ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Научная статья
УДК 620.3: 622.245
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-418-423

CC BY 4.0

Исследование влияния на фазовый состав цементных растворов добавок на основе углеродных нанотрубок при цементировании скважин

Роза Ильгизовна Вахитова[1], Диана Азатовна Сарачева[1]*, Ильгам Киямович Киямов[2], Линар Салихзанович Сабитов[2]*, Василий Иванович Олейник[3]

[1] Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия
[2] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
[3] ООО «3DATA», Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sarachevadiana85@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. В данной статье описаны результаты исследований процессов влияния добавок на основе углеродных нанотрубок на фазовый состав цементных растворов, применяющихся при цементировании скважин. Качество работ по цементированию и обеспечению герметичности обсадной колонны является достаточно важным с точки зрения обеспечения экологических требований к окружающей среде. **Методы исследования.** Для решения этой проблемы модифицировали тяжелый бетон углеродной нанодобавкой. Для исследований был выбран цементный камень, полученный при нормально-влажностном отвердевании. Цементный раствор ЦЕМ III/А32.5Н затворяли водопроводной водой для отвердевания, предварительно в ней размешивая суспензию углеродных нанотрубок в водном растворе смеси гидрофобизатора и гиперпластификатора. Для обеспечения однородной и высокодисперсной структуры этой суспензии ее составляющие компоненты подвергались предварительной диспергации в ультразвуковом поле. **Результаты и их обсуждение.** Определили оптимальное соотношение углеродных нанотрубок в составе цементного раствора, которое составило от массы цемента 0,005% для однослойных углеродных нанотрубок и 0,0005% – для многослойных. Был изучен процесс влияния выбранных модификаторов на продукты гидратации и фазовый состав цементного раствора. Добавка комплексного действия, включающая в себя однослойные углеродные нанотрубки, была диспергирована в растворы смеси поверхностно-активных веществ гидрофобного и гидрофильного типов, что позволило увеличить прочность цементных растворов до 55%. **Вывод.** С точки зрения модификации наиболее эффективными являются однослойные углеродные нанотрубки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеродные нанотрубки, цементный раствор, гиперпластификатор, гидрофобизатор, наноматериал.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Киямов И.К., Сабитов Л.С., Олейник В.Ив. Исследование влияния на фазовый состав цементных растворов добавок на основе углеродных нанотрубок при цементировании скважин // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 418–423. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-418-423. – EDN: OQMQML.

ВВЕДЕНИЕ

В топливно-энергетическом комплексе России нанотехнологии начали широко применяться с 2008 года, что позволило увеличить его энергоэффективность и снизить затраты за счет применения наноматериалов. В настоящее время внедрение наноматериалов является достаточно актуальным и приоритетным вопросом. Применение нанотехнологий позволяет обеспечить междисциплинарный подход. Нанотехнологии позволяют проектировать, описывать, производить и использовать структуры, средства и системы с помощью управления формами и размерами объектов на наноуровне. Использование нанотехнологий, наномодифицированных материалов позволяет снижать и капитальные затраты.

Нефтяная промышленность остается основной отраслью экономики Российской Федерации. Между нанотехнологиями и эффективностью процессов добычи нефти и газа существует достаточно тесная связь [1–5]. Так как объемы добычи нефти увеличиваются, достаточно актуальным остается вопрос строительства нефтедобывающих скважин. Процессы строительства добывающих скважин можно

© Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Киямов И.К., Сабитов Л.С., Олейник В.Ив., 2023

условно разделить на ряд следующих этапов: проведение подготовительных работ, бурения, крепления, испытаний, освоения, заключительных работ. Из вышеперечисленных этапов сооружения скважин рассмотрим такую операцию, как крепление ствола скважины и разобщение пластов. В свою очередь при выполнении крепления скважины требуется выполнить следующее: подготовить ствол, обсадные трубы и оборудование к спуску обсадной колонны, осуществить спуск и цементирование обсадной колонны, выполнить контроль качества цементирования и герметичности обсадной колонны. При использовании цементного раствора в нефтедобывающих скважинах требования к нему возрастают.

