технологического усовершенствования выбран основной аппарат установки улавливания диоксида углерода — абсорбционная колонна. Данный аппарат определяет степень извлечения CO_2 , нагрузку на последующие стадии: регенерации, компрессии, ректификации, и, как следствие, общий выход товарного продукта. В действующей технологической схеме улавливание диоксида углерода осуществляется водным раствором моноэтаноламина (МЭА) с массовой концентрацией 15 %, обеспечивающим химическую абсорбцию CO_2 из газового потока при заданных значениях температуры и давления в условиях эксплуатации установки. После насыщения диоксидом углерода абсорбент направляется на стадию регенерации, осуществляемую в десорбционной колонне, где при повышенной температуре и пониженном парциальном давлении CO_2 происходит его десорбция из раствора моноэтаноламина. Освобождённый от диоксида углерода раствор возвращается в цикл и повторно подаётся в абсорбер, что обеспечивает замкнутый характер процесса и непрерывность работы установки.

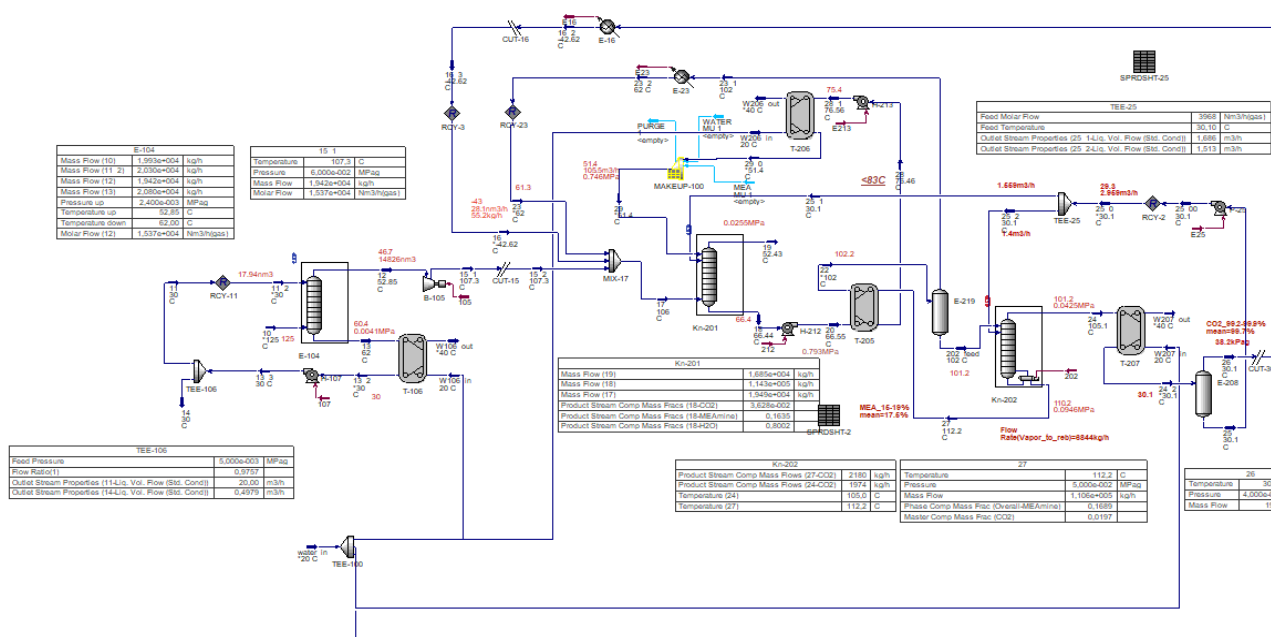


Рис. 1 – Технологическая модель действующего производства

Fig. 1 – Process model of the operating production facility

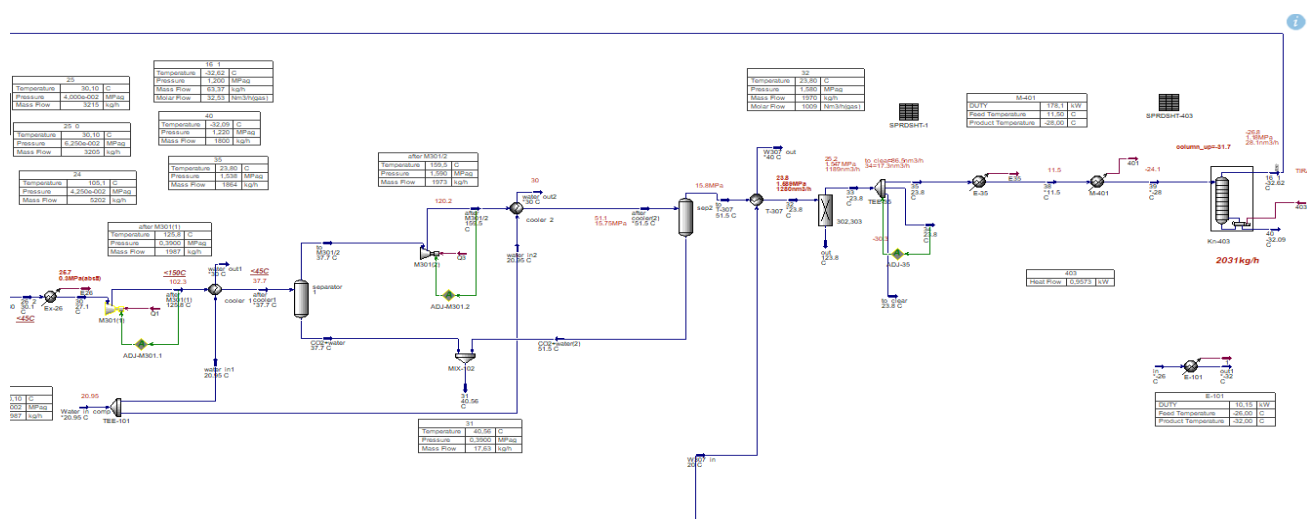


Рис. 2 – Технологическая модель действующего производства

Fig. 2 – Process model of the operating production facility

В качестве исходной точки отсчёта был принят регламентный режим работы установки, соответствующий фактическим эксплуатационным параметрам действующего производства. На его основе в программной среде была разработана и откалибрована модель абсорбционной колонны, отражающая текущие условия функционирования аппарата. Материальный баланс абсорбера на действующей установке до реализации каких-либо мероприятий по усовершенствованию технологии приведён в таблице 1 и используется в дальнейшем как базовый вариант для сравнительного анализа эффективности предлагаемых решений.

