

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 691-405.8
doi: 10.26583/gns-2022-02-03

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ВТОРИЧНОГО БЕТОНА ОИАЭ В РАМКАХ АДДИТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

© 2022 Давтян Арсен Рубенович¹, Нахабов Александр Владимирович²

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹arsen.davtian2011@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8455-075X>

²AVNakhabov@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2323-8850>

Аннотация. Объектом исследований данной работы является обоснование методики вторичного использования бетонного боя, получаемого в результате демонтажа зданий и сооружений объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). В данном исследовании вторичное применение рассматривается в рамках аддитивных технологий. Строительство с применением аддитивных технологий является одним из перспективных направлений. Данное направление исследования является частью обоснования метода вторичного применения бетона, полученного в результате демонтажа зданий и сооружений ОИАЭ.

Ключевые слова: вторичное использование бетона, обращение с НАО и ОНАО, оценка радиоактивного воздействия, аддитивные технологии, лабораторные испытания.

Для цитирования: Давтян А.Р., Нахабов А.В. Исследование возможности применения вторичного бетона ОИАЭ в рамках аддитивных технологий // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 2(43). – С. 24-33. – <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-02-03>

Поступила в редакцию 16.05.2022

После доработки 20.05.2022

Принята к печати 27.05.2022

Введение

Благодаря своим свойствам, бетон зарекомендовал себя как достаточно качественный материал для защиты от ионизирующих излучений (ИИ). Его комбинирование с разными видами заполнителя (серпентинит, гематит, магнетит, хромит, карбид бора и др.) многокомпонентный бетон обладает высокими защитными свойствами от ИИ. Стоит так же отметить, что после облучения, свойства бетона также будут зависеть от свойств, составляющих его вяжущих и заполнителя.

Высокая радиационная нагрузка на бетонные конструкции, как правило, сопровождается большим внутренним радиационным тепловыделением в материале. Нагрев бетона до температур в несколько сотен и даже тысяч градусов оказывает влияние, как на процессы структурообразования, так и на изменение уже сформировавшейся структуры. Стоит отметить, что при изучении свойств бетона уделяется большое внимание зависимости прочностных показателей бетонных конструкций (разных минералогических составов) от температуры.

По данной тематике проводилось множество исследовательских работ, начиная с 1940-х годов. При этом исследования касались различных аспектов, начиная от

изменения механических свойств заканчивая изменениями структуры самого материала. Первые данные об исследованиях бетона после облучения относятся к 1944 году. Описания о недопустимых изменениях свойств бетона после облучения явились причиной исследования еще в 1948 году [1].

Исследования свойств активно проводились и в других странах. Так в конце 1955 г. возник вопрос о возможном повреждении стенок каналов реактора для исследования материалов (Materials Testing Reactor (MTR)). В результате чего была проведена серия испытаний с гамма-облучением образцов конструкционного бетона для проверки их на потерю прочности из-за интенсивного и длительного облучения [2]. Проводились множество испытаний радиационной стойкости обычных бетонов.

Под обычным бетоном подразумеваются бетоны, изготовленные из портландцемента и заполнители из неметаллических материалов: известняки, песчаники, граниты и т.д. Как правило, выбор заполнителя определяется месторасположением конструкции. Так в статье под названием «Радиационные повреждения в обычном бетоне» [3] описано влияние на обычные бетоны интегральных потоков нейтронов. Но при этом уточнено, что свойства зависят от типа заполнителя и состава бетона.

Исследования свойств бетонов, а также рассмотрение вариантов его вторичного использования являются актуальными. Во многих работах рассматриваются новые бетоны, при этом возможность вторично использовать бетона, подвергшиеся длительному влиянию интегральных потоков нейтронов, как мелкий и средний заполнитель для бетонных смесей не рассматривалось.

Методология исследования

Настоящая статья состоит из подборки научных публикаций, а также исторического обзора исследований, связанных с данной тематикой. В статье описаны собственные экспериментальные работы, связанные с направлением исследований.

Методологической основой в работе выступают консервативные расчеты, опирающиеся на полуэмпирические формулы нормативной документации в сфере атомной энергетики, а также проведенные лабораторные испытания в сертифицированной лаборатории.

Отечественный исторический опыт исследования прочности и деформации бетонов и растворов

Прочность деформативности бетонов измеряется зависимостью прочности облученных образцов и от интегрального потока радиационных деформаций. Ниже рассматриваются фундаментальные работы по исследованию свойств бетона при влиянии на них гамма-облучения и ИИ.