Цементирование нефтедобывающих скважин – это заключительный этап подготовки скважины к эксплуатации, комплекс таких работ направлен на максимальный срок жизнедеятельности сооружения в силу следующих причин:

– требование изоляции каждой нефтегазоносной области с целью исключения возможности смешивания воды и сырья из разных пластов;
– требование по защите металлических поверхностей труб для обеспечения высокой коррозионной стойкости (при воздействии почвенной влаги на металлические поверхности ускоряются процессы коррозии);
– требование важности увеличения прочности всего сооружения (скважины), так как процесс цементирования снижает влияние на скважину движения грунтов.

Качество работ по цементированию и обеспечению герметичности обсадной колонны является достаточно важным с точки зрения обеспечения экологических требований к окружающей среде. При анализе общего числа осложнений можно отметить, что негерметичность обсадных колонн составляет около 20%, а межпластовые перетоки – более 18%. Затрубные газо- и нефтепроявления наносят значительный ущерб нефтедобывающим месторождениям и экологии района, то есть возможные перетоки между продуктивными пластами могут привести к юридическим и экологическим проблемам, а также и к потерям в нефтедобыче. Поэтому наиболее важными аспектами при строительстве ствола скважины остаются обеспечение целостности и зональная изоляция ствола.

Для выполнения цементирования скважин важно подготовить качественную тампонажную цементную смесь с требуемым водоцементным соотношением и со специальными добавками.

Известные в настоящее время методы защиты обсадной колонны от разрушения и смятия не всегда являются эффективными. Для решения этой проблемы требуется создать оптимально прочную крепь скважины, у которой цементный камень должен уметь воспринимать без разрушений внешнюю нагрузку, при этом сохранять и ее монолитность.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При создании цементного раствора хорошего качества применяются различные добавки. Наиболее эффективными добавками считаются наноматериалы. Существует несколько типов наноматериалов: нанопористые струткуры, нанотрубки и нановолокна, наночастицы, нанодисперсии, нанокристаллы и нанокластеры, наноструктурированные поверхности и пленки. Такая классификация рекомендована 7-й Международной конференцией по нанотехнологиям, которая проходила в 2004 году в г. Висбаден (Германия). Регулирование наноразмерных свойств системы ведет к изменению её макропараметров. Нанометровой диапазон первоначально определяли в интервале от 1 до 100 нм хотя бы одной из координат. Углеродные нанотрубки можно представить в виде протяжённых цилиндрических структур диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров [2, 5–15]. Они имеют форму свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей. Углеродные нанотрубки придают специфические физико-механические свойства, выступают в качестве эффективного средства для улучшения физико-механических свойств композитных материалов [6, 16 – 18]. Они, обладая большим количеством свободных химических связей, могут менять консистенцию бетонного раствора, обеспечивая при этом адгезию заполнителей оптимального качества, что, в свою очередь, гарантированным образом улучшает надежность применяемой композиции. В 1991 году были разработаны углеродные нанотрубки, имеющие диаметр 0,5 – 1,0 нм. С точки зрения современного видения материальных объектов нанометровый диапазон располагается от 0,1 до 100 нм.

Для улучшения эксплуатационных свойств тяжелого бетона можно его модифицировать химическими добавками. В качестве наномодифицирующего материала применимы углеродосодержащие структуры, а именно углеродные нанотрубки [19–21].

