

УДК 614.8

<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-50-65>

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2022

Методический подход к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа для защиты окружающей среды и населения

**Малышев В. П.*,
Виноградов О. В.,
Родионов И. А.,**

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), 121352, Россия, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7

Аннотация

В статье рассмотрены возможности современных технологий улавливания и переработки углекислого газа в целях снижения его влияния на климатические изменения и негативного воздействия на жизнедеятельность людей, находящихся длительное время в местах массового пребывания. На основе анализа социально-экономической значимости, научно-технического уровня разработки технологических процессов и необходимого ресурсного обеспечения технологий улавливания и переработки углекислого газа предложен методический подход к определению перспектив их использования.

Ключевые слова: технология улавливания и переработки углекислого газа; перспектива использования; социально-экономическая значимость; научно-технический уровень; ресурсное обеспечение.

Для цитирования: Малышев В. П., Виноградов О. В., Родионов И. А., Методический подход к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа для защиты окружающей среды и населения // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 6. С. 50–65. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-50-65>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Methodological Approach to Determining the Prospects of Using Carbon Dioxide Capture and Processing Technologies to Protect the Environment and Populations

Vladlen P. Malyshev*,
Oleg V. Vinogradov,
Igor A. Rodionov,

All-Russian Research Institute
for Civil Defense and Emergency
Situations of EMERCOM of
Russia,
Davydkovskaya str., 7, Moscow,
121352, Russia

Abstract

This article discusses the possibilities of modern technologies for capturing and processing carbon dioxide in order to reduce its impact on climate change and the negative impact on the livelihoods of people who have been in places of mass residence for a long time. Based on the analysis of socio-economic significance, the scientific and technical level of technological process development and the necessary resource support for carbon dioxide capture and processing technologies, a methodological approach to determining the prospects for their use is proposed.

Keywords: carbon dioxide capture and processing technologies; use prospects; socio-economic significance; scientific and technical level; resource provision.

For citation: Malyshev V.P., Vinogradov O.V., Rodionov I.A. Methodological approach to determining the prospects of using carbon dioxide capture and processing technologies to protect the environment and populations // *Issues of Risk Analysis*. 2022;19(6):50-65, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-50-65>

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Обоснование методического подхода к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа
2. Анализ возможностей современных технологий улавливания и переработки углекислого газа
3. Результаты применения методического подхода для оценки перспектив использования технологий и средств улавливания углекислого газа для защиты окружающей среды и населения в местах массового пребывания людей

Заключение

Литература

Введение

Сжигание ископаемого топлива, вырубка лесов, по мнению многих ученых [1—3], приводят к существенному увеличению в атмосфере Земли содержания углекислого газа, который способствует изменению климата. Глобальное изменение климата существенно увеличило риск возникновения крупных лесных и ландшафтных пожаров и катастрофических паводков. В Российской Федерации весьма уязвимыми к изменениям климата являются сельское, лесное и водное хозяйства. Это связано, главным образом, с перераспределением осадков и увеличением числа и интенсивности засух. За последние 20 лет количество лесных пожаров в Российской Федерации увеличилось примерно на 11 тыс., а площадь лесов России сократилась на 9,1%. Особенно увеличилась площадь выжженных лесных участков в арктической зоне Сибири. В настоящее время количество паводкоопасных зон в нашей стране составляет около 9 тыс., их потенциальная площадь составляет около 400 тыс. км², в них проживает примерно 12,5 млн человек. По данным Минприроды России, в следующем десятилетии частота возникновения крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера может увеличиться более чем в два раза, а ежегодный экономический ущерб составит от 50 до 60 млрд рублей [2].

Кроме этого, в условиях длительного пребывания в местах массового скопления людей в помещениях (особенно учащихся) возникла проблема влияния повышенных концентраций углекислого газа на здоровье человека. В настоящее время эта проблема приобрела мировое значение [4, 5]. По инициативе Европейского респираторного общества в школах Франции, Италии, Дании, Швеции и Норвегии были проведены исследования влияния повышенных концентраций углекислого газа на здоровье учащихся [6]. Они показали, что в учебных заведениях, где концентрация CO₂ в классах превышала 0,1%, подверженность учащихся заболеваниям респираторных органов повысилась в 2—3,5 раза [7].

Таким образом, увеличение выбросов углекислого газа в окружающую природную среду способствует изменению климата, а рост концентраций

углекислого газа в местах массового скопления людей в помещениях оказывает негативное влияние на здоровье человека.

1. Обоснование методического подхода к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа

Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, если в ближайшие годы улавливать углекислый газ начнут повсеместно, это позволит миру сократить не менее 15% всех парниковых выбросов, от которых необходимо избавиться, чтобы сдержать глобальное потепление в пределах 2 °С. Сегодня в мире насчитывается лишь 28 крупных промышленных объектов в 10 странах, где улавливается, захоранивается или перерабатывается (используется) углекислый газ в качестве исходного сырья. Они суммарно утилизируют 40 млн т выбросов углекислого газа в год. Больше половины этого объема (28,5 млн т в год) приходится на предприятия по переработке природного газа. Остальное — на предприятия по производству стройматериалов, удобрений, водорода, синтетического топлива, электроэнергии, биотоплива, а также железа и стали.

Для борьбы с климатическими изменениями многие крупные мировые компании руководствуются концепцией устойчивого развития, включающей три ключевых компонента (ESG-факторы: экономический, экологический и социальный). Это позволяет компаниям на практике определять области воздействия на окружающую среду, общество и экономику, выбирая приоритетные направления для осуществления вклада в благополучие нынешних и будущих поколений. Впервые ESG-принципы сформулировал бывший Генеральный секретарь ООН Кофи Аннан. Он предложил управленцам крупных мировых компаний включить эти принципы в свои стратегии, в первую очередь для борьбы с изменением климата.

В Российской Федерации в настоящее время используется методология ESG-факторов для изучения проблем, связанных с окружающей средой, включая изменение климата, обществом (социальные факторы) и корпоративным управлением.

В журнале «Газовая промышленность» периодически рассматривается возможность реализации ESG-повестки на российском рынке, исследуется влияние ESG-факторов на экономические аспекты, прогнозируются возможные сценарии (ускорение или замедление) развития ESG-повестки в России и мире [8, 9].