В начале 1958 г. секция Физики и состояния реакторов [2], приступила к программе облучения 24 образцов бетона в гамма-облучательных установках. После чего над образцами проводили испытания на сжатие и изгиб в период с 1958-1959 гг., для определения изменений физико-механических свойств. В результате образцы, испытываемые на сжатие не изменили своих свойств, по сравнению с контрольными образцами. После чего были проведены испытания в 1967 г., где рассматривалось большее количество образцов. В результате испытаний на сжатие была определена потеря прочности образцов. Кроме того, на некоторых образцах было отмечено сильное ухудшение качества поверхности. Данные изменения обусловлены влиянием гамма-облучений, а также из-за воздействия воды на образцы. В результате чего было определено, что потеря прочности прогрессировала при воздействии гамма-излучения до 2×10^{11} Рад. По итогу работ была зафиксирована потеря прочности облученных образцов до 50 % по сравнению с контрольными образцами [2].

В трудах под авторством В.Б. Дубровского [3] тоже приводятся примеры исследований того времени. В их работе рассматривались изменения структуры бетонов с различными типами заполнителей в результате облучения равными интегральными потоками нейтронов.

В ходе работы было выявлено, что объёмные радиационные деформации растворов и бетонов зависят в первую очередь от радиационной деформативности заполнителя и относительного объёмного содержания его крупных фракций. Объясняется все тем, что в результате облучения кристаллы минералов самого заполнителя, имеют положительные радиационные деформации, которые служат причиной расширения растворов и бетонов. Имеется ввиду, что степень изменения прочности от радиационной деформативности составов после облучения зависит от технологических факторов и свойств текучести растворов. Изменение прочности бетонов и растворов в зависимости от интегральных потоков или радиационных деформаций можно производить по формулам (1)-(3):

$$P = -a \cdot \lg \Phi \cdot b + c, \quad (1)$$

$$P = -aD + c, \quad (2)$$

$$P = \frac{a \cdot (d - D)}{\sqrt{D + e}}, \quad (3)$$

где P – отношение прочности материала после облучения к начальной, %;

Φ – интегральный поток нейтронов, действующий на материал, прочность которого определяется, *нейтрон/см²*;

D – число, равное линейным радиационным деформациям этого материала, %;

a (%);

b – коэффициент, *см²/нейтрон*;

c – коэффициент, %;

d и e – коэффициенты.

Зарубежный исторический опыт исследования бетонов и растворов

Влияние изменения на свойства бетонов изучаются и за рубежом, влияние на бетон изучалось в различных условиях.

Проводились работы, в которых рассматривалось влияние двух типов излучения на прочностные свойства бетонов, а именно нейтронное и гамма-излучения [4]. Нормальные бетоны могут противостоять нейтронному излучению более 5×10^{19} н/см² без потери прочности. При этом в исследованиях фиксировалось снижение прочности на сжатие при потоке нейтронов равному излучению более 1×10^{19} н/см² [4]. Потеря прочности в основном обусловлена нейтронным излучением, также на прочностные характеристики влияет повышение температуры. При этом в данных работы над бетонами разброс в экспериментальных данных объясняется различиями в составе образцов бетона. В ходе экспериментов бетоны также подвергались воздействию первичного и вторичного гамма-излучения, в ходе работы доза гамма-излучения составляла 3×10^{11} Рад. Данные работы показали снижение прочности бетона с увеличением дозы гамма-излучения [4].

Влияние гамма-излучения было исследовано для бетона, используемого в сухих контейнерах для хранения ядерных материалов, где ожидаемая общая поглощенная доза гамма-излучения составляет порядка МГр [5].

Аддитивные технологии в строительстве

В целом строительная отрасль пытается перейти к цифровой системе проектирования. Поскольку цифровое проектирование обеспечивало большую

производительность, чем общепринятые методы строительства. В связи с этим возможность печати зданий и сооружений путем 3D печати стало общим направляющим для обновления строительной индустрии. Для проектирования и строительства в формате 3D печати необходимо обладать навыками BIM проектирования. Как правило, архитектурная модель рисуется в программе моделирования перед экспортом в формат файла STL (стандартный язык теселяции), который соответствует стандартному типу файла содержащую информацию о геометрии 3D модели. После чего, программное обеспечение сегментирует модель на срезы слоев, создавая серию двухмерных граничных линий, которые вместе с дополнительными данными о характеристиках печати обрабатываются и приводят к командам управления для позиционирования экструзионного сопла обеспечивая послойную печать [6], процесс отображен на рисунке 1.

