

Обзорная статья
УДК 622.257.12
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.1>

ТАМПОНАЖНЫЙ РАСТВОР С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂)

Альберт Айратович Зялятдинов^{1*},
Екатерина Алексеевна Егорова²,
Лейсан Ринасовна Тимергалиева³,
Танзиля Мунировна Фаздалова⁴

- ^{1, 2, 3, 4} Альметьевский государственный технологический университет
(д. 186а, ул. Советская, Альметьевск, 423450, Российская Федерация)
¹ zalyatdinovaa@agni-rt.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8466-9013>
² katusha.egorova.04@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9324-7089>
³ t1mleysan1@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-4549-530X>
⁴ fazdalovat@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-2158-5218>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Изменение климата наблюдается во всех регионах планеты, причем этот процесс становится все более интенсивным, а некоторые из возникших тенденций уже необратимы, во всяком случае, на данном этапе. Однако в силах человечества ограничить масштабы изменения климата, существенно сократив выбросы в атмосферу вредных веществ, в том числе парниковых газов, можно в короткие сроки значительно улучшить качество воздуха и стабилизировать глобальную температуру. Объектом исследования является процесс закачки углекислого газа в цемент, применяемый для тампонажа нефтяных и газовых скважин. Исследование построено на анализе актуальности проекта декарбонизации в нефтегазовой отрасли, существующих технологий цементирования скважин, а также методов производства бетона с использованием углекислого газа. В ходе работы определены две гипотезы закачки углекислого газа в цемент, основанные на базовом методе цементирования: смешивание CO₂, воды и цемента по отдельности и цемента с водой сразу с CO₂. По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что разработка и внедрение данных технологий имеет потенциал для существенного снижения выбросов парниковых газов, что способствует достижению целей устойчивого развития.

Ключевые слова:

цементирование скважин, тампонажный раствор, углеродные технологии, CO₂, устойчивое развитие, зеленые технологии, бетон, изменение климата, чистые технологии, цемент, экологичное строительство
Зялятдинов А. А., Егорова Е. А., Тимергалиева Л. Р., Фаздалова Т. М. Тампонажный раствор с добавлением углекислого газа (CO₂) // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 3. С. 9–24. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.07.2024;
одобрена после рецензирования 15.09.2024;
принята к публикации 20.09.2024.

1.6.11. Geology, Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields (Geological and Mineralogical Sciences)

Review article

Grouting solution with carbon dioxide (CO₂)

Albert A. Zalyatdinov^{1*},
Ekaterina A. Egorova²,
Leysan R. Timergalieva³,
Tanzilya M. Fazdalova⁴

^{1, 2, 3, 4} Almet'yevsk State Technological University (186a, Sovetskaya St., Almet'yevsk, 423450, Russian Federation)

¹ zalyatdinovaa@agni-rt.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8466-9013>

² katusha.egorova.04@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9324-7089>

³ t1mleysan1@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-4549-530X>

⁴ fazdalovat@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-2158-5218>

* Corresponding author

Abstract.

Climate change is observed in all regions of the planet. This process is becoming more intense, and some of the emerging trends are already irreversible, at least at this stage. However, it is within the power of humanity to limit the scale of climate change, significantly reducing emissions of harmful substances into the atmosphere, including greenhouse gases, it is possible to considerably improve air quality and stabilize global temperatures in a short time. The object of the study is the process of pumping carbon dioxide into cement used for grouting oil and gas wells. The study is based on the analysis of the relevance of the decarbonization project in the oil and gas industry, existing well cementing technologies, as well as methods of concrete production with carbon dioxide. In the course of the work, two hypotheses for injecting carbon dioxide into cement were identified. They use the basic method of cementing: mixing CO₂, water and cement separately and cement with water immediately with CO₂. Based on the results of the study, it can be concluded that the development and implementation of these technologies has the potential to significantly reduce greenhouse gas emissions, which contributes to the achievement of sustainable development goals.

Keywords:

well cementing, grouting solution, carbontech, CO₂, sustainability, Greentech, concrete, climate change, cleantech, cement, greenbuildings

For citation:

Zalyatdinov AA, Egorova EA, Timergalieva LR, Fazdalova TM. Grouting solution with carbon dioxide (CO₂). Science. Innovations. Technologies. 2024;(3):9-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.1>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 09.07.2024;
approved after reviewing 15.09.2024;
accepted for publication 20.09.2024.