Для решения экологических проблем глобальный потенциал современных технологий улавливания и переработки углекислого газа огромен: по оценкам ООН, он составляет 10—30 млрд т углекислого газа в год к 2050 г. и ограничен лишь отсутствием развитых производственных связей между предприятиями, осуществляющими масштабные выбросы углекислого газа, к предприятиям, способным переработать или захоронить CO₂ [1, 10].

Наряду с созданием рациональных способов снижения выбросов углекислого газа в окружающую среду за счет поглощения и последующей переработки в полезные для экономики продукты возникла проблема разработки технических решений по снижению его негативного воздействия на жизнедеятельность людей, находящихся длительное время в местах массового пребывания. Одновременно для крупных изготовителей аммиака и карбамида приоритетным направлением деятельности является создание технологий и оборудования крупнотоннажного производства углекислого газа. Это вызвано тем, что углекислый газ находит широкое применение не только на предприятиях крупнотоннажной химии, но и в различных отраслях промышленности, в том числе и в нефтехимии. Росту его потребления способствует создание крупных агрегатов с углекислотной конверсией, например, метанольных, в которых углекислый газ используется в качестве одного из компонентов промышленного синтеза. Таким образом, при оценке перспективности использования технологий поглощения и переработки углекислого газа необходимо разработать методический комплексный подход, позволяющий учитывать возможность их применения как для решения задач по защите окружающей среды и населения, так и для повышения эффективности производства.

Для реализации комплексного подхода необходимо оценивать возможность масштабного внедрения современных технологий улавливания и пере-

работки углекислого газа по следующим направлениям:

- социально-экономическая значимость технологии;
- научно-технический уровень основных технологических процессов;
- уровень необходимого ресурсного обеспечения для реализации технологии.

Общий методический подход к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа представлен на рис. 1.

2. Анализ возможностей современных технологий улавливания и переработки углекислого газа

Основной вклад в эмиссию углекислого газа вносит сжигание ископаемого топлива, главными потребителями которого являются тепловые электростанции и транспортные средства, оснащенные двигателями внутреннего сгорания. Тепловые электростанции России потребляют в год 12 млн т угля и выбрасывают в окружающую среду до 29 млн т углекислого газа. Улавливание углекислого газа из дымовых выбросов связано с рядом трудностей, так как выбросы представляют сложную многокомпонентную систему, включающую 17% углекислого газа, около 75% азота, 3—5% кислорода и в пределах 1—2% оксидов азота и серы. Оксиды серы и азота реагируют с сорбентами и тем самым снижают их поглотительную способность. Поэтому в таких установках желателен предварительной очистки от оксидов серы и азота. Наличие кислорода в дымовом газе приводит к активной коррозии металлов, в частности углеродистой стали. Кислород также увеличивает деградацию сорбента и ухудшает его поглотительную способность. Поэтому для реализации процессов сорбции предпочтительно содержание в дымовых газах не более 1,5—3% кислорода.

Одним из наиболее эффективных и селективных поглотителей углекислого газа из дымовых выбросов является 30% водный раствор моноэтаноламина с ингибиторами, который обеспечивает поглощение до 85—95% углекислого газа и очистку его до 99,95% [13].



Рис. 1. Общий методический подход к определению перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа

Figure 1. General methodological approach to determining the prospects for the use of capture and processing technologies

Существенным недостатком моноэтаноламинового способа очистки газовых смесей от углекислого газа является образование значительных количеств смолистых веществ из-за циклизации моноэтаноламина в производные оксазолидона-2 и далее в продукты их превращения. С целью повышения эффективности выделения диоксида углерода из газовых смесей на большинстве предприятий по производству минеральных удобрений проведена замена моноэтаноламина на метилдиэтаноламин (МДЭА). Типичный диапазон производительности абсорберов по извлечению углекислого газа из дымовых газов составляет от 90 до 1000 т/сут. При необходимости мощность установок может быть повышена до 4600 т/сут (например, при переработке дымовых газов, образующихся при сжигании угля) или до 2400 т/сут углекислого газа из дымовых га-

зов, являющихся продуктами сгорания природного газа.

При этом из технологической схемы исключается смолыделитель, сокращаются расходные нормы сырья и энергоносителей на выпуск продукции. В целом стоимость улавливания тонны углекислого газа на теплоэлектростанциях и объектах металлургии уже сегодня составляет порядка 5 тыс. руб., а на объектах нефтегазохимии — до 6 тыс. руб. По прогнозам, за девять лет в связи с развитием технологий эти цены могут снизиться в 1,5 раза.

Однако последующая транспортировка углекислого газа, выделенного из растворителя для переработки в карбамид и другие полезные продукты, потребует значительных затрат (около 60 млн руб. за каждый километр транспортировки нескольких тысяч тонн). Поэтому в настоящее время

на ПАО «Тольяттиазот», имеющем в своем составе 4 агрегата «Кемико» и 3 агрегата типа АМ-76, реализованы технологии, в которых сочетаются процессы улавливания углекислого газа из выбросов производственных газов и его последующая переработка с помощью аммиака для получения карбамида. Большое влияние на производительность агрегатов карбамида оказывают условия подачи углекислого газа [18]. Для производства карбамида могут использовать жидкий углекислый газ, который смешивают с газообразным аммиаком под давлением 15 МПа на агрегат синтеза. Если же аммиак поступает в реактор синтеза в жидком виде, то углекислый газ — в газообразном. На предприятии реализованы две технологии улавливания углекислого газа с помощью этаноламина (АМ-76) и с применением раствора поташа (Кемико). Количество образующегося на предприятии углекислого газа составляет 2400 т/сут, из которых лишь 36% может быть вовлечено в производственный процесс получения карбамида. Однако фактическое использование на сегодняшний день составляет 11%, остальное количество газа выбрасывается в атмосферу.

Для поглощения углекислого газа может быть использована технология кальциевого карбонатного цикла, которая заключается в использовании в качестве хемосорбента оксида кальция, который, взаимодействуя с углекислым газом, образует плохо растворимый в воде карбонат кальция.



На основе использования этого метода ученые из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) создали экологичный бетон из углекислого газа, выбрасываемого электростанциями. Новый строительный материал является особо прочным, и для его создания используется технология 3D-печати.