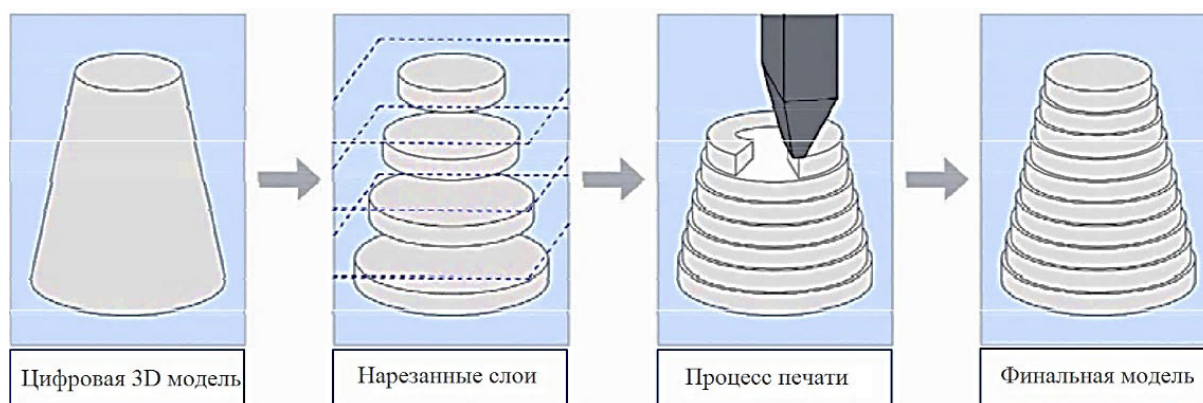


Рисунок 1 – Схема движения экструдера [The flow diagram of the extruder] [6]

Печать осуществляется специальными принтерами, которые позволяют воспроизвести практически полный каркас здания в кратчайшие сроки с минимальными денежными и трудовыми затратами в процессе строительства [7].

Но сама технология является новой и у неё могут быть свои особенности. Одна из главных особенностей – это то, что печать бетоном требует применения определенного армирования. Конкретного решения вопроса армирования нет, поскольку в основном 3D печать зданий происходила для малоэтажных зданий, поскольку армировать малоэтажные объекты проще.

Исследования и материалы для аддитивного строительства

Аддитивные технологии могут иметь два варианта использования:

- для строительства с использованием обычных бетонов;
- для строительства с использованием вторичного бетона.

В мире уже существуют компании, внедрившие в строительную отрасль свои проекты: «3D-printed Canal House» компании DUS Architects; «Chinese houses» компании WinSun; «a Chinese building» компании WinSun и т.д. [8].

Технологии 3D-печати становятся проще с каждым годом, если раньше перед использованием оборудования ему требовалась определенная техническая настройка и должное обслуживание специалистом, то сегодня даже многие школьники умеют пользоваться 3D-принтерами. Упрощение эксплуатации оборудования способствует популяризации аддитивных технологий – внедрению в широкие массы и в различные сферы нашей жизнедеятельности. Так, в 2018 г. одних только 3D-принтеров для домашнего использования было продано более 400 тысяч. В 2021 г. этот показатель вырос на порядок [9].

Для вторичного использования бетонов в 3D печати здания вторичные бетоны рассматриваются как мелкий заполнитель. Поскольку 3D печать зданий является новой технологией, то исследования в данной области очень актуальны.

В работе Толыпин Д.А., Толыпина Н.М. рассматривается способ переработки бетонного боя для использования в 3D-печати. В работе предложен рациональный способ переработки бетонного боя 3D-печати с использованием виброоборудования, что позволяет получать многокомпонентный строительный материал при минимальном потреблении электроэнергии. Показана возможность повторного использования полученного продукта вместо традиционного мелкого заполнителя из кварцевого песка [10].

Проводились исследования самих вяжущих для 3D печати. В работах Е.С. Глаголева, В.С. Лесовика, Л.Х. Загороднюка, Д.С. Подгорного получены энергоэффективные, экономичные составы, обладающие характеристиками для строительной 3D печати [11]. Подобранные ими смеси обладают высокой скоростью схватывания и твердения, обеспечивая высокую прочность.