Таблица 1 – Материальный баланс абсорбера без изменений

Table 1 – Material balance of the absorber without modifications

Наименование вещества	Приход			
	Питание абсорбера		Раствор абсорбента	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O ₂)	403,99	2,27	0	0
Азот (N ₂)	13484,85	75,73	0	0
Вода (H ₂ O)	720,00	4,04	91044,44	82,86
Диоксид углерода (CO ₂)	3198,51	17,96	2361,85	2,15
Моноэтаноламин	0	0	16472	14,99
Итого (Попоточно)	17807,35	100	109878,29	100
Итого	127685,64			
Наименование вещества	Расход			
	Верхний продукт абсорбера		Нижний продукт абсорбера	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O ₂)	403,90	2,51	0,09	0,0001
Азот (N ₂)	13483,27	83,82	1,58	0,0014
Вода (H ₂ O)	870,29	5,41	90894,14	81,45
Диоксид углерода (CO ₂)	1327,94	8,26	4232,42	3,79
Моноэтаноламин	0,90	0,01	16471,10	14,76
Итого (Попоточно)	16086,30	100	111599,34	100
Итого	127685,64			

Первым из рассматриваемых технологических решений стало поэтапное увеличение массовой концентрации раствора моноэтаноламина до 23 %, что позволяет повысить химическую ёмкость абсорбента

и, как следствие, увеличить степень извлечения диоксида углерода из газового потока. Расчёт влияния концентрации МЭА на показатели работы абсорбера выполнялся с использованием встроенного в программное обеспечение инструмента Case Studies, обеспечивающего проведение параметрического анализа с варьированием заданных переменных. При изменении концентрации МЭА в диапазоне от 15%масс. до 30%масс. оказалось, что оптимальной концентрацией будет 23%масс., обеспечивающая максимальное увеличение количества абсорбированного CO₂ при сохранении технологических параметров процесса. Материальный баланс с увеличенной концентрацией раствора представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Материальный баланс абсорбера при концентрации МЭА 23%масс.

