

Анализ гидратационных процессов бетонной смеси при введении наномодификатора методом электромагнитной активации

Владимир Александрович Перфилов , Дмитрий Александрович Ляшенко* , Артем Игоревич Богданов 

Волгоградский государственный технический университет, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Традиционные бетоны на портландцементном вяжущем характеризуются низкой прочностью при растяжении на изгиб и склонностью к трещинообразованию. Одним из перспективных способов решения этой проблемы является применение углеродных нанотрубок, которые выступают в роли центров кристаллизации и обеспечивают дискретное армирование материала на наноуровне. Цель работы – экспериментальное подтверждение эффективности использования наномодификатора на основе УНТ «Таунит-М» в составе мелкозернистого бетона. **Материалы и методы.** В качестве вяжущего использовали портландцемент М500Д0, мелкого заполнителя – песок Песковатского карьера, крупного – щебень фракции 5–20 мм. Комплексная добавка включала суперпластификатор «СП-3» и УНТ «Таунит-М». Нанотрубки вводили в сухую цементно-песчаную смесь с помощью линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100, обеспечивающего гомогенизацию и механохимическую активацию. Фазовый состав исследовался на дифрактометре «Bruker D8 Advance». **Результаты и обсуждение.** Установлено, что максимальный прирост прочности достигнут при содержании УНТ 0,005% от массы цемента: прочность при сжатии повысилась на 29%, при изгибе – на 23% по сравнению с контрольным составом. Данные рентгенофазового анализа показали увеличение степени гидратации алитовой фазы на 25%, а также ускоренное образование портландита и этtringита. Неразрушающий контроль подтвердил, что к 7 суткам твердения прирост прочности на сжатие составил 25%, что свидетельствует об интенсификации структурообразования. Эффект объясняется равномерным распределением УНТ и механохимической активацией поверхности цементных зёрен в ЛИВ-100. **Выводы.** Введение углеродных нанотрубок «Таунит-М» в сочетании с суперпластификатором «СП-3» и использование линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100 позволяет существенно повысить прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Прирост прочности коррелирует с ускорением гидратации и изменением фазового состава цементного камня. Оптимальной является концентрация УНТ 0,005% от массы цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наномодификатор, мелкозернистый бетон, линейно-индукционный вращатель, суперпластификатор

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Данная научная работа выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Перфилов В.А., Ляшенко Д.А., Богданов А.И. Анализ гидратационных процессов бетонной смеси при введении наномодификатора методом электромагнитной активации. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(4):555–564. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-555-564>. – EDN: RJNEZX.

Analysis of hydration processes in concrete mixtures modified by the introduction of a nanomodifier by electromagnetic activation

Vladimir A. Perfilov , Dmitry A. Lyashenko* , Artem I. Bogdanov 

Volgograd State Technical University, 400074, Volgograd, Akademicheskaya str., 1, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: caf_ngs@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Traditional Portland cement-based concretes are characterized by low flexural tensile strength and a tendency to crack formation. One of the promising ways to solve this problem is the use of carbon nanotubes, which act as crystallization centers and provide discrete reinforcement of the material at the nanoscale. The aim of the work is to experimentally confirm the effectiveness of using a nanomodifier based on CNT "Taunit-m" in the composition of fine-grained concrete. **Materials and methods.** M500D0 Portland cement was used as a binder, sand from the Pescovatsky quarry was used as a fine filler, and crushed stone of 5–20 mm fraction was used as a coarse filler. The complex additive included the superplasticizer "SP-3" and CNT "Taunit-M." Nanotubes were introduced into a dry cement-sand mixture using a linear induction rotator liv-100, which provides homogenization and mechanochemical activation. The phase composition was studied using a Bruker d8 Advance diffractometer. **Results and discussion.** It was found that the maximum increase in strength was achieved with a CNT content of 0.005% of the cement weight: compressive strength increased by 29%, bending strength increased by 23% compared with the control composition. X-ray phase analysis data showed a 25% increase in the degree of hydration of the lithic phase, as well as accelerated formation of portlandite and ettringite. Non-destructive testing confirmed that by the 7th day of hardening, the increase in compressive strength was 25%, which indicates an intensification of structure formation. The effect is explained by the uniform distribution of CNTs and the mechanochemical activation of the surface of cement grains in LIV-100. **Conclusion.** The introduction of carbon nanotubes "Taunit-m" in combination with superplasticizer "sp-3" and the use of linear induction rotator liv-100 can significantly improve the strength characteristics of fine-grained concrete. The increase in strength correlates with an acceleration of hydration and a change in the phase composition of the cement stone. The optimal concentration of CNT is 0.005% by weight of cement.

KEYWORDS: nanomodifier, fine-grained concrete, linear induction rotator, superplasticizer

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: This research was carried out with the support of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University".