Известковые хемосорбенты, предназначенные для средств защиты органов дыхания человека, известны с 20-х гг. прошлого столетия и практически не претерпели изменений по химическому составу как за рубежом, так и в России. Все марки хемосорбентов (поглотителей) CO_2 имеют примерно одинаковый химический состав и выпускаются в виде гранул, таблеток, полусфер, шариков и т. п. с различным фракционным составом размером от 2

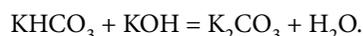
до 12 мм. В России производство химического известкового поглотителя марки ХП-И освоено более полувека назад¹ [10].

Известковые хемосорбенты содержат более 90% гидроксида кальция (без учета воды), 2...4% щелочи калия или натрия, отличаются лишь небольшим разнообразием модифицирующих добавок, направленных, главным образом, на повышение сорбционных и прочностных характеристик. Для всех известных на сегодня марок продуктов сорбционная емкость составляет примерно 80...90 $\text{дм}^3/\text{кг}$ [10], что значительно ниже стехиометрического значения по реакции с гидроксидом калия — 304 $\text{дм}^3/\text{кг}$ [12]. Введение различных химических веществ в состав хемосорбентов не приводило к существенному увеличению сорбционной емкости.

Углекислый газ легко поглощается соединениями щелочных или щелочноземельных металлов [14]. Для этих целей применяется абсорбционный метод поглощения, приведенный на рис. 2. При использовании в качестве поглотителя гидроксида калия реакция может проводиться двумя способами. В первом способе сначала углекислый газ поглощается раствором щелочи до образования бикарбонатной соли по реакции:



а затем бикарбонат калия реагирует со щелочью, образуя карбонат:



Второй способ связан с использованием водного раствора поташа, который используется преимущественно на агрегатах «Кемико». Он описывается следующей реакцией:



При температуре 45—55 °С реакция идет вправо, т. е. наблюдается абсорбция CO_2 ; при температуре 102 °С и выше — влево (десорбция). Это позволяет регенерировать поглотитель.

¹ Пат. 2410138 РФ, МПК А 62 В 19/00. Регенеративный патрон / Н.А. Астахов, В.Н. Усов [и др.]; ОАО «Корпорация «Росхимзащита». 2011.

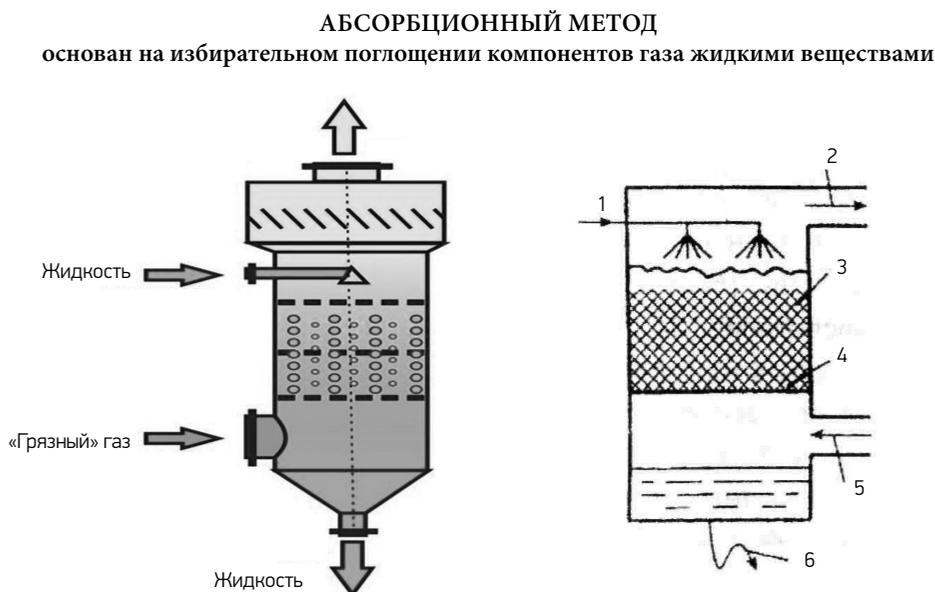
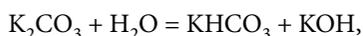


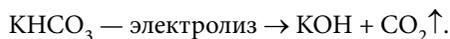
Рис. 2. Метод поглощения углекислого газа щелочными растворами

Figure 2. Method of carbon dioxide absorption by alkaline solutions

Использование в качестве поглотителя гидроксида калия также позволяет регенерировать поглотитель с помощью электролиза. Работа установок электрохимического удаления CO_2 основана на реакциях, которые описаны выше. В водном растворе карбонатные и бикарбонатные соли находятся в динамическом равновесии:



а в условиях электролиза KHCO_3 разлагается с выделением CO_2 , при этом восстанавливается исходная щелочь:



В патенте №98938 РФ, МПК В 01 D 53/00. «Установка для концентрирования диоксида углерода, извлекаемого из атмосферы (варианты)»² авторы Л. А. Жинжиков, Л. И. Гаврилов и А. А. Кочетков рассмотрели два варианта очистки воздуха от CO_2 на основе гидроксида калия, а затем с помощью электролиза из раствора поглотителя удалили CO_2 , а из избытка воды получили водород и кислород.

² Пат. 98938 РФ, МПК В 01 D 53/00. Установка для концентрирования диоксида углерода, извлекаемого из атмосферы (варианты) / Л.А. Жинжиков, Л.И. Гаврилов, А.А. Кочетков. 2010.

По первому варианту (рис. 3а) воздух из атмосферы замкнутого обитаемого объема с помощью воздуходувки 1 продувается через абсорбер 3. Поглощающий CO_2 раствор щелочи с помощью насоса высокого давления 8 и форсунки 2 впрыскивается в поток воздуха. За счет абсорбции CO_2 поглощается щелочью с образованием карбонатных и бикарбонатных солей. Установленный на выходе из абсорбера сепаратор жидкости 4 отделяет полученный раствор солей от воздуха. Очищенный от CO_2 воздух поступает в атмосферу обитаемого объема, а раствор солей с помощью жидкостного насоса 5 прокачивается через электролизер 6, где из раствора солей выделяется CO_2 , а также из воды — водород и кислород. Полученные газы направляются в водородно-кислородный топливный элемент 7, где происходит окисление водорода. Диоксид углерода и пары воды направляются в систему утилизации.