Table 2 – Material balance of the absorber at a monoethanolamine concentration of 23 wt%

Наименование вещества	Приход			
	Питание абсорбера		Раствор абсорбента	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O ₂)	403,99	2,27	0	0
Азот (N ₂)	13484,85	75,73	0	0
Вода (H ₂ O)	720,00	4,04	82247,06	74,85
Диоксид углерода (CO ₂)	3198,51	17,96	2361,851	2,15
Моноэтаноламин	0	0	25269,6	23,00
Итого (Попоточно)	17807,35	100	109878,51	100
Итого	127685,86			
Наименование вещества	Расход			
	Верхний продукт абсорбера		Нижний продукт абсорбера	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O ₂)	403,91	2,51	0,08	0,0001
Азот (N ₂)	13483,42	83,82	1,43	0,0013
Вода (H ₂ O)	813,0605	5,05	82154,00	73,62
Диоксид углерода (CO ₂)	773,2425	4,81	4787,1185	4,29
Моноэтаноламин	1,9458	0,01	25267,6542	22,64
Итого (Попоточно)	15475,58	100	112210,28	100
Итого	127685,86			

Наряду с увеличением концентрации основного абсорбента, в промышленной практике применяются и иные методы повышения эффективности процесса химической абсорбции. В частности, значительное внимание в научных исследованиях и патентной литературе уделяется использованию промоторов абсорбции, позволяющих интенсифицировать кинетику взаимодействия диоксида углерода с раствором амина без существенного изменения существующей аппаратурной схемы. Одним из наиболее распространенных и изученных промоторов является пиперазин, добавление которого к раствору моноэтаноламина способствует увеличению скорости реакции поглощения CO_2 и повышению общей абсорбционной способности системы [13-15].

В рамках настоящей статьи представлен расчёт материального баланса абсорбционной колонны при использовании модифицированного абсорбента — раствора моноэтаноламина с добавлением пиперазина в качестве промотора. Для оценки влияния концентрации пиперазина на степень извлечения диоксида углерода был проведён аналогичный параметрический анализ с использованием инструмента Case Studies в среде Aspen HYSYS. Концентрация пиперазина варьировалась в диапазоне от 0,5 %масс. до 10 %масс. По результатам расчётов определена оптимальная концентрация промотора, равная 4,77 %масс., обеспечивающая максимальное повышение абсорбционной способности системы при соблюдении действующих технологических ограничений. Материальный баланс абсорбера с использованием пиперазина в качестве промотора представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Материальный баланс абсорбера с добавкой пиперазина

Table 3 – Material balance of the absorber with the addition of piperazine

Наименование вещества	Приход			
	Питание абсорбера		Раствор абсорбента	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O_2)	403,99	2,27	0	0
Азот (N_2)	13484,85	75,73	0	0
Вода (H_2O)	720,00	4,04	91044,44	78,91
Диоксид углерода (CO_2)	3198,51	17,96	2361,85	2,05
Моноэтаноламин	0	0	16472	14,28
Пиперазин	0	0	5500	4,77
Итого (Попоточно)	17807,35	100	115378,29	100
Итого	133185,64			
Наименование вещества	Расход			
	Верхний продукт абсорбера		Нижний продукт абсорбера	
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.
Кислород (O_2)	403,91	2,68	0,08	0,0001
Азот (N_2)	13483,32	89,59	1,53	0,0013
Вода (H_2O)	805,5352	5,35	90958,90	77,00
Диоксид углерода (CO_2)	356,3578	2,37	5204,0032	4,41
Моноэтаноламин	1,0503	0,01	16470,95	13,94
Пиперазин	0,2577	0,00	5499,7423	4,66
Итого (Попоточно)	15050,43	100	118135,21	100
Итого	133185,64			

Обсуждение результатов

Результаты проведённых экспериментов показали увеличение абсорбционной способности системы в обоих рассматриваемых случаях. Повышение концентрации моноэтаноламина в растворе абсорбента позволило дополнительно уловить 554,69 кг диоксида углерода. В свою очередь, применение промотирующей добавки продемонстрировало более высокий эффект, обеспечив увеличение количества улавливаемого CO_2 на 971,58 кг.