FOR CITATION:

Perfilov V.A., Lyashenko D.A., Bogdanov A.I. Analysis of hydration processes in concrete mixtures modified by the introduction of a nanomodifier by electromagnetic activation. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(4):555–564. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-555-564>. – EDN: RJNEZX.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением исследования модифицирования бетонных материалов является улучшение его физико-механических свойств, в частности за счет целенаправленного модифицирования структуры бетона. Актуальным направлением является разработка бетонов с повышенными прочностными характеристиками за счет оптимизации состава путем применения различных добавок модификатором, а также снижение количества цементного вяжущего. При этом известны исследования модифицирования структуры бетона как на микро-, так и на макроуровне. К последним можно отнести применение таких нанодобавок, как нанокремнезем, углеродные материалы различных модификаций (астралены,

фуллерены, различные модификации углеродных нанотрубок), шлак и др. [1–4].

Исследователи отмечают, что введение наномодифицирующих добавок позволяет влиять на процессы гидратации вяжущего за счет физического либо химического воздействия на наноразмерном порядке [5–8].

Углеродные наномодификаторы имеют различия по размерам и по аллотропной форме наночастиц с уникальными структурами и свойствами.

Фуллерены — молекулярные соединения в виде выпуклых замкнутых многогранников (сфер или эллипсоидов), состоящих из четного числа трехкоординированных атомов углерода. Диаметр молекулы таких добавок составляет около 0,7 нм, а диаметр внутренней полости — около 0,5 нм [9].

Астралены — многослойные полиэдральные структуры из атомов углерода размером 80–150 нм. Состоят из больших плоских графитовых граней, соединенных ребрами преимущественно пятиугольной формы. Грани содержат 20–50 плоских графеновых листов, расстояние между которыми — около 0,34 нм. Средний размер плоских граней — около 15 нм [10].

Углеродные нанотрубки — полые наноскопические цилиндры, полученные сворачиванием плоской гексагональной сетки графита. Могут быть одностенными или многостенными (концентрические трубки). Диаметр одностенных нанотрубок — 1,1–1,4 нм, многостенных — 2–20 нм. Длина — от 2 до 4 мкм. Концы трубок могут быть закрытыми или открытыми [11].

Множеством авторов исследовано влияние различного вида углеродных нанодобавок [12–15]. Исходя из структуры таких модификаторов применительно к модифицированию гидратационных процессов цементного камня можно сделать вывод, что наиболее оптимальной формой являются полые углеродные нанотрубки. Это связано с тем, что добавка выступает в качестве дополнительных центров кристаллизации. Следовательно, именно полая и вытянутая форма обеспечивает большую площадь для новообразований, что также обеспечивает более плотный кристаллизационный каркас при твердении вяжущего с образованием основных минералов цементного камня как на внешней, так и на внутренней поверхности нанотрубок.

Помимо описанных структурных особенностей, углеродсодержащие добавки демонстрируют исключительные физико-механические параметры, в частности предел прочности при растяжении, который превышает 60 ГПа.

Известными недостатками традиционных бетонов на портландцементном вяжущем является невысокая прочность при растяжении на изгиб и малая деформационная стойкость, которая провоцирует трещинообразование. Начало разрушений в бетонной матрице, как правило, происходит на наноуровне. Так, в структуре начинают возникать микроскопические дефекты, которые способны расширяться и объединяться в более крупные под действием механической нагрузки. Следовательно, воздействие на процессы трещинообразования именно в наноразмерном порядке является перспективным методом повышения прочности бетонных материалов.

Согласно данным [16], введение углеродных нанотрубок в цементное вяжущее способствует образованию кристаллогидратных фаз с повышенной плотностью и прочностью за счет увеличения гидратационной способности основных минералов цементного камня. Введение углеродных нанотрубок в качестве дискретно армирующего компонента бетона

позволяет повысить прочностные характеристики материала до 50% в сравнении с традиционными составами.

Согласно данным [17–19], оптимальное содержание УНТ в составе бетона находится в пределах 0,001–0,01% по массе цемента, в зависимости от типа нанодобавки. При таком низком содержании нанотрубки служат центрами кристаллизации. На их поверхности образуются зародыши вытянутых кристаллов. По мере роста кристаллы переплетаются и формируют пространственный каркас, который обеспечивает целостность цементной матрицы.

Несмотря на положительное действие таких добавок на свойства бетонных композиций, конкретных технологических составов до сих пор нет. Отсутствие стандартизированных рецептур и разработанных технологических решений сдерживает возможность промышленного применения наномодификаторов в качестве добавок для бетонов.

Таким образом, для практического применения наномодификаторов в бетонах необходимо произвести разработку и исследование экспериментальных составов, а также оптимизировать технологии приготовления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве вяжущего был использован портландцемент М500Д0 «Евроцемент» (АО «Евроцемент групп»). В качестве мелкого заполнителя был использован песок Песковатского карьера (ООО «Партнер групп»). В работе использовали щебень фракции 5–20 мм, поставляемый ООО «Калининский щебеночный завод».

Модифицирование цементной системы осуществлялось путем совместного введения добавок: суперпластификатора «СП-3» (ООО «Полипласт Новомосковск») и углеродных нанотрубок марки «Таунит-М» (производство ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов). Указанные нанотрубки морфологически представляют собой полые цилиндры, образованные одним либо несколькими концентрическими слоями атомов углерода.

Экспериментальные данные были получены с помощью современных методов и приборов, относящихся как к разрушающему, так и к неразрушающему контролю. Прочностные свойства бетона оценивались в соответствии с ГОСТ 10180. Оценка интенсивности набора прочности производилась неразрушающим методом контроля, с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 1.2» («Интерприбор», Россия), согласно ГОСТ 17624.