Интересна история появления нанотрубок. Долгое время считалось, что углерод имеет возможность образовывать всего две кристаллические структуры – графит и алмаз. О кристаллах алмаза всем хорошо известно, а вот менее известным является тот факт, что структура графита является слоистой: атомы углерода располагаются в плоскости с прочными связями между собой, но в то же время сами эти плоскости находятся на значительных расстояниях друг от друга и между собой слабо связаны. Сам графит существует в виде чешуек с размерами приблизительно

20 нм, однако атомы углерода имеют возможность образовывать однослойные листы довольно больших размеров. Как оказалось, такие однослойные углеродные листы скручиваются в один слой или в несколько слоев в виде трубок. В силу малых размеров углеродных трубок (1 нм) они получили название «нанотрубки». Углеродные нанотрубки обладают определенными исключительными структурными и функциональными свойствами, например, такими, как достаточно высокая прочность, долговечность, устойчивость к механическим нагрузкам и перепадам температур, высокая степень инертности и к кислотам, и к щелочам. Нанотрубки имеют возможность повышать стабильность цементных растворов по многим параметрам, достигая высоких значений упругих модулей, способствуют образованию значительного количества центров концентрированной кристаллизации. В общем, углеродные нанотрубки демонстрируют возможности уникального сочетания упругости, прочности и жесткости по сравнению, например, с волокнистыми материалами, обычно которым не хватает таких свойств. Теплопроводность и электропроводность углеродных нанотрубок характеризуется также высокими значениями и сравнима с другими хорошо проводящими теплоту и электричество материалами. Важное научное и практическое значение и интерес на современном уровне развития нанотехнологий имеет процесс изучения свойств бетонного раствора, модифицированного углеродными нанотрубками [22–26].

Исследования в области внедрения нанотехнологий являются приоритетными и поддерживаются правительством Российской Федерации (входят в список наиболее приоритетных направлений развития науки и техники). Это обстоятельство относится и к модифицированным конструкционным бетонам с наноразмерными частицами для улучшения физико-механических характеристик и продления срока службы конструкций.

Экспериментальным образом определяли оптимальную дозировку углеродных нанотрубок в составе цементного раствора. При выполнении исследовательских работ было установлено, что при добавлении углеродных нанотрубок в цементный камень образовывалась сетчатая структура. Такая сетчатая структура в свою очередь способствует появлению новых особенностей, а именно:

– появлению сопротивления к образованию в цементном растворе усадочных наноразмерных трещин;
– появлению таких новообразований, как гидросиликаты кальция.

Появление гидросиликатов кальция в начальный период гидратации способствует увеличению концентрации ионов кальция.

Процесс модификации тяжелых бетонов нанокластерами способствует значительному увеличению прочностных характеристик цементных растворов при таких механических нагрузках, как сжатие и изгиб.

Модифицированная структура цементных растворов наноразмерными частицами достигается двумя способами:

– выращиванием целенаправленно наноразмерных частиц в затвердевающей вяжущей среде;
– предварительно синтезируя наноразмерные частицы, которые в последующем вводятся в требуемую смесь.

В настоящее время наиболее распространен второй способ. Однако необходимо учитывать следующую особенность: в процессе синтезирования наноразмерных трубок из-за их высокой поверхностной активности они объединяются в конгломераты в виде порошкообразных гранул, что в свою очередь затрудняет по всему объему композиционной смеси равномерное распределение. В результате такой особенности можно получить материал, имеющий высокую неоднородность по прочности, плотности и другим свойствам.

При модификации тяжелого бетона нанодобавкой его прочность увеличилась почти в два раза по сравнению с бетоном без присутствия нанодобавок.

Интересно проанализировать влияние наноуглеродных трубок на изменения свойств цементной композиции, представляющей собой модель из тяжелого бетона.

Цементно-песчаная смесь включает в свой состав цемент и песок в соотношении один к трем соответственно. Для обеспечения процесса твердения неорганических вяжущих в цементном растворе его затворяли с применением водопроводной воды. В растворе заранее смешивали суспензию углеродных нанотрубок. Эта смесь включала в себя такие составляющие, как вода, гидрофобизатор и смесь гиперпластификатора.

Многочисленными исследованиями и экспериментами подтверждено, что для улучшения прочности цементного раствора требуется улучшить эффективность диспергирования углеродных нанотрубок в композиции. Для достижения однородности массы суспензии предварительно все основные составляющие раствора диспергировались ультразвуковым методом.