Введение

Цемент – вяжущее вещество, которое выступает в качестве основного компонента бетона, строительной стяжки и раствора, подходящее для широкого применения. Это вещество является одним из наиболее распространенных строительных материалов во всём мире. Ежегодно в мире выпускают более 4 млрд тонн цемента, только на его производство приходится 8 % мирового объема выбросов углекислого газа (CO₂). [3] Загрязнение атмосферы при производстве цемента происходит при обжиге известняка, т. е. сырье нагревают в печах с температурой выше 1400°C, в результате чего углерод, который содержится в породе, соединяется с кислородом, образуя CO₂ [4].

Топливные источники используются для обогрева цементных печей, приводя к выбросам диоксида углерода. Для транспортировки сырья и готовой продукции используются автотранспортные средства, работающие на топливе, что дополнительно способствует выбросам CO₂ в атмосферу. Увеличение содержания углекислого газа в глобальном масштабе ведёт к повышению газоизоляции во всем мире, вызывая глобальное потепление. Это приводит к изменению среднего уровня океанов, изменению климатических условий и режима осадков.

Ученые всего мира работают над способами сокращения выбросов этого газа и замедления процесса изменения климата. Например, в процессе изготовления строительного бетона, в который добавляется углекислый газ, тем самым увеличивая прочность.

Материалы и методы исследований

В качестве информационных источников использованы данные из научных публикаций и патентов, информации от ведущих компаний (CarbonCure Technologies, Solidia Technologies и др.), занимающихся разработкой технологий улавливания и хранения CO₂, применяемые в производстве бетона, а также результаты исследований, проводимых в лабораторно-исследовательском комплексе АГТУ-ВШН.

Результаты исследований и их обсуждение

Технология цементирования скважин. Цементирование скважины – это важный этап, который проводится после завершения бурения нефтяных и газовых скважин. Эта технология позволяет создать прочную и надежную защиту стенок скважины, предотвращая проникновение нефти, газа или воды из соседних пластов. Кроме того, цементирование также служит основой для установки обсадных колонн и обеспечивает стабильность и надежность работы скважины на протяжении всего ее срока эксплуатации.

Одной из ключевых задач цементирования является создание герметичного затвердевшего цементного кольца между стенками скважины и обсадной колонной. Для достижения этой цели используется тампонажный раствор.

Тампонажный раствор – это смесь, приготовленная на основе порошка цемента, воды и различных добавок. С течением времени смесь затвердевает и образует тампонажный камень или загустевает, упрочняется, оставаясь вязкой или вязко-пластичной системой. Правильное составление раствора, а также правильная техника его закачки играют решающую роль в успешном выполнении операции по цементированию скважины.

Процесс цементирования скважин состоит из последовательных этапов: для начала в смесительных машинах готовится тампонажная цементная смесь с необходимым водоцементным соотношением и количеством добавок. После этого готовый к заливке раствор подается в скважину, и запускается процедура его вытеснения в пространство между трубами и стенами скважины. Схема представлена по рисунку 1. По окончанию ожидается период полного застывания. Затем производится контроль качества.

Цементирование скважины имеет несколько целей. Прежде всего, оно обеспечивает герметичность скважины, предотвращает проникновение жидкости и газа из одного пласта в другой, а также обеспечивает защиту оборудования от коррозии и сохранение целостности скважины на протяжении всего периода эксплуатации.

Технология производства бетона с углекислым газом. Улавливание и хранение CO_2 – это новая и перспективная технология, пока ещё не внедренная в промышленном масштабе производства бетона, но имеющая большой потенциал, например:

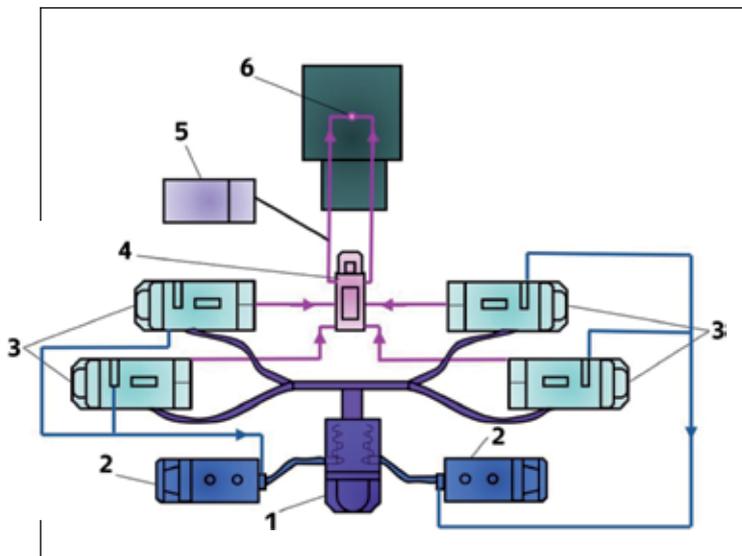


Рис. 1.