Для выявления структурных изменений, вызванных введением добавок, применялся рентгеноструктурный анализ на дифрактометре «Bruker D8

Advance». Фазовый состав цементного камня определялся расшифровкой полученных дифрактограмм с использованием программного пакета Diffraс. EVA (версия 4.2.1) с лицензионной базой данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data). Съемку вели в $\text{CuK}\alpha$ -излучении (длина волны $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$) при следующих параметрах: напряжение на трубке 40 кВ, анодный ток 25 мА, экспозиция 0,7 с на точку, шаг сканирования $0,02^\circ$.

Для достижения равномерного распределения малой концентрации наноразмерного компонента в объеме сухой цементно-песчаной смеси использовался линейно-индукционный вращатель марки «ABC-100». Принцип работы оборудования заключается в преобразовании электромагнитного воздействия в механическую энергию, направленную на движение мелющих тел. Полость рабочей камеры располагается в центре электромагнитного поля. В качестве мелющих тел были использованы ферромагнитные тела с диаметром 0,5–1 мм и длиной 5–10 мм. Произведена оценка оптимального количества мелющих тел, которое составляет 10% от массы обрабатываемой смеси [20, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Произведена оценка влияния комплексной добавки (СП-3 + нанотрубки «Таунит-М») на прочность мелкозернистого бетона. Наномодификатор вводили с помощью линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100. Для исследований использовались образцы-балочки с размерами $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$. Были изготовлены контрольные образцы, а также 10 составов, где менялась концентрация УНТ от 0,001% до 0,01% от массы цемента.

В камеру ЛИВ загружали цемент, песок, суперпластификатор в сыпучем виде, нанодобавку в количестве 0,01–0,001% по массе цемента и ферромагнитные мелющие тела. Обработка смеси во вращающемся слое осуществляется в течение двух минут. Это обеспечивало активацию и перемешивание. Соотношение цемента и песка в смеси составляло 1:3, В/Ц = 0,38, концентрация пластификатора составила 0,5% по массе цемента.

Изменение прочности при сжатии отслеживали на временном отрезке от 1 до 28 суток включительно, используя неразрушающую методику ультразвуковой диагностики на приборе «Пульсар 1.2». Предельные величины прочности на сжатие, а также на изгиб по достижении 28-суточного возраста фиксировали с помощью гидравлических прессов. Результаты полученных данных представлены в таблице 1.

Сравнительный анализ прочностных характеристик бетонных образцов, модифицированных нанотрубками с помощью линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100, выявил положительное влияние введения таких добавок на прочность материала. Так, для состава № 2 зафиксировано увеличение сопротивления сжатию и растяжению при изгибе на 24% и 12% соответственно по отношению к контрольным составам. Для состава № 11 указанные показатели достигали 29% (сжатие) и 23% (изгиб), что является максимальным приростом среди всех рассмотренных вариантов.

Данные неразрушающего контроля, полученные с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 1.2», свидетельствуют о неравномерной интенсивности набора прочности во времени. В первые 24 часа твердения различия между модифицированными и эталонными образцами не превышали в среднем 7%.

Таблица 1. Показатели прочности мелкозернистого наномодифицированного бетона

№	Кол-во УНТ, % по массе цемента	Прочность, МПа					
		1 сут.	3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.	
		$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{изг}}$
1	–	14,6	24,8	41,2	42,8	45,3	6,1
2	0,001	17,6	31,8	51,9	55,3	59,2	6,5
3	0,002	16,1	30,1	51,2	56,9	59,7	7,0
4	0,003	15,8	33,9	55,7	60,3	61,3	7,0
5	0,004	20,0	34,2	56,3	60,6	62,8	6,5
6	0,005	19,7	35,8	56,4	59,4	62,3	7,0
7	0,006	19,4	35,8	55,4	58,6	61,5	7,3
8	0,007	18,4	31,2	54,2	58,8	62,1	7,1
9	0,008	20,6	37,3	57,8	61,2	62,6	7,5
10	0,009	21,0	34,3	56,8	61,1	63,3	7,5
11	0,01	19,0	34,8	55,3	60,2	63,9	7,5

Однако к седьмым суткам наблюдалось значительное расхождение: увеличение прочности на сжатие достигло 25%, что подтверждает ускорение структурообразования под действием введенных добавок.

Таким образом, применение исследуемой наномодифицирующей добавки не только обеспечивает повышение предельных механических показателей затвердевшего бетона, но и сокращает продолжительность начального этапа твердения.

Выявленное улучшение характеристик можно объяснить двумя факторами, обусловленными применением ЛИВ-100. С одной стороны, использование режима вихревого вращающегося слоя позволяет добиться гомогенизации смеси на уровне, не достижимом при иных методах смешивания, что критически важно при работе с малыми концентрациями углеродных нанотрубок. С другой стороны, в процессе обработки возникает механохимический эффект: многократные соударения зерен цемента с ферромагнитными мелющими телами приводят к активации поверхности вяжущего, что дополнительно улучшает гидратационные процессы.