Для исследований был выбран цементный камень, полученный при нормально-влажностном отвердевании в течение более 20 суток цементного раствора нормальный густоты.

Экспериментальные работы с использованием цемента производились в соответствии с [27]. В ка-

честве наполнителя мелкой среды применяли песок с модулем крупности 2,7 из Камско-Устьевского месторождения. Дозировку нанодобавок принимали в процентных соотношениях от объема цементной композиции.

Цементный раствор был изготовлен на базе портландцемента производства промышленного холдинга «ЦЕМРОС». Портландцементный клинкер ЦЕМ III/А32.5Н затворяли водопроводной водой для отвердевания, предварительно в ней размешивалась суспензия углеродных нанотрубок в водном растворе смеси гидрофобизатора (для снижения водопоглощения) и гиперпластификатора (для увеличения прочности). Для обеспечения однородной и высокодисперсной структуры этой суспензии в объеме 100 мл ее составляющие компоненты подвергались предварительно диспергации в ультразвуковом поле в течение 3,5 минут. Использовался ультразвуковой диспергатор мощностью 100 Вт. Гиперпластификаторы, изготавливаемые на основе поликарбоксилатов, оказывают воздействие на цементные растворы за счет стерического эффекта, а именно силы взаимного отталкивания цементных частиц при введении гиперпластификаторов увеличиваются. В качестве гиперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата была выбрана добавка Remicrete SP60 (FM) (данная добавка позволяет распалубку на 4 часа в отличие от традиционных видов пластификаторов), в качестве гидрофобизатора – кремнийорганическая добавка Типром-С (на основе алкилсиликоната калия с 55% концентрацией).

В качестве добавки с комплексным действием гидрофобизатора и гиперпластификатора был выбран углеродный нанотубулярный материал – графеновые нанотрубки Tuball производства ООО «ОКСиАл.ру» с удельной геометрической поверхностью 90–130 м^2/г и многослойные УНТ с удельной геометрической поверхностью 180–200 м^2/г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктурный анализ образца цементной композиции провели с использованием электронного микроскопа Merlin производства компании ZEISS (Германия) с высоким классом разрешения и с функцией сканирования. С помощью такого микроскопа выполняют линейные измерения микрорельефных параметров твердотельных структур. Сколы образцов цементного раствора напылялись сплавом с содержанием золота и палладия (Au/Pd) в соотношении 80/20 на универсальной установке вакуумного напыления Quorum 150 T ES.

Важным показателем, описывающим адсорбционные свойства образца, является удельная поверхность. Удельную поверхность определяли наиболее распространённым многоточечным методом Брюнера-Эммета-Теллера (БЭТ).

Существуют однослойные и многослойные углеродные нанотрубки. Самым простым видом являются однослойные углеродные нанотрубки. Такие углеродные нанотрубки имеют толщину около 1 нм, при этом их длина бывает намного больше. Если рассматривать внутреннее строение, то трубки выглядят как обертывание графита с применением шестиугольной сетки. В вершинах сетки располагаются атомы углерода. Получается, что нанотрубка имеет геометрическую форму цилиндра и у неё нет швов. У однослойных углеродных нанотрубок минимальный и максимальный диаметры имеют следующие размеры: 0,3 нм и 5 нм соответственно. Характерной особенностью однослойных углеродных нанотрубок является простота их структуры, малое количество дефектов, улучшенные механические и физико-технические свойства. Следующий вид – многослойные углеродные нанотрубки. Такие нанотрубки имеют в своем составе несколько слоев графита, которые сложены в форму цилиндра. Между ними выдерживается расстояние в 0,34 нм. Многослойные углеродные нанотрубки имеют большую термическую устойчивость, теплопроводность и электропроводность, в отличие от однослойных углеродных нанотрубок.

Экспериментальным образом определили оптимальное соотношение углеродных нанотрубок в составе цементного раствора, которое составило от массы цемента 0,005% для однослойных углеродных нанотрубок и 0,0005% – для многослойных.