Схема цементирования скважин. 1 – установка осреднительная; 2 – смесительная машина; 3 – цементировочный агрегат (емкости с водой и цементом); 4 – блок манифольда; 5 – станция контроля цементирования; 6 – цементировочная головка.

Fig. 1. The scheme of cementing wells. 1 – averaging unit; 2 – mixing machine; 3 – cementing unit (containers with water and cement); 4 – manifold block; 5 – cementing control station; 6 – cementing head.

Источник:
Source:

составлено авторами.
compiled by the authors.

- Канадская компания CarbonCure Technologies разработала инновационную технологию, позволяющую выпускать бетон из диоксида углерода. За счет связывания углекислого газа, применение данной технологии делает возможным снизить вредные выбросы и в то же время производить новейшие и более качественные строительные материалы [5];
- Команда междисциплинарных исследователей из Лос-Анджелеса (США) работает над уникальным решением. В их планах – создание замкнутого процесса, включающего захват углерода на трубах электростанции.

тростанций и его использование при создании нового строительного материала – углекислбетона CO₂NCRETE (англ. «concrete» – бетон) – с использованием технологий 3D-печати [6];

- Оригинальную технологию предложили инженеры из Solidia Technologies (США) – использование CO₂ при производстве материалов с новыми свойствами, например, быстросхватывающихся бетонов. Этот метод позволяет использовать те же производственные линии, что и при приготовлении бетона из портландцемента, а уменьшение выбросов диоксида углерода снижается на 30% [7, 8];
- Сотрудники американского Университета Пердью сумели увеличить способность бетона поглощать углекислый газ из атмосферы. Они предложили смешивать диоксид титана с цементным раствором. Диоксид титана уменьшает размер молекул гидроксида кальция, что позволяет увеличить объем поглощаемого углекислого газа. Оказалось, что добавление диоксида титана увеличило абсорбцию бетона почти в два раза [9];
- В новом исследовании ученые из Токийского университета (Япония) и сотрудники других исследовательских институтов разработали процесс, который снижает воздействие бетона на окружающую среду. Процесс начинается с приготовления раствора бикарбоната кальция, состоящего из известнякового порошка, а также деионизированной воды и углекислого газа. В итоге получается блок для строительства из нового материала, который команда назвала карбонатным кальциевым бетоном [10].

На данный момент в лабораторно-исследовательском комплексе АГТУ-ВШН проводятся эксперименты по закачке углекислого газа в бетон [1, 2]. Исследования выявили, что при перемешивании бетона с CO₂ под давлением в 10 атмосфер обеспечи-

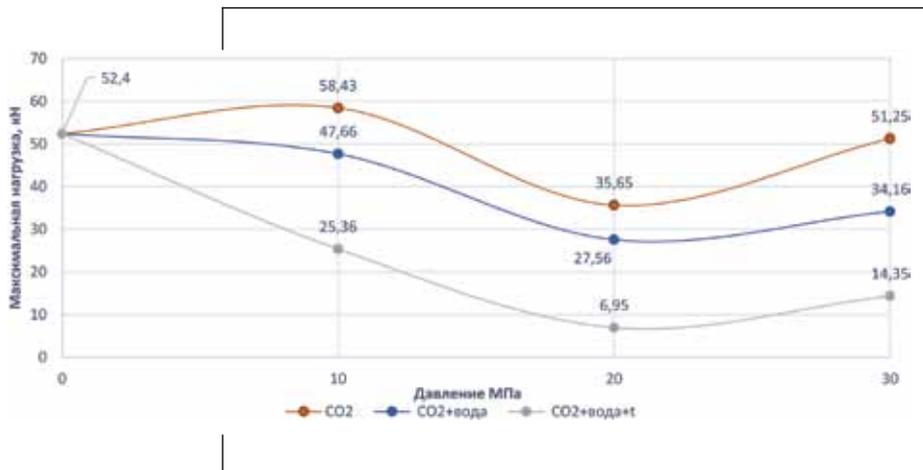


Рис. 2. Результаты испытаний образцов на сжатие.