Фазовый состав эталонного и наномодифицированного цементного камня анализировался рентгенодифрактометрическим методом. Процесс гидра-

тации цемента исследовали на образцах в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Степень гидратации рассчитывается по формуле [22]:

$$C_{г(C3S)} = \left(1 - \frac{I_{\text{мод}}}{I_0}\right) \cdot 100, \%,$$

где $I_{\text{мод}}$ – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75 \text{ \AA}$ фазы $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) образцов, модифицированных добавками в разные сроки твердения; I_0 – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75 \text{ \AA}$ фазы $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) исходного цемента.

Согласно ранее проведенным исследованиям, для оценки изменения интенсивности гидратации цемента были приготовлены образцы с содержанием УНТ в количестве 0,001, 0,005, 0,01% по массе цемента и контрольный состав без применения наномодификатора. Полученные данные приведены в таблице 2 и на рисунке 1.

В первые семь суток твердения образцов в нормальных условиях различия между контрольным составом без наномодификатора по скорости гидратационных процессов оказались незначимыми. Введение углеродных нанотрубок в количестве 0,005%

Таблица 2. Степень гидратации цемента

№	Добавка УНТ, % по массе цемента	Степень гидратации				
		1 сут.	3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	–	36,1	43,2	57,0	60,0	60,7
2	0,001	37,1	45,1	59,2	66,4	67,7
3	0,005	38,6	51,1	61,6	67,1	66,7
4	0,01	41,0	48,3	58,0	66,1	66,1

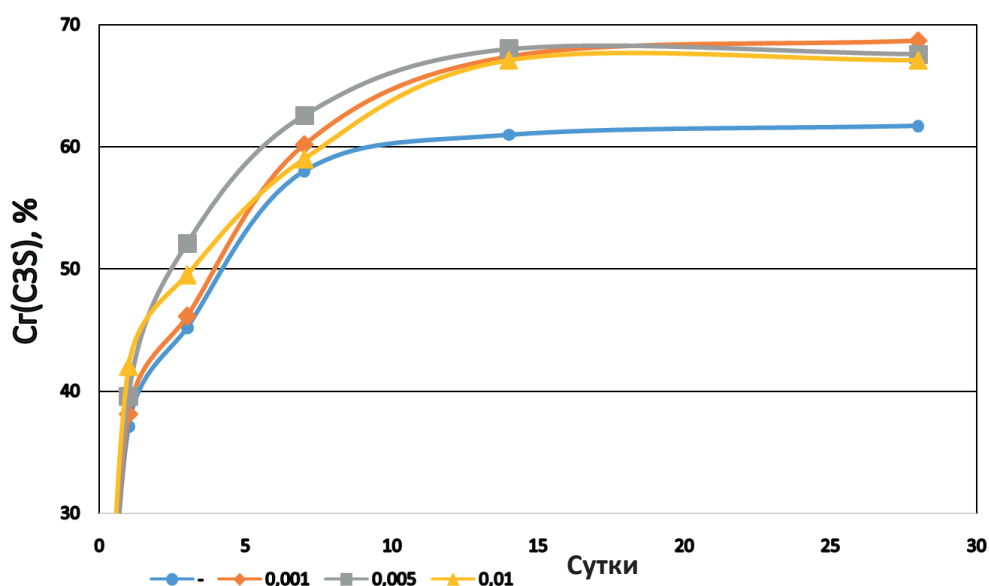


Рис. 1. Степень гидратации цемента

(образец № 3) позволило достичь увеличения степени гидратации цемента уже на начальном этапе твердения на 7%. После 28 суток твердения для всех образцов степень гидратации алитовой фазы возросла более чем на 20%.

При идентификации фазового состава цементного клинкера за эталон были приняты рентгенограммы минералов, обычно присутствующих в его составе. Ориентиром служили наиболее интенсивные дифракционные линии, при этом допустимое расхождение экспериментальных и эталонных значений межплоскостного расстояния d не превышало $\pm 1\%$. В перечень анализируемых минеральных фаз вошли трехкальциевый силикат ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, обозначение C_3S), двухкальциевый силикат ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S), трехкальциевый алюминат ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A), четырехкальциевый алюмоферрит ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF), а также портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

На экспериментально полученной дифрактограмме максимальной интенсивностью характеризуется рефлекс с углом дифракции $2\theta = 32,54^\circ$, которому соответствует межплоскостное расстояние $d = 2,73 \text{ \AA}$. Данное отражение принадлежит фазе C_3S . Сопоставление всех остальных линий трехкальциевого силиката с эталонной рентгенограммой обнаружило их полную идентичность, что служит убедительным доказательством присутствия алита (C_3S) в качестве одной из доминирующих фаз цементного клинкера. Второй по интенсивности рефлекс зафиксирован при $2\theta = 32,71^\circ$ ($d = 2,77 \text{ \AA}$) и отнесен к фазе C_2S , поскольку совокупность остальных линий данного соединения также демонстрирует хорошее согласование

с эталонными данными. Совокупность рефлексов с более низкой интенсивностью идентифицирована как принадлежащая эттрингиту (C_2A), четырехкальциевому алюмоферриту (C_4AF) и портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Суммируя вышеизложенное, анализируемый образец включает в свой состав следующие фазы: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Для оценки фазового состава были получены дифрактограммы для цементного вяжущего (рис. 2), для цементного камня без наномодификатора (рис. 3), а также для цементного камня с различной концентрацией УНТ (рис. 4, 5, 6). Данные были получены для различных сроков твердения.