По второму варианту (рис. 3б) воздух из атмосферы замкнутого обитаемого объема с помощью воздуходувки 1 продувается через абсорбер 3, представляющий из себя мембранный диффузионный аппарат, причем воздух продувается с одной стороны мембраны, а поглощающий CO_2 раствор щелочи циркулирует с другой стороны мембраны. За счет диффузии через стенку мембраны CO_2 поглощается

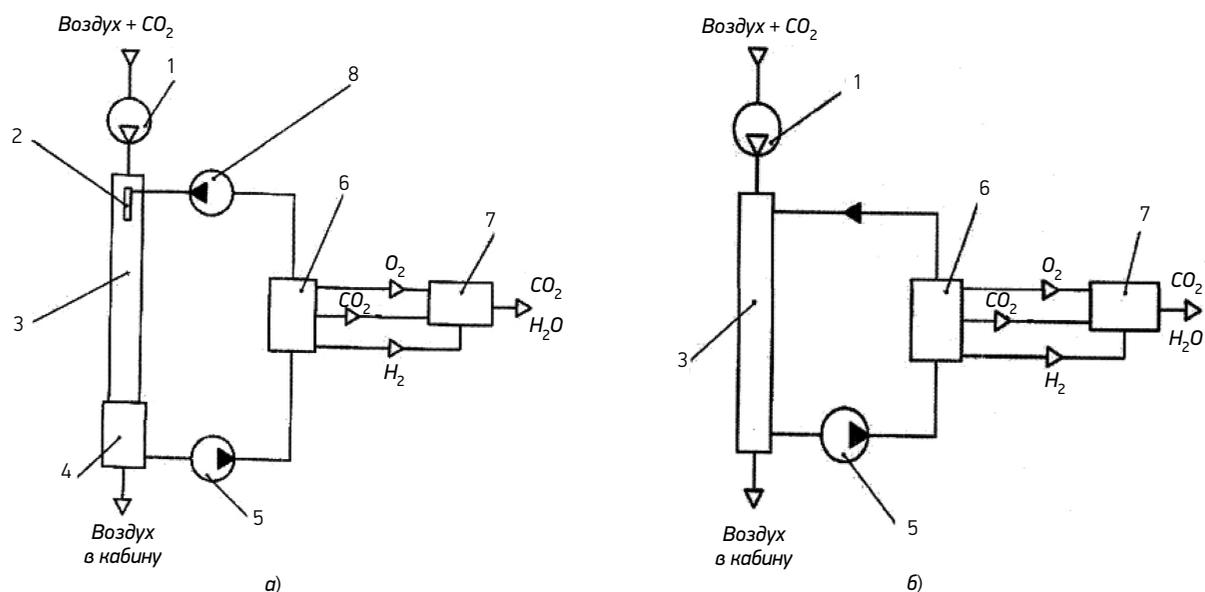


Рис. 3. Два варианта схем очистки воздуха от CO₂ в замкнутом объекте: а — с адсорбцией CO₂ из воздуха; б — с мембранным элементом. 1 — воздуходувка; 2 — форсунка; 3 — абсорбер; 4 — сепаратор жидкости; 5 — жидкостный насос; 6 — электролизер; 7 — топливный элемент; 8 — насос высокого давления

Figure 3. Two variants of air purification schemes from CO₂ in a closed object: а — with adsorption of CO₂ from the air; б — with a membrane element. 1 — blower; 2 — nozzle; 3 — adsorber; 4 — liquid separator; 5 — liquid pump; 6 — electrolyzer; 7 — fuel cell; 8 — high pressure pump

щелочью с образованием карбонатных и бикарбонатных солей. Дальнейшие операции проводят по первому варианту. Топливный элемент в этих двух установках вырабатывает энергию, за счет которой осуществляется работа насосов 5 и/или 8.

Таким образом, сочетая процессы поглощения электролиза можно регенерировать поглотитель и получать углекислый газ и водород, которые могут быть использованы для получения метанола.

Синтез метанола из углекислого газа и водорода является одним из важнейших процессов современной химической промышленности. В литературе описаны различные способы получения этого продукта, включающие реакцию углекислого газа с водородом под давлением 1—15 МПа, температуре 160—300 °С, объемной скорости 7000—25 000 ч⁻¹ в присутствии катализатора, содержащего оксиды меди и цинка, выделение метанола из реакционной смеси и рециркуляцию непрореагировавших в синтезе метанола веществ³. В качестве сырья применя-

ют смесь водорода с оксидом и диоксидом углерода, содержание в смеси углекислого газа варьируется в интервале 3—12 об. %. В реакционном газе, контактирующем с катализатором, объемное отношение водорода к сумме оксидов углерода в 1,3—3,0 раза больше стехиометрического.

Для поглощения углекислого газа может быть использована технология фотосинтеза на основе хлорофилла из различных водорослей, которая позволяет получать крахмал или биологическое топливо. Водная среда планеты содержит значительное количество водорослей, которые вносят существенный вклад по извлечению углекислого газа из атмосферы земного шара. Однако отсутствие знаний о механизме и кинетике фотохимических реакций углекислого газа и различных водорослей и способах получения воспроизводимых результатов при синтезе получаемых продуктов затрудняет промышленную реализацию данных технологий [15].

Еще одна технология дальнейшего использования углекислого газа представляет собой его закачивание в действующие нефтяные месторождения. Эта технология считается одной из самых перспективных, так как закачивание углекислого

³ Пат. 98938 РФ, МПК В 01 D 53/00. Установка для концентрирования диоксида углерода, и извлекаемого из атмосферы (варианты) / Л.А. Жинжиков, Л.И. Гаврилов, А.А. Кочетков. 2010.

газа в действующие нефтяные месторождения снижает вязкость нефти и повышает ее подвижность. В результате приток нефти к скважине увеличивается, что позволяет дополнительно извлечь из пласта до 15% запасов нефти. По оценке аналитиков, отечественная нефтяная индустрия прямо сейчас могла бы с целью повышения нефтеотдачи захоронить 23 млрд т диоксида углерода (столько Россия выбросит за 10 лет).

Такой подход позволяет повысить добычу, причем использование углекислого газа значительно эффективнее традиционного вытеснения нефти водой. Именно с этого началось развитие этой технологии — первые такие проекты появились в 1970-х гг. на нефтяных месторождениях в Техасе (США) [16].