В рамках проведённого исследования на действующем промышленном объекте были проведены опытно-промышленные испытания по увеличению концентрации моноэтаноламина в растворе абсорбента. Проведённые испытания не привели к отклонениям от регламентных параметров технологического режима, включая гидравлические и коррозионные показатели оборудования. По результатам эксплуатации установки в изменённых условиях был зафиксирован положительный экономический эффект, обусловленный увеличением производительности установки по товарному диоксиду углерода.

Однако, данные таблицы 3 свидетельствуют, что с введением в абсорбент пиперазина, существенно снижаются потери диоксида углерода в отходящем верхнем газовом потоке абсорбера 8,36 %масс. до 2,37 %масс. При этом достигается большая степень извлечения без значительного увеличения массовой концентрации моноэтаноламина, что позволяет избежать чрезмерного роста вязкости раствора, тепловых нагрузок на стадию регенерации и потенциальных эксплуатационных ограничений. Таким образом, применение пиперазина в качестве промотора абсорбции представляется наиболее целесообразным направлением технологической модернизации с точки зрения совокупности технических и эксплуатационных факторов.

Выводы

Проведённый анализ показал, что совершенствование работы абсорбционной колонны является ключевым фактором повышения эффективности установки получения товарного диоксида углерода. Пошаговое увеличение концентрации моноэтаноламина подтверждено как реализуемое решение с зафиксированным промышленным и экономическим эффектом. Вместе с тем моделирование варианта с применением пиперазина продемонстрировало более высокий потенциал интенсификации процесса при сохранении эксплуатационных ограничений и без существенного изменения концентрации основного абсорбента. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности дальнейшего внедрения промоторов абсорбции как эффективного инструмента модернизации существующих производств и подтверждают высокую прикладную значимость цифрового моделирования при обосновании технологических решений.

Литература

1. Рамочная конвенция Организации Объединённых Наций об изменении климата: [сайт]. – URL: Рамочная конвенция Организации Объединённых Наций об изменении

- климата от 9 мая 1992 г. (pravo.gov.ru) (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
2. Конвенции и соглашения: [сайт]. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
3. Организация Объединенных Наций. Меры по борьбе с изменением климата: [сайт]. – URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
4. Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666. О сокращении выбросов парниковых газов: [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
5. У России появился план по снижению выбросов парниковых газов до 2050 года: [сайт]. – URL: <https://ac.gov.ru/news/page/u-rossii-poavilsa-plan-po-snizheniu-vybrosov-parnikovyyh-gazov-do-2050-goda-26549> (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
6. Выбросы углекислого газа CO₂ в мире: [сайт]. – URL: tadviser.ru (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
7. Выбросы CO₂ от сжигания топлива: [сайт]. – URL: <https://energystats.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html> (дата обращения: 31.08.2023). – Текст: электронный.
8. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России [Электронный ресурс] / под ред. Т. Митровой, И. Гайды // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – Режим доступа: Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России (skolkovo.ru), свободный. – Загл. с экрана.
9. Баззанелла А., Крэмер Д. Результаты финансируемой меры Федерального министерства образования и научных исследований Германии. Технологии устойчивого развития и защиты климата – химические процессы и использование CO₂ [Электронный ресурс] // Общество химической техники и биотехнологии DECHEMA. – 2017. – Seltersdruck & Verlag Lehn GmbH + Co. KG. – Режим доступа: https://dechema.de/en/energyandclimate/_/CO2_Buch_engl.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
10. Агентство по охране окружающей среды США. Технологии улавливания и хранения углекислого газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.epa.gov/carbon-capture-and-sequestration> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.
11. Чжоу С. Д., Гупта Р. П., Рабиндран А. В. Р. Высокоэффективные составы растворителей для улавливания CO₂ и системы и процессы улавливания CO₂ с их использованием: патент WO2025029534A1; опубл. 06.02.2025.
12. Аспен Технологджи. Аспен ХАЙСИС — программное обеспечение для моделирования технологических процессов в энергетической и химической промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspens-hysys> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.
13. Мир химической инженерии. Моделирование технологических процессов в химической инженерии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chemicalengineeringworld.com/process-simulation-in-chemical-engineering/> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.
14. Международное энергетическое агентство. Улавливание, использование и хранение углекислого газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage> (дата обращения: 04.03.2026).
15. Министерство энергетики США. Исследования и разработки в области улавливания углекислого газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/fecm/carbon-capture-research> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.
16. Глобальный институт CCS. Технологии улавливания CO₂ после сжигания топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.