Был изучен процесс влияния выбранных модификаторов на продукты гидратации и фазовый состав цементного раствора.

Для определения фазового состава продуктов гидратации цементного камня с выбранными добавками привлекались специалисты Центра трансфера технологий. Фазовый состав изучался с помощью рентгеновского дифрактометра «SmartLab» производства Rigaku Corporation.

В исследуемых образцах цементного камня с комплексной наносодержащей добавкой наблюдался процесс более глубокой гидратации силикатной фазы цементного раствора. Это свидетельствует об увеличении в выбранном диапазоне температур эндотермического эффекта.

Добавка комплексного действия, включающая в себя однослойные углеродные нанотрубки, была диспергирована в растворы смеси поверхностно-активных веществ гидрофобного и гидрофильного типов, что позволило увеличить прочность цементных растворов до 55%. Увеличение прочности цементных растворов объясняется образованием микроструктурных элементов оптимального типа

у цементного камня. В начальный период затвердевания цементного камня ускоряется процесс образования низкоосновных гидросиликатов кальция, выявленный по результатам оптического и термического исследований, а именно рентгенофазового анализа и дифференциально-термического анализа.

При добавлении в цементный раствор многослойных углеродных нанотрубок микроструктура цементного камня характеризуется более рыхлой и неоднородной структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что с точки зрения модификации наиболее эффективными являются однослойные углеродные нанотрубки. Можно сделать предположение, что однослойные углеродные нанотрубки являются одновременно центрами кристаллизации в основном для низкоосновных гидросиликатов кальция. Также наблюдается более ускоренное структурообразование по сравнению с составом, в котором отсутствуют нанодобавки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хавкин А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. 692 с.

2. Пасовец В.Н., Ковтун В.А. Упрочнение композиционных материалов на основе металлической матрицы и углеродных нанотрубок // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2019. Т. 64. № 2. С. 166–174.

3. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №1. С. 31–34.

4. Rayati S., Chegini E.K. Highly selective and green oxidation of sulfides with urea hydrogen peroxide in the presence of MN(III) porphyrin supported onto carbon nanotubes. *Macroheterocycles.* 2016; 9(2): 151-155.

5. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и анизотропных добавок // Строительные материалы. 2007. № 6.

6. Джаманбалин К.К. Новые интеллектуальные материалы – фуллерены и углеродные нанотрубки // Известия высших учебных заведений. Уральский регион. 2023. № 1. С. 72–76.

7. Lykah V.A., Syrkin E.S. Functionalized semiconducting carbon nanotubes: three models for carrier spectra. *Chemistry, Physics and Technology of Surface.* 2010; 1(3): 296-302.

8. Gutnik I.V., Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Burakova E.A., Tugolukov E.N., Alekseev S.Yu., Kodirov B.B., Titova G.A. Polyaniline/carbon nanotubes composites: kinetic laws of synthesis, morphology and properties. *Advanced Materials and Technologies.* 2018; 4: 54-68.

9. Deeraj B.D.S., Jayanarayanan K., Kuruvilla J. High performance in-situ composites developed from polypropylene/nylon 6/carbon nanotube blend systems. *Journal of Siberian Federal University. Biology.* 2018; 11(2): 157-165.

10. Войтович В.А., Хряпченкова И.Н. Нанобетон в строительстве // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 73–75.

11. Huseynova L.V., Huseynova M.A. The environmentally friendly technologies for oil sludge utilizing. *Modern Sci.* 2018; 3:143–147.

12. Shah K.A., Najar F.A., Andrabi S.M.A., Islam S.S. Synthesis of carbon nanotubes for device applications. *Asian Journal of Chemistry.* 2017; 29(4):879-881.