Все крупные нефтяные компании страны — эмитенты большого объема выбросов парниковых газов — осведомлены о возможностях данных технологий. О намерении запустить пилотные проекты по улавливанию, химической нейтрализации, транспортировке и хранению углекислого газа в подземных хранилищах и собственных выработанных месторождениях в феврале 2021 г. заявляла Роснефть. Впрочем, запуск этих инициатив состоится не раньше 2028 г., в основном из-за опасений недостаточной рентабельности данных технологий. Поэтому многие специалисты считают, что без государственной поддержки — прямой (субсидии) или косвенной (льготы и преференции) — не обойтись. Это поможет вывести на рынок пилотные проекты, которые пока не окупаются.

3. Результаты применения методического подхода для оценки перспектив использования технологий и средств улавливания углекислого газа для защиты окружающей среды и населения в местах массового пребывания людей

Для количественной оценки перспективности использования технологий и средств улавливания углекислого газа для защиты окружающей среды и населения использовался метод иерархий [19]. В методе иерархий используется определенный набор количественных показателей для экспертной оценки перспективности реализации тех или иных предложений.

Для оценки перспективности использования технологий улавливания углекислого газа для защиты окружающей среды предлагается использовать следующие показатели:

- социально-экологическая значимость;
- научно-технический уровень;
- экономически приемлемый уровень ресурсного обеспечения.

Весомость каждого показателя предлагается оценивать по трехбалльной системе. Условия оценки показателей по балльной системе приведены в табл. 1.

Анализ возможностей современных технологий улавливания и переработки углекислого газа для защиты окружающей среды свидетельствует о том, что некоторые из них имеют хорошие перспективы использования при условии существенного

Таблица 1. Условия оценки показателей перспективности использования технологий улавливания углекислого газа по балльной системе

Table 1. Conditions for evaluating indicators of prospects for using carbon dioxide capture technologies according to the point system

Показатели перспектив использования технологий	Условия получения высшей оценки 3 балла	Условия получения средней оценки 2 балла	Условия получения нижней оценки 1 балл
Социально-экологическая значимость	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды	Ограниченные возможности использования для защиты окружающей среды	Отсутствуют сведения по перспективам использования для защиты окружающей среды
Научно-технический уровень	Основные технологические процессы реализованы в промышленном масштабе	Основные технологические процессы находятся на стадии реализации	Проводятся исследования возможности использования для улавливания углекислого газа
Экономически приемлемый уровень ресурсного обеспечения	Решены проблемы экономически приемлемых способов транспортировки углекислого газа	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа	Отсутствуют сведения по ресурсному обеспечению

увеличения экономичности способов хранения и последующей транспортировки углекислого газа, которые в настоящее время требуют значительных затрат. Результаты оценки социально-экологической значимости, научно-технического уровня разработки технологических процессов и необходимого ресурсного обеспечения технологий улавливания и переработки углекислого газа для защиты окружающей среды приведены в табл. 2.

Для Российской Федерации наиболее перспективной в настоящее время является технология закачивания углекислого газа в действующие нефтяные месторождения. Для повышения рентабельности современных технологий улавливания и переработки углекислого газа необходимо создание комплексных промышленных объединений, обеспечивающих улавливание, транспортировку, последующую переработку или закачивание углекислого

Таблица 2. Результаты оценки перспектив использования технологий улавливания и переработки углекислого газа

Table 2. Results of the assessment of the prospects for the use of carbon dioxide capture and processing technologies

Наименование технологий улавливания	Социально-экономическая значимость	Научно-технический уровень	Ресурсное обеспечение	Перспективы использования для защиты окружающей среды
Технологии улавливания на основе этаноламинов	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды, 3 балла	Основные технологические процессы реализованы в промышленном масштабе, 3 балла	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа, 2 балла	Общая оценка 8 баллов. Наиболее перспективен при условии повышения экономичности способов транспортировки
Технологии на основе гидроокиси щелочных металлов	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды, 3 балла	Основные технологические процессы находятся на стадии реализации, 2 балла	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа, 2 балла	Общая оценка 7 баллов. Необходима промышленная реализация технологий и повышение экономичности способов транспортировки
Технологии на основе солей щелочных металлов	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды, 3 балла	Основные технологические процессы находятся на стадии реализации, 2 балла	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа, 2 балла	Общая оценка 7 баллов. Необходима промышленная реализация технологий и повышение экономичности способов транспортировки
Технологии на основе окиси кальция	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды, 3 балла	Основные технологические процессы находятся на стадии реализации, 2 балла	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа, 2 балла	Общая оценка 7 баллов. Необходима промышленная реализация технологий и повышение экономичности способов транспортировки
Технологии на основе водорослей	Весьма перспективен для защиты окружающей среды, 3 балла	Проводятся исследования по возможности использования для улавливания углекислого газа, 1 балл	Отсутствуют сведения по ресурсному обеспечению, 1 балл	Общая оценка 5 баллов. Перспективы могут быть определены при условии разработки воспроизводимой технологии
Технологии на основе закачивания в нефтяные скважины	Широкий спектр использования для защиты окружающей среды, 3 балла	Основные технологические процессы реализованы в промышленном масштабе, 3 балла	Решены проблемы экономически приемлемых способов улавливания углекислого газа, 2 балла	Общая оценка 8 баллов. Наиболее перспективен при условии повышения экономичности способов транспортировки

газа в действующие нефтяные месторождения. Пилотные проекты по формированию таких комплексных промышленных объединений могут быть развернуты в Самарской области и Республике Башкортостан.

В Самарской области расположен один из ведущих производителей аммиака, карбамида, аммиачной селитры корпорация «Тольяттиазот» — крупнейший производитель аммиака. Основные промышленные центры: Самара, Тольятти, Новокуйбышевск, Сызрань. Область является важным нефтедобывающим и нефтеперерабатывающим регионом. Ежегодная добыча нефти составляет около 10 млн т, природного газа — 300 млн м³.

На территории Республики Башкортостан размещено 19 нефтепроводов, 8 продуктопроводов, 11 газопроводов и большое количество технологических трубопроводов, эксплуатируется более 53 тыс. км магистральных и промысловых трубопроводов. По территории Республики Башкортостан перекачивается 35% российской нефти, 31% нефтепродуктов и 20% газа. Основными источниками выбросов углекислого газа в атмосферу являются: Новоуфимский НПЗ, АО «Уфанефтехим», АО «Сода» (г. Стерлитамак), «Салаватнефтеоргсинтез» (г. Салават) и Уфимский НПЗ.