Расшифровка дифрактограммы, приведенной на рисунке 2, позволила установить, что доминирующими фазами цементного вяжущего являются две кристаллические модификации силикатов кальция: трехкальциевый силикат (алит) состава $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$ – Natrurite (моноклинная сингония, карточка PDF 01-070-8632) и двухкальциевый силикат (белит) Ca_2SiO_4 – Larnite (также моноклинная сингония, карточка PDF 01-070-0388). Помимо указанных соединений в образце детектированы алюмоферрит кальция $\text{CaAl}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{O}_{2,5}$ – Brownmillerite, кристаллизующийся в орторомбической сингонии (карточка PDF 01-072-8039), а также полуводный гипс $\text{CaSO}_4\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – Bassanite (моноклинная сингония, карточка PDF 01-074-2787). Количественная оценка, выполненная методом корундовых чисел, показала, что суммарное содержание алита и белита в исследуемом вяжущем превышает 80%, тогда как

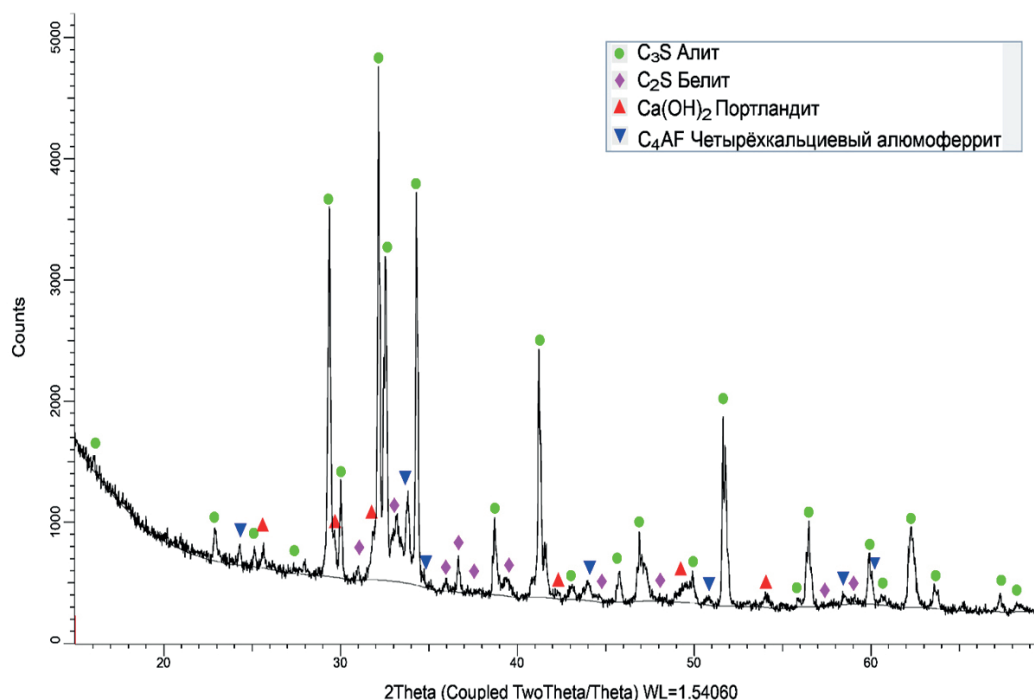


Рис. 2. Дифрактограмма исходного цементного вяжущего

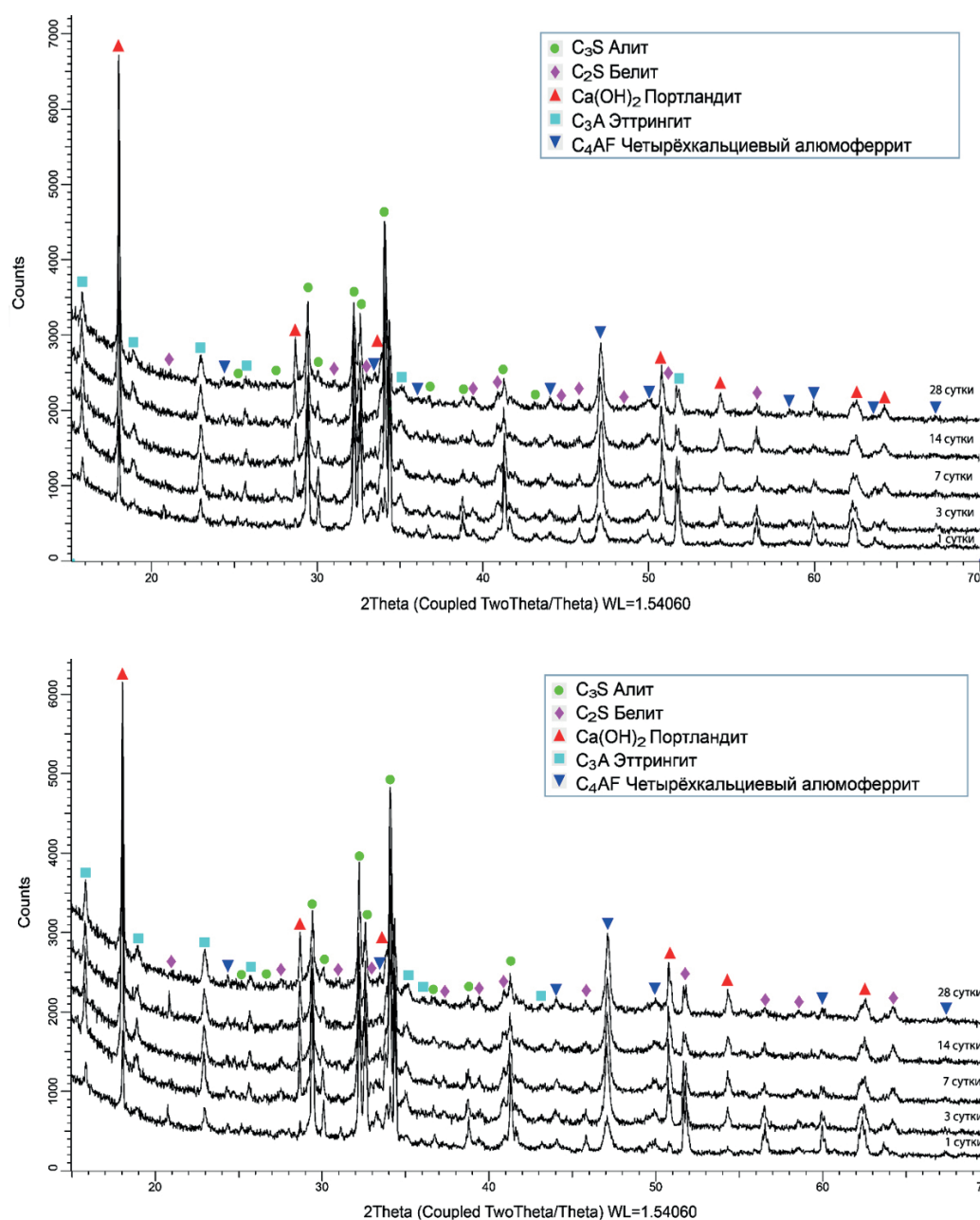


Рис. 3. Дифрактограммы цементного камня без наномодификатора на различных сроках твердения

Рис. 4. Дифрактограммы цементного камня с УНТ 0,001% на различных сроках твердения

доля алюмоферрита составляет 7%, а полуводного гипса – порядка 10%.

На рисунках 3–6 показаны дифрактограммы цементного камня в разные сроки твердения. Уже в первые сутки состав образца заметно меняется, что подтверждает начало гидратации. На дифрактограммах появляются пики, соответствующие портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и эттрингиту $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{26}$ (оба соединения имеют гексагональную структуру, карточки PDF 00-0444-1481 и 01-075-7554). Одновременно исчезают пики полуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. С увеличением срока твердения происходит изменение количественного соотношения между фазами, при этом их качественный состав

остается постоянным: содержание алито-белитовой составляющей снижается, тогда как доля портландита, эттрингита и алюмоферрита кальция возрастает. В абсолютном выражении максимальный прирост демонстрирует портландитовая фаза. Введение наномодифицирующих добавок дополнительно интенсифицирует указанные количественные сдвиги, что подтверждает ускорение гидратации цемента.

Таким образом, получены убедительные доказательства влияния углеродных нанотрубок на степень гидратации цемента. Присутствие нанодобавки в составе вяжущего способствует росту прочностных характеристик бетона. Экспериментально установлено, что в образцах, модифицированных УНТ,