Стоит отметить в апреле 2021 г. в РФ вступили в силу государственные стандарты на материалы для аддитивного строительного производства: ГОСТ Р 59095-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения»; ГОСТ Р 59096-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний»; ГОСТ Р 59097-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования». Поскольку до этого времени не было регламентации для лабораторных исследований, то все исследования имели только научную составляющую. Данные нормативные документы позволят результатам исследований иметь прикладной характер, соответствующий государственным стандартам.

Проведенные исследования физико-механических свойств бетонов

В данной работе вторичные бетоны имитируют физико-механическую работу бетона класса очень низкоактивных радиоактивных отходов (ОНАО).

В рамках научно-исследовательской работы выполнены лабораторные испытания для определения физико-механических характеристик бетонного боя, который появляется в результате демонтажа объектов использования атомной энергии. На основе результатов выполненных лабораторных испытаний, подтверждена обоснованность и целесообразность применения данного типа бетона как конструктивного материала.

Испытания образцов выполнены согласно ГОСТ 10180, процесс испытаний изображен на рисунке 2. Настоящий стандарт распространяется на бетоны всех видов по ГОСТ 25192, применяемые во всех областях строительства, и устанавливает методы определения предела прочности бетонов на сжатие, осевое растяжение, растяжение при раскалывании и растяжение при изгибе путем разрушающих кратковременных статических испытаний специально изготовленных контрольных образцов бетона.



Рисунок 2 – Изготовление бетонного боя: а) демонтированный бетон б) щекодробилка, в) получившийся бой бетона [Production of concrete scraps: a) dismantled concrete b) crusher, c) resulting concrete scrap]

В ходе экспериментальных работ нами было изготовлено 3 образца с разными составами, образец первого состава является контрольным и имел классический состав бетона. У каждого из образцов имелся свой состав со своими значениями, указанными в таблице 1.

Таблица 1 – Состав смеси образцов [Composition of the sample mixture]

№ обр.	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень/ бой бетона, кг	Вода, мл	Фибра, гр	Добавка, мл	В/Ц	Прочность на сжатие МПа 28 суток
1	1,500	3,450	2,700/-	790	-	-	0,5	19,8
2	1,500	3,450	-/2,700	790	-	-	0,5	16,9
3	1,500	3,450	-/2,700	620	17	200	0,54	20,17

Испытания показали, что бетоны с заполнителем, изготовленным из вторичного бетона по своим физико-механическим свойствам не уступают обычным бетонам. При условии ввода в состав бетонной смеси добавок в виде силиката натрия, что позволяет существенно поднять показатели прочности бетона. Достоверность результатов, основных научных положений и выводов обоснована применением комплекса физико-механических методов анализа в соответствии с требованиями стандартов и научных методик. Результаты не противоречат общепринятым теоретическим положениям. Научно-практические рекомендации подтверждены результатами лабораторных испытаний. Использование бетонного боя в качестве крупного заполнителя позволяет без особых затруднений получить новый бетон высокого качества, в том числе и достаточного класса прочности, на рисунке 3 отчетливо видно, что образец 3 не уступает по прочности стандартному бетону.