Технологии поглощения и переработки углекислого газа на основе этаноламина имеют неплохие показатели, характеризующие социально-экономическую эффективность и научно-технический уровень основных технологических процессов. Эти технологии обладают широким спектром использования для защиты окружающей среды, так как имеют высокий уровень разработки промышленных технологических процессов и позволяют улавливать до 90% углекислого газа и перерабатывать его в карбамид и другие продукты. Однако транспортировка углекислого газа для переработки в карбамид, другие полезные продукты или для закачивания в нефтяные скважины требует значительных затрат. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является создание такой компрессорно-насосной установки, в которой возможно эффективное сочетание высокоэкономичных процессов получения жидкого углекислого газа и последующей транспортировки для использования в различных

целях. Создание экономичных способов получения жидкого углекислого газа и последующей транспортировки существенно повысит рентабельность большинства технологий улавливания и переработки углекислого газа для решения задач по защите окружающей среды.

Технологии на основе соединений щелочных и щелочноземельных металлов могут быть использованы для улавливания и переработки углекислого газа в целях защиты окружающей среды при условии их реализации в промышленном масштабе аналогично технологиям на основе этаноламина.

Представляет интерес технология поглощения углекислого газа на основе использования реакции фотосинтеза с помощью хлорофилла из различных водорослей. Данная технология может не только уменьшить содержание углекислого газа в атмосфере, но и очистить многие наши водоемы от переизбытка водорослей. Неконтролируемое распространение водорослей ухудшило состояние водной среды в Черном море, на Волге и на Байкале. Для успешного внедрения данной технологии необходимо объединение усилий биологов и химиков-технологов для разработки технологических решений, обеспечивающих надежное поглощение углекислого газа и последующее устойчиво воспроизводимое получение крахмала или биологического топлива.

Наличие особых эксплуатационных требований к средствам поглощения углекислого газа, пригодным для защиты населения в местах массового пребывания людей в ограниченном пространстве, вызывает необходимость изменения подходов к выбору сорбентов и способов поглощения. Для определения перспектив их использования предлагаются следующие показатели перспективности использования способов поглощения углекислого газа для защиты населения в местах массового пребывания людей:

- возможные технические решения реализации способов поглощения, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям;
- сорбционные характеристики поглотителей;
- стоимостные показатели сорбентов и оборудования.

Основные эксплуатационные требования, которые необходимо учитывать при выборе технических решений включают:

- поглощение углекислого газа без утраты их сорбционных свойств в диапазоне температур — от +40 до +5 °С;

- возможность непрерывной эксплуатации в течение 6—8 часов;

- производительность — от 20 м³/ч и более;

- срок эксплуатации — не менее 5 лет.

Средство относится к изделиям многократного циклического применения, поэтому желательна регенерация сорбента. Многим из этих требований соответствуют бытовые воздухоувлажнители и воздухоочистители.

Для оценки весомости каждого показателя предлагается использовать трехбалльную систему. Условия оценки показателей средств поглощения углекислого газа для защиты населения в местах массового пребывания людей по балльной системе приведены в табл. 3.

Результаты оценки возможных технических решений для реализации способов поглощения, их эксплуатационные особенности, сорбционные характеристики поглотителей, стоимостные показатели сорбентов и оборудования и рекомендации по применению приведены в табл. 4.

Способы на основе солей щелочных металлов представляют особый интерес, так как используемые поглотители (кальцинированная сода и поташ):

- имеют низкую стоимость, 50 и 60 руб/кг;

- широко распространены и устойчивы при хранении;

- водные растворы в концентрациях от 10 до 20% безопасны в эксплуатации;

- могут быть использованы для разработки средств, обеспечивающих длительное пребывание населения в помещениях инженерной защиты и местах массового пребывания людей.

Созданные на основе данного поглотителя мобильные установки для снижения концентрации углекислого газа в воздухе помещений могут найти применение в укрытиях гражданской обороны, школах, больницах, офисах, станциях метро, спортивных сооружениях и фитнес-залах.

Пакеты пластин бумажно-полимерной основы, инкапсулированные гидроксидами щелочных металлов, могут быть применены в укрытиях гражданской обороны, в которых используется приточная вентиляция или имеются вентиляторы, через

Таблица 3. Условия оценки показателей перспективности использования способов поглощения углекислого газа для защиты населения в местах массового пребывания людей по балльной системе

Table 3. Conditions for assessing indicators of the prospects for using methods of absorbing carbon dioxide to protect the population in places of mass stay of people according to the point system

Показатели перспектив использования способов поглощения	Условия получения высшей оценки 3 балла	Условия получения средней оценки 2 балла	Условия получения низшей оценки 1 балл
Технические решения, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям	Способ может быть реализован на основе бытовых воздухоувлажнителей и воздухоочистителей, возможна регенерация сорбента	Способ может быть реализован при подключении к системе вентиляции, возможность регенерации сорбента отсутствует	Отсутствуют сведения по возможности и перспективам использования для защиты населения
Сорбционные характеристики поглотителей	Сорбционная емкость составляет не менее 30—40% от массы поглотителя	Сорбционная емкость составляет не менее 20—25% от массы поглотителя	Сорбционная емкость составляет менее 15% от массы поглотителя
Стоимостные показатели сорбентов и оборудования	Стоимость поглотителя не превышает 200 руб/кг. Стоимость оборудования не превышает 20 тыс. руб.	Стоимость поглотителя не превышает 1000 руб/кг. Стоимость оборудования не превышает 100 тыс. руб.	Стоимость поглотителя превышает 1000 руб/кг. Стоимость оборудования превышает 100 тыс. руб.