13. Danoglidis Panagiotis A., Falara Maria G., Maglogianni Myrsini, Konsta-Gdoutos Maria S. Scalable processing of cementitious composites reinforced with carbon nanotubes (CNTS) and carbon nanofibers (CNFS). *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal [Nanotechnology in construction: a scientific online magazine].* 2019; 11(1): 20-27. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-1-20-27

14. Модификация поризованных цементных матриц углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, А.Ф. Бурьянов, В.И. Кодолов, В.А. Крутиков, Х.Б. Фишер, Я. Керене // Строительные материалы. 2009. № 3. С. 99–102.

15. Хуссейн Сафаа Мохаммед Ридха Хуссейн, Ханфар А. Углеродные нанотрубки: проблемы и перспективы их использования // Успехи современной науки. 2017. Т. 4 № 4. С. 166–169.

16. Tang Q., Huang J., Tian G. Dispersion of carbon nanotubes and research progress on mechanical properties of carbon nanotubes cement-based composites. *Gongneng Cailiao*. 2017; 48 (6): 42-49.

17. László I., Gyimesi B., Koltai J., Kürti J. Molecular dynamics simulation of carbon structures inside small diameter carbon nanotubes. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics.* 2017; 254 (11): 170-206.

18. Руденков А.С., Ярмоленко М.А. Углеродные нанотрубки: классификация, особенности синтеза, методы исследования, области применения // Проблемы физики, математики и техники. 2019. № 2 (39). С. 7–14.

19. Жданок С.А., Потапов В.В., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные материалы // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 3. С. 669–673.

20. Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Влияние наноуглеродных наполнителей на свойства композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 3. С. 228–237.

21. Кель А.В. Фуллерены и углеродные нанотрубки // Инновации. Наука. 2016. № 11-3. С. 23–25.

22. Altunina L.K., Svarovskaya L.I. Detergent compositions for oil sludge reclamation. *Petrol. Chem.* 2012; 52 (2): 130–132. https://doi.org/10.1134/S0965544112010033

23. Saikia N.J., Sengupta P., Gogoi P.K., Borthakur P.C. Physicochemical and cementitious properties of sludge from oil field effluent treatment plant. *Cement Concr. Res.* 2001; 31 (8): 1221–1225.

24. Deza M., Sikirić M.D., Shtogrin M.I. Fullerenes and disk-full-erenes. *Russ. Mathemat. Surv.* 2013; 68 (4): 665–720. https://doi.org/10.1070/RM2013v068n04ABEH004850

25. Kroto H. C60, fullerenes, giant fullerenes and soot. *Pure and Appl. Chem.* 1990; 62 (3): 407–415. https://doi.org/10.1351/pac199062030407

26. Guz A.N., Rushchitskii Y.Y. Nanomaterials: on the mechanics of nanomaterials. *International applied mechanics.* 2003; 39(11): 1271-1293. https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000015598.53063.26

27. ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вахитова Роза Ильгизовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика», Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия, roza-w@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6563-1095

Сарачева Диана Азатовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия, sarachevadiana85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7639-8954

Киямов Ильгам Киямович – доктор экономических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), Казань, Россия, kiyamov.ilgam@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2955-777X

Сабитов Линар Салихзанович – доктор технических наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование» Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ), Казань, Россия, sabitov-kgasu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7381-9752

Олейник Василий Иванович – инженер технической поддержки ООО «3DATA», Москва, Россия, o-v-i-92@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4262-1003

ВКЛАД АВТОРОВ

Вахитова Р.И. – научный менеджмент; концепция исследования; разработка методологии; участие в разработке учебных планов и их реализации; написание черновика; окончательные выводы.

Сарачева Д.А. – участие в разработке учебных планов и их реализации; последующая доработка текста; окончательные выводы.

Киямов И.К. – научный менеджмент; концепция исследования; написание черновика; окончательные выводы.

Сабитов Л.С. – научный менеджмент; концепция исследования; написание черновика; окончательные выводы.

Олейник В.И. – участие в разработке учебных планов и их реализации; написание черновика; перевод научной статьи на технический английский.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 19.09.2023.