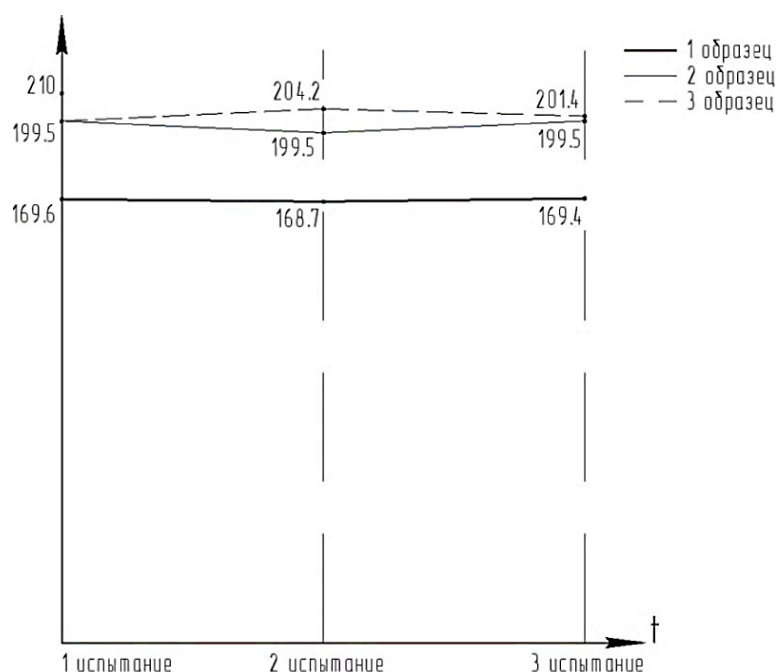


Рисунок 3 – Результаты испытания образцов вторичного бетона (кг/см²) [Test results of secondary concrete samples (kg/cm²)]

Проведенные испытания отражают, возможность вторичного использования бетона в строительстве. Наличие такой информации позволит проектировать составы растворов и бетонов, в структуре которых при ожидаемой в эксплуатационных

условиях дозе облучения будут развиваться положительные изменения, т.е. такие изменения, которые вызовут повышение определяющего параметра радиационной стойкости материала, в частности прочности.

Во многих работах рассматриваются новые бетоны, при этом возможность вторично использовать бетоны, подвергшиеся длительному влиянию интегральных потоков нейтронов, как мелкий и средний заполнитель не рассматривалось.

Расчет активности бетонов

Для обоснования утилизации ж/б отходов, которые остаются после демонтажа зданий и сооружений ОИАЭ, и повторное применение этих ж/б отходов в новом строительстве.

В связи с этим как научный, так и практический интерес представляет изучение пространственного распределения продуктов активации материалов, оборудования и конструкций (корпус реактора, внутрикорпусные устройства, «сухая» и биологическая защита, железобетонная шахта реактора) при облучении их нейтронами, из активной зоны реактора.

В рамках работы был проведен расчет выхода бетонной пыли (класса НАО и ОНАО) в процессе обращения с материалами демонтажа, её концентрация и активность в процессе работы с ним. Вкладчиком активности рассматривался тритий (^3H).

Формула (4) для расчета доз облучения получена в пренебрежении самоэкранированием органов и тканей, и не учитывают различия в возрастных группах (величина ошибки в значении эквивалентной дозы, вносимая принятым упрощением, не превышает 50%):

$$H_{A,\infty}^{r,j} = \bar{C}_n^{V,r}(x) \cdot R_A^{r,j} \cdot k_A^r \cdot 3,15 \cdot 10^7, \quad (4)$$

где $H_{A,\infty}^{r,j}$ – годовая доза от радионуклида r х, Зв/год;

$\bar{C}_n^{V,r}(x)$ – среднегодовая приземная концентрация Бк/м³;

$R_A^{r,j}$ – дозовые факторы конверсии, Зв·м³/(с·Бк);

k_A^r – коэффициент защищенности зданиями для радионуклида r распределенного в полубесконечном пространстве, учитывающий также время пребывания человека на открытой местности. Его значения приведены в таблице П5.5 [12].

Проведен расчет активности и эквивалентной дозы на персонал и население. Дозовые коэффициенты принимались согласно НРБ-99/2009 приложение 1 [12], итоги расчета приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Данные расчетов активности и эквивалентной дозы на персонал вовлеченный в переработку [Data of calculations of activity and equivalent dose for personnel involved in processing]

^3H		Скорость дыхания м ³ /с (w)	
Активность бетона Бк/кг	1.00E+03	Время работы (с) (t)	0.000389
Бк	7.59E+00	Масса пыли (m)	18000
Бк/м ³	2.26E-01	Дозовый коэфф. экв.	0.00759
Поступление в организм (Бк)	1.59E+00	V сферы (м)	1.8E-15
Доза эквивалентная (Зв)	2.85E-15	Радиус раб. зоны (м)	33.51
			2

Таблица 3 – Данные расчетов активности и эквивалентной дозы на население [Data of calculations of activity and equivalent dose per population]

^3H		Скорость дыхания м ³ /с (w)	
Активность бетона Бк/кг	1.00E+03	Время работы (с) (t)	0.000389
Бк	1.52E+00	Масса пыли (m)	3600
Бк/м ³	4.53E-02	Дозовый коэфф. экв.	0.001518
Поступление в организм (Бк)	6.34E-02	V сферы (м)	1.8E-15
Доза эквивалентная (Зв)	1.14E-16	Радиус раб. Зоны (м)	33.51
			2