Таблица 4. Результаты оценки возможных технических решений для реализации способов поглощения, их эксплуатационные особенности, сорбционные характеристики поглотителей, стоимостные показатели сорбентов и оборудования и рекомендации по применению

Table 4. Results of evaluation of possible technical solutions for implementation of absorption methods, their operational features, sorption characteristics of absorbers, cost indicators of sorbents and equipment, and recommendations for use

Наименование средств и способов поглощения	Возможные технические решения для реализации способов поглощения, их эксплуатационные особенности	Сорбционные характеристики поглотителей	Стоимостные показатели сорбентов и оборудования	Рекомендации по применению
Способы поглощения растворами соды или поташа	Могут быть реализованы на базе воздухоувлажнителя и воздухоочистителя типа Primera HUP-S3050-UVHFA. Сорбент регенерируют путем кипячения, 3 балла	Сорбционная емкость составляет порядка 30—40% от массы поглотителя, 3 балла	Стоимость соды и поташа составляет 50 и 60 руб/кг. Стоимость оборудования составит 10—20 тыс. руб., 3 балла	Общая оценка 9 баллов. Могут быть использованы для разработки средств поглощения углекислого газа в местах массового пребывания людей
Пакет пластин бумажно-полимерной основы, инкапсулированных гидроксидами щелочных металлов	Могут быть подключены в систему скруббера или к вентилятору, который подает приточный воздух, используется для разовой эксплуатации, 2 балла	Сорбционная емкость составляет порядка 35—45% от массы поглотителя, 3 балла	Стоимость гидроксидов натрия и калия составляет 150 и 200 руб/кг. Стоимость оборудования составит 20 тыс. руб., 3 балла	Общая оценка 8 баллов. Могут найти применение в укрытиях гражданской обороны
Регенеративный патрон РП-100 на основе известкового поглотителя ХП-И	Регенеративный патрон РП-100 предназначен для убежищ вместимостью до 300 человек, однако используется для разовой эксплуатации, 2 балла	Сорбционная емкость составляет порядка 20—25% от массы поглотителя, 2 балла	Стоимость известкового поглотителя марки ХП-И составляет 480 руб/кг. Стоимость РП — 1000 тыс. руб., 2 балла	Общая оценка 6 баллов. Используется в убежищах ГО с III режимом вентиляции
Регенерируемый абсорбер на основе активированного угля, пропитанного раствором диэтаноламина	Абсорбер может регенерировать сорбент и обладает дополнительными функциями, улучшающими качество воздуха, 3 балла	Сорбционная емкость составляет порядка 50—60% от массы поглотителя, 3 балла	Стоимость диэтаноламина составляет 500 руб/кг. Стоимость абсорбера превышает 100 тыс. руб., 1 балл	Общая оценка 7 баллов. Может быть использован в помещениях органов управления ГО

которые подается воздух. Данные пластины могут быть использованы для разовой эксплуатации.

В настоящее время для целей защиты населения в основном используются известковые поглотители марки ХП-И на основе гидроксида кальция в виде зерен диаметром от 5,50 до 6,50 мм в различных регенеративных патронах. Для всех известных на сегодня марок известковых поглотителей сорбционная емкость составляет примерно 20—25%

от массы поглотителя, что значительно ниже показателей сорбции поглотителей на основе соединений калия и натрия. Эти патроны предназначены для убежищ гражданской обороны с III режимом вентиляции и вместимостью до 300 человек. Эти средства, как и пакеты пластин, могут использоваться для разовой эксплуатации.

Предлагаемый сотрудниками Троицкого института инновационных и термоядерных исследований

[20] регенерируемый абсорбер на основе активированного угля, пропитанного раствором диэтанолламина, может регенерировать сорбент и обладает дополнительными функциями, улучшающими качество воздуха. Для регенерации диэтанолламина предлагается прокачивать через него горячий воздух, содержащий значительное количество кислорода (до 22%). Однако, как показывает опыт реализации данной технологии в производстве, кислород окисляет диэтанолламин и тем самым снижает возможность регенерации сорбента. Поэтому в технологических процессах для обеспечения эффективности регенерации диэтанолламина снижают содержание кислорода в газовой смеси до 3%. Учитывая относительно высокую стоимость абсорбера и его возможности по улучшению качества воздуха, данный образец можно использовать в помещениях органов управления ГО.

Заключение

Представленный в статье методический подход, основанный на оценке социально-экономической значимости, научно-технического уровня и ресурсного обеспечения, позволил определить перспективы использования современных технологий улавливания и переработки углекислого газа для защиты окружающей среды и защиты населения.

Совершенствование технологий улавливания и переработки углекислого газа является одним из приоритетных направлений деятельности в рамках борьбы с парниковыми газами, которая, помимо влияния на климат, может принести определенную пользу для экономики страны, так как продукты переработки углекислого газа смогут найти широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях экономики.

Важнейшую роль в определении дальнейших перспектив развития технологий улавливания и переработки углекислого газа в России будут играть факторы успешного преодоления тотальной экономической войны со стороны США и Евросоюза. В связи с этим преимущественное внедрение должны получить те технологические решения (проекты), которые используют отечественные разработки и собственное либо поставляемое из дружественных стран производственное оборудование.

Литература [References]

1. Зимов С. Дремлющая угроза, о плейстоценовых парках и не вечной мерзлоте / Российская газета №245(8596), 2021 [Zimov S. Dormant threat, about Pleistocene parks and non-permafrost / Rossiyskaya Gazeta No. 245 (8596), 2021, (In Russ.)]
2. Стратегический глобальный прогноз 2030. Расширенный вариант / Под ред. акад. А. А. Дынкина. ИМЭМО РАН. М.: Магистр, 2011. 480 с. [Strategic Global Forecast 2030. Expanded version / Ed. Academician A. A. Dynkin. IMEMO RAN. M.: Master, 2011. 480 p., (In Russ.)]
3. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России: экспертный доклад / Под ред. А. Ю. Иванова, Н. Д. Дурманова (рук-ли авт. кол.). М. П. Орлов, К. В. Пиксендеев, Ю. Е. Ровнов и др. Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с. [The battle for climate: carbon agriculture as the headquarters of Russia: an expert report / Edited by A. Yu. Ivanov, N. D. Durmanov (heads of the team of authors.); M. P. Orlov, K. V. Pixendeev, Yu. E. Rovnov et al. Nats. un-t "Higher School of Economics". M.: Ed. House of the Higher School of Economics, 2021. 120 p., (In Russ.)]
4. Быховская М. С., Гинзбург С. Л., Хализова О. Д. Методы определения вредных веществ в воздухе. М. ЭНАС, 2003. 98 с. [Bykhovskaya M.S., Ginzburg S.L., Khalizova O.D. Methods for determining harmful substances in the air. M. ENAS, 2003, 98 p., (In Russ.)]
5. Гурина И. В. Безопасный уровень углекислого газа требует ревизии // Экологический Вестник России. 2008. № 10. С. 14—22. [Gurina I. V. Safe level of carbon dioxide requires revision // Ecological Bulletin of Russia. 2008;(10):14-22, (In Russ.)]
6. Школьный экологический мониторинг: Учеб. пособие для учителей и учащихся / Под ред. Т. Я. Ашихминой. М.: Агар: Рандеву-АМ. 2000. 385 с. [School environmental monitoring: Educational manual for teachers and students / Ed. T. Ya. Ashikhmina. M.: Agar: Rendezvous-AM. 2000. 385 p., (In Russ.)].
7. Беловешкин А. Углекислый газ в помещении. URL: <http://www.beloveshkin.com/2015/04/uglekislyj-gaz-v-pomeshhenii.html> (Дата обращения: 20.01.2020). [Beloveshkin A. Indoor carbon dioxide. URL: <http://www.beloveshkin.com/2015/04/uglekislyj-gaz-v-pomeshhenii.html> (Accessed: 20.01.2020)].