Fig. 2. Results of compression testing of samples.

Источник:

составлено по данным [1, 2].

Source:

compiled according to data [1, 2].

вает максимальное улучшение прочности. Однако при более высоких давлениях, 20 атмосфер и выше, прочностные показатели бетона начинают ухудшаться. Результаты экспериментов по влиянию давления CO₂ на прочность бетона представлены на рисунках 2 и 3. Предлагаемый метод обработки бетонных изделий с использованием углекислого газа позволяет повысить их прочностные характеристики по сравнению с традиционными технологиями. Дальнейшее изучение оптимальных параметров давления CO₂ позволит наиболее эффективно реализовать данный метод в производстве.

Новый процесс считается значимым на пути к снижению воздействия бетона на окружающую среду, но требует дальнейшей работы над повышением прочности. Улавливание и использование CO₂ в производстве бетона демонстрирует потенциал для сокращения выбросов парниковых газов и создания экологически чистых строительных материалов.

Предлагаемая гипотеза. На основе ранее рассмотренных технологий, предлагается 2 варианта использования углекислого газа в тампонажном растворе для внедрения на производстве.

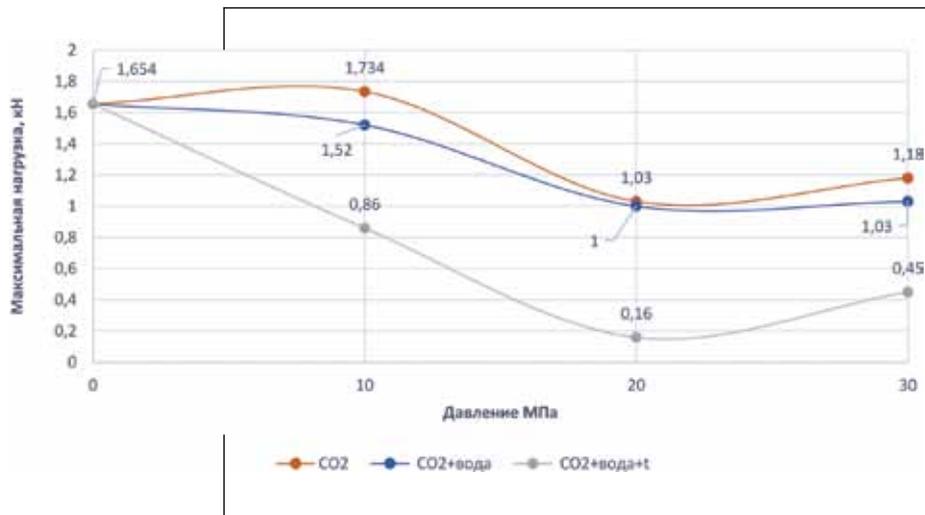


Рис. 3. Результаты испытаний образцов на изгиб.

Fig. 3. Results of bending tests of samples.

Источник:

составлено по данным [1, 2].

Source:

compiled according to data [1, 2].

Первый вариант предполагает смешивание трех основных компонентов – углекислого газа, воды и цемента – непосредственно на производственной площадке. Схема данного процесса представлена на рисунке 4.

Преимущество этого подхода заключается в том, что приготовление раствора непосредственно на месте работ позволяет более точно контролировать пропорции компонентов и обеспечивает надлежащее качество смеси. Доставка ингредиентов по отдельности дает большую гибкость в управлении процессом и возможность оперативно реагировать на изменяющиеся условия на объекте. Это повышает надежность и эффективность всей операции по креплению скважины.

Второй вариант технологии основывается на базовом варианте цементирования скважины. Отличается тем, что емкость с водой заменяется на воду, изначально насыщенную углекислым газом. Смешивание воды и углекислого газа является химическим процессом, в ходе которого CO_2 растворяется в воде. Это позволяет ис-