References

1. United Nations Framework Convention on Climate Change: [website]. – URL: United Nations Framework Convention on Climate Change of May 9, 1992 (pravo.gov.ru) (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
2. Conventions and Agreements: [website]. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
3. United Nations. Measures to Combat Climate Change: [website]. – URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
4. Decree of the President of the Russian Federation No. 666 dated 04.11.2020. On the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: [website]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
5. Russia Has a Plan to Reduce Greenhouse Gas Emissions by 2050: [website]. – URL: <https://ac.gov.ru/news/page/u-rossii-poavilsa-plan-po-snizheniu-vybrosov-parnikovyyh-gazov-do-2050-goda-26549> (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
6. Global Carbon Dioxide (CO₂) Emissions: [website]. – URL: tadviser.ru (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
7. CO₂ Emissions from Fuel Combustion: [website]. – URL: <https://energystats.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html> (accessed: 31.08.2023). – Text: electronic.
8. Decarbonization of the Oil and Gas Industry: International Experience and Priorities for Russia [Electronic resource] / ed. by T. Mitrova, I. Gaida // Energy Centre of the Moscow School of Management SKOLKOVO. – 2021. – Access mode: Decarbonization of the Oil and Gas Industry: International Experience and Priorities for Russia (skolkovo.ru), free. – Title from screen.
9. Bazzanella A., Krämer D. Results of the BMBF Funding Measure. Technologies for Sustainability and Climate Protection – Chemical Processes and Use of CO₂ [Electronic resource] // DECHEMA Society for Chemical Engineering and Biotechnology. – 2017. – Seltersdruck & Verlag Lehn GmbH + Co. KG. – Access mode: https://dechema.de/en/energyandclimate/_/CO2_Buch_engl.pdf, free. – Title from screen.
10. U.S. Environmental Protection Agency. Carbon Capture and Sequestration Technologies [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.epa.gov/carbon-capture-and-sequestration> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.
11. Zhou S. J., Gupta R. P., Rabindran A. V. R. High performance CO₂ capture solvent compositions, and CO₂ capture systems and processes utilizing same: Patent WO2025029534A1; publ. 06.02.2025.
12. Aspen Technology. Aspen HYSYS — Process Simulation Software for Energy and Chemical Industries [Electronic resource].

- source]. – Access mode: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.
13. Chemical Engineering World. Process Simulation in Chemical Engineering [Electronic resource]. – Access mode: <https://chemicalengineeringworld.com/process-simulation-in-chemical-engineering/> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.
14. International Energy Agency. Carbon Capture, Utilisation and Storage [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.
15. U.S. Department of Energy. Carbon Capture Research and Development [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.energy.gov/fecm/carbon-capture-research> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.
16. Global CCS Institute. Post-combustion CO₂ Capture Technologies [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/> (accessed: 04.03.2026). – Text: electronic.

© **В. А. Анкин** – студент 2 курса магистратуры, кафедра Технологии основного органического и нефтехимического синтеза (ТООНС), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ); Инженер-технолог систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП), ООО «ЭПИК», Казань, Россия, anikin.vsevolod@epic-kzn.ru; **Ф. Р. Гариева** – к.х.н., доцент кафедры ТООНС, КНИТУ, garievafr@mail.ru.

© **V. A. Anikin** – 2nd-year Master-student, Department of Technology of Basic Organic and Petrochemical Synthesis (TBOPS), Kazan National Research Technological University (KNRTU); Process Engineer of Advanced Process Control Systems, EPIC LLC, Kazan, Russia, anikin.vsevolod@epic-kzn.ru; **F. R. Garieva** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the TBOPS department KNRTU, garievafr@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 06.05.26.

Дата принятия рукописи в печать – 22.06.26.