В результате сравнения расчетных данных и значений предельных годовых поступлений (ПГП) по НРБ-99/2009 выявлено, что для населения и персонала, при работе с бетонными материалами класса НАО и ОНАО ПГП не превышают норму (табл. 4)

Таблица 4 – Дозовые коэффициенты и пределы годового поступления согласно НРБ-99/2009 [Dose coefficients and limits of annual intake according to NRB-99/2009]

Радио- нуклид	Период полураспада	Тип соединения при ингаляции*	Дозовый коэффициент (возд) е перс, Зв/Бк	Предел годового поступления ПГП перс, Бк в год	Допустимая среднегодовая объемная активность ДОО перс, Бк/м ³
НЗ	12,3 лет	П	1,8·10 ⁻¹¹	1,1·10 ⁹	4,4·10 ⁵
		Г2	1,8·10 ⁻¹⁵	1,1·10 ¹³	4,4·10 ⁹
		Г3	1,8·10 ⁻¹³	1,1·10 ¹¹	4,4·10 ⁷
* Г1 – пары тритированной воды; Г2 – газообразный тритий; Г3 – тритированный металл					

Как итог, переработка вторичных бетонов после демонтажа является возможной. При этом стоит отметить, что на ОИАЭ бетонные конструкции зданий и сооружений подвергаются влиянию различных факторов таких как, воздействия ионизирующего излучения и высокотемпературное воздействие. Исходя из этого, необходимы также более подробные исследования свойств бетонов.

Заключение

Анализ исследований показал, что в основном проводились исследования стандартных бетонов. Исследований вторичных бетонов, полученных после демонтажа зданий и сооружений ОИАЭ не проводилось. Вторичное использование бетонов рассматривалось для обычного строительства. Для атомной отрасли вторичное использование бетонов, получаемых в результате демонтажа ОИАЭ, так же является перспективным направлением.

В работе рассматривались исследования для консервативного способа переработки бетонов, а также возможность применения для аддитивных технологий. Рассмотрены варианты использования вторичных бетонов для аддитивных технологий. Проведен анализ имеющихся исследований способов 3D печати, а также возможность вторичного использования бетонов демонтажа для 3D печати. Стоит отметить, в 2021 г. в РФ вступили в силу государственные стандарты на материалы для аддитивного строительного производства.

Рассматриваемая работа показывает, что в целом вторичное применение бетонов возможно. В рамках данной работы проводился расчет пространственного распределения продуктов активации бетонов класса НАО и ОНАО (вкладчиком активности рассматривался тритий). Результаты показали, что в таком выявлено, что для населения и персонала, при работе с бетонными материалами ПГП не превышают норму. Важно отметить, что проводились консервативные расчеты, опирающиеся на полуэмпирические формулы нормативной документации в сфере атомной энергетики, и имеет большую долю погрешности. В связи с чем, исследования в данном направлении необходимо продолжать в более глубоком ключе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дубровский, В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов / В.Б. Дубровский. – Москва : Стройиздат, 1977. – 279 с.
2. Effect of Irradiation on the Strength of Concrete, AERE R 3332, UKAEA Reserch Report, 1960.
3. Дубровский, В.Б. Радиационная стойкость материалов / В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, Б.К. Пергаменщик, В.Н. Соловьев. – Москва : Атомиздат, 1973. – 264 с.
4. Hilsdorf H.K., Kropp J. and Koch H.J. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete / Published 1978, Materials Science.
5. A multi-scale review of the effects of gamma radiation on concrete / Yonathan Reches // Results in Materials. Volume 2, September 2019.

6. Pessoa, S., Guimarães, A.S., Lucas, S.S., & Simões, N. (2021). 3D printing in the construction industry – A systematic review of the thermal performance in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110794.
7. Сулейманова, Л.А. Сущность аддитивных технологий в строительстве / Л.А. Сулейманова, А. Погорелова, М.В. Марушко // Наука, как инструмент совершенствования современной жизни. – Журнал по материалам XXVIII международной научно-практической конференции. – Минеральные Воды: Копир. множ. бюро СКФ БГТУ им. В. Г.Шухова. – 2018. – № 2(6). – 219 с.
8. Labonnote N., Rønquist A., Manum B., & Rüther P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347-366.
9. Романов, М.Р. 3D-печать в современном строительстве / М.Р. Романов, Н.А. Жарков, Ю.В. Зайнашева // Научные исследования молодых учёных: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – 136 с.
10. Толыпин, Д.А. Эффективный способ переработки бетонного лома 3d-печати / Д.А. Толыпин, Н.М. Толыпина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Том 4, № 2. – С. 12-18.
11. Glagolev E.S., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H. & Podgorny D.S. Composite Binders and Dry Building Mixes for 3D Additive / Technologies // Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction, 2021, 229-235 pp.
12. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/902170553>.