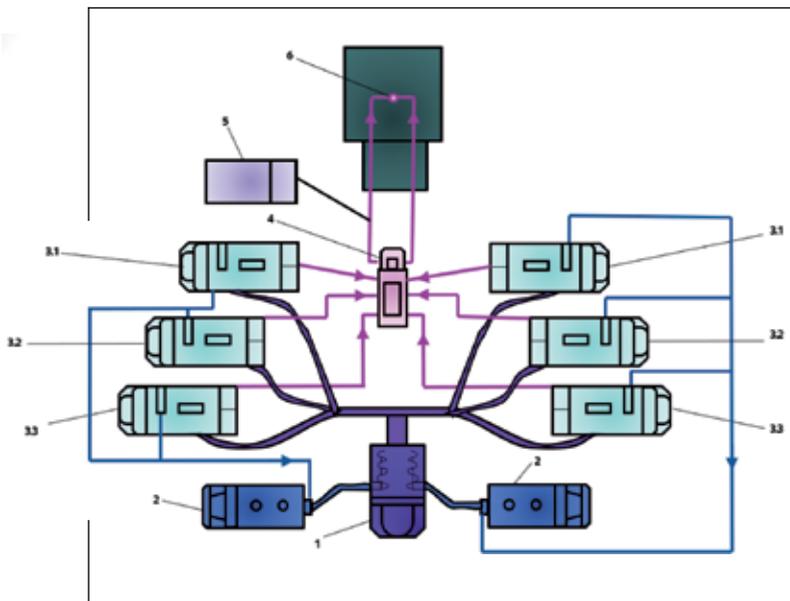


Рис. 4.

Схема приготовления тампонажного раствора с углекислым газом, воды и цемента. 1 – установка осреднительная; 2 – смесительная машина; 3.1 – емкость с углекислым газом; 3.2 – емкость с водой; 3.3 – емкость с цементом; 4 – блок манифольда; 5 – станция контроля цементирования; 6 – цементирующая головка.

Fig. 4. The scheme of preparation of a grouting solution with carbon dioxide, water and cement. 1 – averaging unit; 2 – mixing machine; 3.1 – container with carbon dioxide; 3.2 – container with water; 3.3 – container with cement; 4 – manifold block; 5 – cementing control station; 6 – cementing head.

Источник:
Source:

составлено авторами.
compiled by the authors.

пользовать данную технологию более эффективно по сравнению с первым вариантом, когда вода и CO₂ закачивались по отдельности. Преимущество второго варианта заключается в том, что мы полностью растворяем углекислый газ в воде и минимизируем риск образования пустот в скважине [11].

Предложенные гипотезы хоть и имеют ряд преимуществ, но также обладают недостатком, который необходимо учитывать при

внедрении в производство. Этим основным минусом является коррозия труб. Суть процесса заключается в следующем: при смешивании воды и углекислого газа происходит химическая реакция, в ходе которой углекислый газ не только растворяется в воде, но и образует карбоновую кислоту. Данная кислота в свою очередь оказывает агрессивное воздействие на традиционные железные трубы, вызывая их ускоренную коррозию и разрушение.

Для решения этой проблемы предлагается использование в качестве альтернативы не стандартные железные трубы, а стеклопластиковые. Стеклопластик является более устойчивым к воздействию агрессивной карбоновой кислоты и будет лучше противостоять процессам коррозии. Это позволит значительно продлить срок службы обсадной колонны и снизить затраты на их ремонт в процессе эксплуатации [12].

Заключение

Процесс внедрения углекислого газа в изготовление тампонажного раствора представляет собой технологию, где углекислый газ добавляется к обычному раствору, что может привести к повышению прочности и улучшению других характеристик продукта.

В ходе изучения зарубежных исследований, в частности, экспериментов, проведенных группы ученых в Канаде, США и Японии, было выявлено, что закачка углекислого газа положительно влияет на параметры цемента. Эти результаты подтверждаются и экспериментами, проведенными в лабораторно-исследовательском комплексе Альметьевского государственного технологического университета, а именно показатели предела прочности образцов цемента с добавлением углекислого газа на сжатие и изгиб.

Два рассмотренных варианта – добавление углекислого газа и воды напрямую в цемент и смешивание углекислого газа с водой для последующего добавления – имеют свои плюсы и минусы. Однако в ходе сравнения можно увидеть, что второй вариант, смешивание углекислого газа с водой, может быть более эффективным. Это может быть связано с лучшим равномерным распределением газа в растворе и, как следствие, более высокой прочностью.

Для получения более точных результатов и ответа на вопрос об эффективности данного процесса необходимо провести дополнительные лабораторные исследования и дальнейшие опытно-промышленные работы.

Осознавая актуальность экологических проблем, важно подчеркнуть, что внедрение технологии добавления углекислого газа в цемент, хотя и не получило широкого распространения в России, обладает огромным потенциалом для снижения выбросов CO₂ и уменьшения парниковых эффектов.