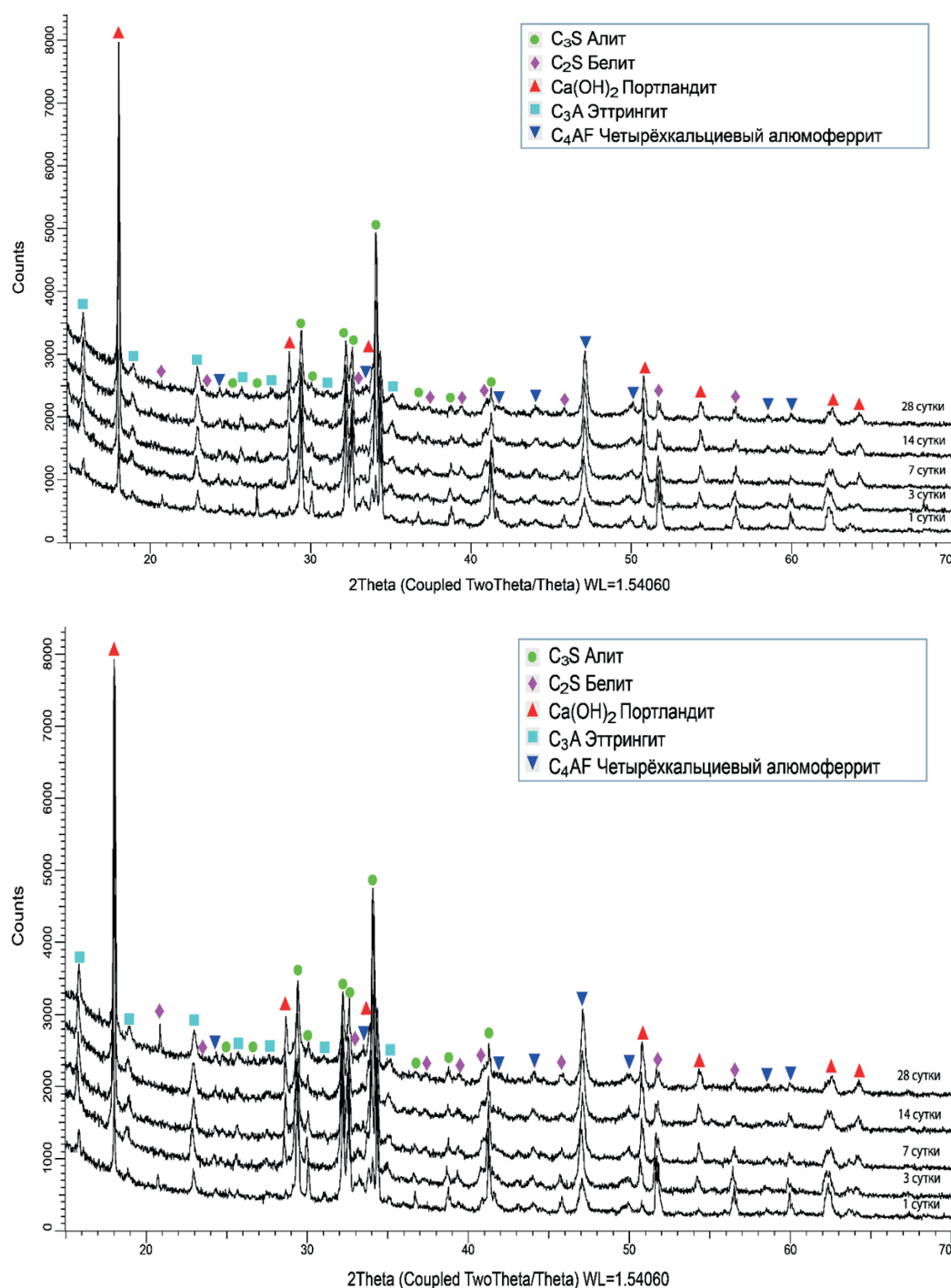


Рис. 5. Дифрактограммы цементного камня с УНТ 0,005% на различных сроках твердения

Рис. 6. Дифрактограммы цементного камня с УНТ 0,01% на различных сроках твердения

начиная с первых суток твердения регистрируется более высокая степень гидратации по сравнению с немодифицированным цементным камнем. Прирост степени гидратации алитовой фазы для всех исследованных составов превысил 20%, причем максимальное значение этого показателя (25%) достигнуто при содержании углеродных нанотрубок 0,005% от массы цемента. Помимо этого, фазовый анализ выявил устойчивую тенденцию к увеличению содержания портландита в модифицированных об-

разцах относительно контрольного (немодифицированного) состава. Совокупность описанных количественных изменений фазового состава бетона приводит к уплотнению упаковки частиц в локальных областях, подвергшихся наномодифицированию. Указанные структурные изменения, в свою очередь, обуславливают повышение прочностных характеристик материала при введении УНТ (таблица 1). Зафиксированный рост прочности на ранних этапах твердения наномодифицированных бетонов может

быть также объяснен возрастанием степени гидратации и более интенсивным образованием минеральных фаз цементного клинкера в начальный период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы, объединяющие результаты физико-механических испытаний и данные рентгеноструктурного анализа.

Установлено, что введение углеродных нанотрубок марки «Таунит-М» в сочетании с суперпластификатором «СП-3» обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик мелкозернистого бетона. При использовании линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100 для введения наномодификатора минимальный прирост прочности при сжатии и изгибе составил 24% и 12% соответственно, тогда как максимальный достиг 29% и 23% относительно эталонного состава.

Данные рентгеновской дифрактометрии показали, что повышение прочностных показателей напрямую коррелирует с ускорением гидратационных процессов. Начиная с первых суток твердения в образцах, модифицированных УНТ, зафиксирована более высокая степень гидратации по сравнению с немодифицированным цементным камнем. Прирост степени гидратации алитовой фазы (C_3S) для всех исследованных составов превысил 20%, достигнув максимального значения 25% при содержании УНТ 0,005% от массы цемента.

Совместный анализ прочностных и структурных данных выявил устойчивую закономерность: увеличение степени гидратации сопровождается пропорциональным ростом прочности бетона. В частности, для образцов с содержанием УНТ 0,005% зафиксировано как максимальное ускорение гидратации (прирост степени гидратации на 7% к первым суткам и более 20% к 28 суткам), так и наиболее выраженное повышение прочностных характеристик (до 29% для прочности при сжатии и 23% для прочности при изгибе).

С помощью метода рентгенофазового анализа подтверждено, что введение углеродных нанотрубок интенсифицирует количественное изменение фазового состава цементного камня: снижение содержания алито-белитовой составляющей сопровождается ускоренным возрастанием доли портландита, этtringита. Именно эти структурные изменения лежат в основе уплотнения упаковки частиц в зонах наномодифицирования, что, в свою очередь, обеспечивает достигнутый прирост прочности.