REFERENCES

- [1] Dubrovsky V.B. Radiacionnaya stojkost' stroitel'nyh materialov [Radiation resistance of building materials]. Moscow: Stroyizdat 1977, 279 p. (in Russian).
- [2] Effect of Irradiation on the Strength of Concrete, AERE R 3332, UKAEA Reserch Report, 1960 (in English).
- [3] Dubrovsky, V.B. Radiacionnaya stojkost' materialov [Radiation resistance of materials]. Moscow: Atomizdat, 1973. 264 p. (in Russian).
- [4] Hilsdorf H.K., Kropp J. and Koch H.J. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete. Published 1978, Materials Science (in English).
- [5] A multi-scale review of the effects of gamma radiation on concrete. Yonathan Reches. Results in Materials. Volume 2, September 2019 (in English).
- [6] Pessoa S., Guimarães A.S., Lucas S.S., & Simões N. (2021). 3D printing in the construction industry – A systematic review of the thermal performance in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110794 (in English).
- [7] Sushchnost' additivnyh tekhnologij v stroitel'stve [The essence of additive technologies in construction]. Nauka, kak instrument sovershenstvovaniya sovremennoj zhizni [Science as a tool for improving modern life]. Zhurnal po materialam XXVIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Journal based on the materials of the XXVIII International scientific and practical conference]. Mineral'nye Vody: Kopir. mnozh. byuro SKF BGTU im. V. G.Shuhova [Mineralnye Vody: Copy Office of Bashkir State Technical University named after V. G. Shukhov]. 2018. №2(6). P.219 (in Russian).
- [8] Labonnote N., Rønquist A., Manum B., & Rüther P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347-366 (in English).
- [9] Romanov M.R. 3D-pechat' v sovremennom stroitel'stve [3D printing in modern construction]. Nauchnye issledovaniya molodyh uchyonyh: sbornik statej XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Scientific research of young scientists: collection of articles of the XVII International Scientific and Practical Conference]. Penza: MCNS «Nauka i Prosveshchenie» [Penza: ICNS «Science and Education»]. 2022. 136 p. (in Russian).
- [10] Tolypin D.A. Effektivnyj sposob pererabotki betonnoego loma 3d-pechaty [An effective way of processing concrete scrap 3d printing]. Stroitel'nye materialy i izdeliya [Building materials and products]. 2021. Volume 4. № 2. P. 12-18 (in Russian).
- [11] Glagolev E.S., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H. & Podgorny D.S. Composite Binders and Dry Building Mixes for 3D Additive / Technologies // Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction, 2021. P. 229-235 (in English).
- [12] Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009 Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 [Radiation safety Standards NRB-99/2009 Sanitary rules and regulations Sanitary rules and regulations 2.6.1.2523-09] (in Russian).

Investigation of the Possibility of Using Secondary Concrete Ouae in the Framework of Additive Technologies

Arsen R. Davtyan¹, Alexander V. Nakhabov²

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹*arsen.davtian2011@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-8455-075X, WoS ResearcherID: CAF-6986-2022*

²*AVNakhabov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-2323-8850*

Received by the editorial office 16/05/2022

After completion on 20/05/2022

Accepted for publication on 27/05/2022

Abstract. The object of research in this work is to substantiate the methodology of the secondary use of concrete scrap obtained as a result of the dismantling of the OUAЕ. In this study secondary application is considered within the framework of additive technologies. Construction using additive technologies is one of the promising areas. This line of research is part of the justification of the method of secondary use of concrete obtained as a result of the dismantling of nuclear energy facilities (OUAE).

Keywords: recycling of concrete, handling of low-level waste and very low-level waste, assessment of radioactive exposure, additive technologies, laboratory tests.

For citation: Davtyan A.R., Nakhabov A.V. Investigation of the possibility of using secondary concrete in the framework of Additive technologies // Global nuclear safety. 2022. Vol. 2(43). P. 24-33. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-02-03>