8. Пашковский Д.А., Быков А.А., Кондратьев-Фирсов В.М. Некоторые вопросы повышения эффективности управления рисками устойчивого развития в вертикально интегрированных холдингах // Газовая промышленность. 2022. № 6(834). С. 96—105. [Pashkovsky D.A., Bykov A.A., Kondratiev-Firsov V.M. Some questions on improving the effectiveness of sustainability risk management in vertically integrated companies // GAS Industry of Russia. 2022;(6(834)):96-105, (In Russ.)]
9. Пашковский Д.А., Быков А.А., Кондратьев-Фирсов В.М. О современной ситуации в управлении климатическими и ESG-рисками // Газовая промышленность. 2022. № 8(836). С. 88—94 [Pashkovsky D.A., Bykov A.A., Kondratiev-Firsov V.M. On the current situation with climatic and EGS risk management // GAS Industry of Russia. 2022;(8(836)):88-94, (In Russ.)]
10. Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс. М.: Научный консультант. 2017. 82 с. [Fyodorov B.G. Russian carbon balance. M.: Scientific consultant. 2017. 82 p., (In Russ.)]
11. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. и др. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление. М.: Машиностроение-1. 2007. 156 с. [Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretzky S.I., et al. Next generation regenerative products: technology and hardware design. M.: Mechanical Engineering-1. 2007. 156 p., (In Russ.)]
12. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В. и др. Кинетика хемосорбции диоксида углерода и выделения кислорода в статических условиях нанокристаллическим KO_2 , осажденным на стекловолоконистой матрице // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 6. С. 919—923. [Gladysheva T.V., Gladyshev N.F., et al. Kinetics of carbon dioxide chemisorption and oxygen release under static conditions by nanocrystalline KO_2 deposited on a fiberglass matrix // Zhurnal Prikladnoi Khimii. 2015;88(6):919-923, (In Russ.)]
13. Известковые поглотители нового поколения: монография / Н.Ф. Гладышев [и др.]. Москва: Спектр, 2012. 135 с. [Calcareous absorbers of a new generation: monograph / N.F. Gladyshev [et al]. Moscow: Spectrum, 2012. 135 p., (In Russ.)]
14. Афанасьев С.В., Сергеев С.П., Волков В.А. Современные направления производства и переработки диоксида углерода // Химическая техника. 2016. № 11. С. 30—33. [Afanasyev S.V., Sergeev S.P., Volkov V.A. Modern directions of carbon dioxide production and processing // Chemical engineering. 2016;(11):30-33, (In Russ.)]
15. Вольнов И.И. Перекисные соединения щелочных металлов. М.: Наука, 1980. 160 с. [Volnov I.I. Peroxide compounds of alkali metals. M.: Science, 1980. 160 p., (In Russ.)]
16. Environmental and value creation. CO_2 for EOR on the Norwegian Shelf — A case Study. Bellona report, 2015.
17. Марков С.А. Использование водорослей для получения биотоплива и удаления углекислого газа из атмосферы // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 2(70). С. 83—90. [Markov S.A. Potential of using microalgae for biofuel production and CO_2 removal from atmosphere // International Journal of Hydrogen Energy; Solar Energy. 2009;(2(70)):83-90, (In Russ.)]
18. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Новые технологии извлечения CO_2 из дымовых газов тепловых станций // Технические газы. 2011. № 2. С.32—42. [Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V. New technologies of extraction CO_2 from smoke gases of thermoelectric power stations // Technical gases. 2011;(2):32-42, (In Russ.)]
19. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузюмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Сов. Радио. 1975. 400 с. [Chuev Yu.V., Mikhailov Yu.B., Kuzomin V.I. Forecasting of quantitative characteristics of processes. M.: Sov. Radio. 1975. 400 p., (In Russ.)]
20. Милов В.В., Миронов А.В. Иванов Д.А. Регенерируемый абсорбер углекислого газа, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Росатом. 2020. [Mirov V.V., Mironov A.V., Ivanov D.A. Regenerated carbon dioxide absorber, JSC “SSC RF TRINITY”. Rosatom. 2020, (In Russ.)]

Сведения об авторах

Малышев Владлен Платонович: доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий)

Количество публикаций: более 316

Область научных интересов: проблемы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях

Контактная информация:

Адрес: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7

Vlad1936.malyshev@yandex.ru

Виноградов Олег Владимирович: старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий)

Количество публикаций: более 40

Область научных интересов: проблемы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях

SPIN-код: 3056-0611

AuthorID: 1038780

Контактная информация

Адрес: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7

v1970ov@mail.ru

Родионов Игорь Александрович: доцент, научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий)

Количество публикаций: 3

Область научных интересов: проблемы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях

SPIN-код: 3506-4636

AuthorID: 1130203

Контактная информация:

Адрес: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7

Goha-5@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 28.08.2022

Одобрена после рецензирования: 30.09.2022

Принята к публикации: 21.10.2022

Дата публикации: 29.12.2022

The article was submitted: 28.08.2022

Approved after reviewing: 30.09.2022

Accepted for publication: 21.10.2022

Date of publication: 29.12.2022