Мы считаем, что популяризация этой технологии в России станет важным шагом на пути к более экологичному и устойчивому производству. Дальнейшие исследования и разработка новых, более эффективных методов внедрения углекислого газа в производство тампонажных растворов, безусловно, будут способствовать развитию экологически чистых технологий в нефтегазовой отрасли.

Список источников

1. Залятдинов А. А., Садреева Р. Х., Закирова Р. Ф. Утилизация углекислого газа при эксплуатации бетоноперемешивающего устройства под давлением // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 3 (143). С. 164–172.
2. Залятдинов А. А., Садреева Р. Х., Закирова Р. Ф. Исследование альтернативных методов применения диоксида углерода при производстве бетона // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 165–173.
3. Lehne J., Preston F. Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. 2018. 122 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf> (дата обращения: 14.05.2024).
4. Ахметова В. Р., Смирнов О. В. Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы // Башкирский химический журнал. 2020. № 3. С. 103–115. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ulavlivanie-i-hranenie-dioksida-ugleroda-problemy-i-perspektivy> (дата обращения: 14.05.2024).

5. Вакуров А. Е., Абросимов И. П. Описание и преимущества технологии производства бетона из диоксида углерода в строительстве // Бюллетень науки и практики. 2018. № 8. С. 148–153. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opisanie-i-preimuschestva-tehnologii-proizvodstva-betona-iz-dioksida-ugleroda-v-stroitelstve> (дата обращения: 14.05.2024).
6. Global Construction Review (GCR). Carbon Upcycling: Turning CO₂ into a New, Sustainable CO₂NCRETE, Interdisciplinary research team at UCLA discovers a game-changing technology to capture and repurpose carbon dioxide. [Electronic resource]. URL: <https://www.globalconstructionreview.com> (accessed: 14.05.2024).
7. α-БЕТОН, группа компаний «АЛЬФА». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.a-beton.com/> (дата обращения: 18.05.2024).
8. Дмитриева Е. А., Кузнецов А. В., Потапова Е. Н. Влияние термоактивированных сульфатом алюминия глин на прочность портландцемента // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXV, Y78 №4 (239). М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2021. С. 30–33.
9. UCLA Luskin School of Public Affairs. Carbon Upcycling: Turning CO₂ into a New, Sustainable CO₂NCRETE. [Electronic resource]. URL: <https://luskin.ucla.edu/> (accessed: 18.05.2024).
10. Science Direct. Construction and Building Materials. Modification of CO₂ capture and pore structure of hardened cement paste made with nano-TiO₂ addition: Influence of water-to-cement ratio and CO₂ exposure age. [Electronic resource]. URL: <https://luskin.ucla.edu/> (accessed: 18.05.2024).
11. Любомирский Н. В., Бахтин А. С., Бахтина Т. А., Николаенко Е. Ю., Николаенко В. В. Влияние гидрокарбоната кальция на структурообразование и свойства материалов на основе извести карбонизационного твердения // МНИЖ. 2016. № 11–4 (53). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gidrokarbonata-kaltsiya-na-strukturoobrazovanie-i-svoystva-materialov-na-osnove-izvesti-karbonizatsionnogo-tverdeniya> (дата обращения: 29.05.2024).
12. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information. Investigation of Erosion/Corrosion Behavior

of GRP under Harsh Operating Conditions. [Electronic resource]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> (accessed: 29.05.2024).

References

1. Zalyatdinov AA, Sadreeva RH, Zakirova RF. Carbon dioxide utilization of by pressurized concrete mixer. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023;3(143):164-172. (In Russ.).
2. Zalyatdinov AA, Sadreeva RH, Zakirova RF. Investigation of alternative methods of using carbon dioxide in the production of concrete. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023;2(142):165-173. (In Russ.).
3. Lene J, Preston F. Introduction of innovations in the production of low-carbon cement and concrete. 2018. 122 p. Available from: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf> [Accessed 14 May 2024].
4. Akhmetova VR, Smirnov OV. Carbon dioxide capture and storage – problems and perspectives. Bashkir chemical journal. 2020;(3):103-115. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ulavlivanie-i-hranenie-dioksida-ugleroda-problemy-i-perspektivy> [Accessed 14 May 2024]. (In Russ.).
5. Vak AE, Abrosimov IP. Description and use of technologies for the production of concrete from carbon dioxide in the state. Bulletin of Science and Practice. 2018;8:148-153. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/opisanie-i-preimuschestva-tehnologii-proizvodstva-betona-iz-dioksida-ugleroda-v-stroitelstve> [Accessed 14 May 2024]. (In Russ.).
6. Global Construction Review (GCR). Carbon Dioxide Recycling: Converting CO₂ into new, environmentally friendly CO₂ CONCRETE An interdisciplinary research group at the University of California, Los Angeles has discovered a fundamentally new technology for carbon dioxide capture and reuse. Available from: <https://www.globalconstructionreview.com> [Accessed 14 May 2024].
7. α-CONCRETE, ALFA group of companies. Available from: <https://www.a-beton.com/> [Accessed 18 May 2024]. (In Russ.).
8. Dmitrieva EA, Kuznetsov V, Potapova EN. Influence of thermally activated clays with aluminum sulfate on the strength of

- Portland cement. Successes in chemistry and chemical technology: collection of scientific tr. Vol. XXXV, Y78 No. 4 (239). Moscow: D. I. Mendeleev Russian Technical University; 2021. P. 30-33. (In Russ.).
9. Luskin School of Public Relations at the University of California at Los Angeles. Carbon Upcycling: Turning CO₂ into a New, Sustainable CO₂NCRETE. Available from: <https://luskin.ucla.edu/> [Accessed 18 May 2024].
 10. Science Direct. Construction and building materials. Modification of CO₂ capture and pore structure of hardened cement paste made with the addition of nano-TiO₂: the effect of the ratio of water and cement and the duration of exposure to CO₂. Available from: <https://luskin.ucla.edu/> [Accessed 18 May 2024].
 11. Lyubomirsky NV, Bakhtin AS, Bakhtina TA, Nikolaenko EYu, Nikolaenko VV. The effect of calcium bicarbonate on structure and properties of materials based on lime carbonizing hardening. MNIZH. 2016. No. 11-4 (53). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gidrokarbonata-kaltsiya-na-strukturoobrazovanie-i-svoystva-materialov-na-osnove-izvesti-karbonizatsionnogo-tverdeniya> [Accessed 29 May 2024]. (In Russ.).
 12. National Medical Library. National Center for Biotechnological Information. Investigation of Erosion/Corrosion Behavior of GRP under Harsh Operating Conditions. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> [Accessed 29 May 2024].

Информация об авторах

Альберт Айратович Зялятинов — кандидат технических наук, начальник Центра научно-технических исследований, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Альметьевского государственного технологического университета, Researcher ID: JYQ-3937-2024.

Екатерина Алексеевна Егорова — студент Альметьевского государственного технологического университета, Researcher ID: KVB-1993-2024.

Лейсан Ринасовна Тимергалиева — студент Альметьевского государственного технологического университета, Researcher ID: KVB-1934-2024.

Танзиля Мунировна Фаздалова — студент Альметьевского государственного технологического университета, Researcher ID: KVB-1979-2024.

Вклад авторов

Альберт Айратович Залятдинов. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Екатерина Алексеевна Егорова. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне. Проведение сравнительного анализа результатов эксперимента с данными зарубежных ученых.

Лейсан Ринасовна Тимергалиева. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне. Составление списка литературы и подготовка иллюстраций.

Танзиля Мунировна Фаздалова. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне. Сбор информации по теме исследования, включая поиск и анализ научных публикаций, обзоры рынка и данные о существующих технологиях.

Information about the authors

Albert A. Zalyatdinov — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Center for Scientific and Technical Research, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Drilling, Almet'yevsk State Technological University, Researcher ID: KVB-1993-2024.

Ekaterina A. Egorova — student, Almet'yevsk State Technological University, Researcher ID: KVB-1993-2024.

Leysan R. Timergalieva — student, Almet'yevsk State Technological University, Researcher ID: KVB-1934-2024.

Tanzilya M. Fazdalova — student, Almet'yevsk State Technological University, Researcher ID: KVB-1979-2024.

Contribution of the authors

Albert A. Zalyatdinov. Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained. The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Ekaterina A. Egorova. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design. Conducting a comparative analysis of the results of the experiment with the data of foreign scientists.

Leysan R. Timergalieva. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design. Compiling a list of references and preparing illustrations.

Tanzilya M. Fazdalova. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design. Collecting information on the research topic, including the search and analysis of scientific publications, market reviews and data on existing technologies.