Установлено, что использование линейно-индукционного вращателя ЛИВ-100 позволяет не только равномерно распределить малое количество УНТ по объему смеси, но и создает механохимический эффект активации поверхности цементных зерен. Следствием этого является ускорение гидратации на ранних сроках твердения, что подтверждается данными неразрушающего контроля (прирост прочности на сжатие к 7 суткам достиг 25%) и дифрактометрическими измерениями (увеличение степени гидратации алитовой фазы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Страхова Н.А., Утегенов Б.Б., Белова Н.А., Кортовенко Л.П. Композиционные материалы специального назначения. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2020;2(32):12–15. — EDN: WDFXTE
2. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Кузьмин Е.О., Рыльцова И.Г., Губарева Е.Н., Баскаков П.С. Технологии золь-гель синтеза нанокремнезема как модификатора материалов на основе цемента. Форсайт-анализ. *Строительные материалы*. 2023;3:43–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-43-72> — EDN: RKEAGJ
3. Сухно И.В., Бузько В.Ю. Углеродные нанотрубки. *Краснодар: изд-во КубГУ*. 2008;55.
4. Талантова К.В. Строительные конструкции с применением композиционных материалов на основе бетона. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2025;22:206–214. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-1-206-214> — EDN: VQXZYM
5. Буракова Е.А., Бураков А.Е. Синтез и применение углеродных наноматериалов: лабораторные работы. *Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*. 2012;32.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах. *Вестник МГСУ*. 2013;6:100–108. — EDN: QGRYUL
7. Морарь С.Р., Аманова Б.Н. Анализ и перспективы применения нанобетонов. *In The World Of Science and Education*. 2025;15:33–37.
8. Страхова Н.А., Утегенов Б.Б., Белова Н.А., Кортовенко Л.П. Композиционные материалы специального назначения. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2020;2(32):12–15. — EDN: WDFXTE
9. Хасанова Г.А., Талипбек Кызы А., Касымов К.П., Толоков К.К., Тагаев М.М. Технология получения композитного наноструктурированного материала на основе природных ресурсов КР. *Бюллетень науки и практики*. 2024;2:369–377. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/99/35> — EDN: AYQLID

10. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок. *Construction materials*. 2016;9:68–72. — EDN: WMSCBJ
11. Саркисов Ю.С.О., Копаница Н.О., Касаткина А.В. О некоторых аспектах применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012;4:226–234. — EDN: PJEVQT
12. Ткачев А.Г., Слдозян Р.Д.А., Михалева З.А., Толчков Ю.Н. Оценка влияния модификатора на основе углеродных нанотрубок с сурфактантами на физико-механические характеристики строительных композитов. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2019;25;4:660–670. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2019.04.pp.660-670> — EDN: ZPGQXF
13. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Розина В.Е., Буянтуев С.Л., Бардханов С.П. Базальтофибробетон с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами с применением нанодисперсных модификаторов. *Вестник ИргТУ*. 2014;11(94):175–180. — EDN: TALHSJ
14. Hou P., Kawashima S., Kong D., David Corr., Qian J., Shah S.P. Modification effects of colloidal nano SiO₂ on cement hydration and its gel property. *Composites, Part B*. 2013;45:440–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.056>
15. Ramezani M., Dehghani A., Sherif M.M. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*. 2022;315:125100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125100> — EDN: NHJPFH
16. Жданок С.А., Леонович С.Н., Полина Е.Н. Синергетическое влияние наночастиц SiO₂ и углеродных нанотрубок на свойства бетона. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022;66;1:109–12. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112> — EDN: CTZJVT
17. Толчков Ю.Н. Анализ структурных параметров углеродных наноматериалов «Таунит» методом комбинационного рассеяния света. *Материаловедение*. 2022;10:38–47. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2022-0-10-38-47> — EDN: GOWGAW
18. Яковлев Г.И., Гинчицкая Ю.Н., Кизиневич О., Кизиневич В., Гордина А.Ф. Влияние дисперсий многослойных углеродных нанотрубок на физико-механические характеристики и структуру строительной керамики. *Строительные материалы*. 2016;8:25–29. — EDN: WMSBPB
19. Dag S., Ozturk Y., Ciraci S., Yildirim T. Adsorption and dissociation of hydrogen molecules on bare and functionalized carbon nanotubes. *Phys. Rev. B*. 2005;72(15):155–404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.155404>
20. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние механической активации цементной суспензии на физико-технические свойства цементных композиций. *Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса*. Белгородский государственный технологический университет. Белгород. 2017:797–805.
21. Wang L., Tan X. Preparation and properties of alkali activated foam cement reinforced with poly-propylene fibers. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. 2011;26(5):960–964. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0345-7>
22. Артамонова О.В., Славчева Г.С. Метод рентгеновской дифракции в материаловедении строительных материалов и наноматериалов: учеб. пособие *Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»*, 2018:104. — EDN: ZAJVML

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Перфилов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовые сооружения», Волгоградский государственный технический университет, 400074, Волгоград, ул. Академическая, д. 1, Российская Федерация, vladimirperfilov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9196-7572>

Ляшенко Дмитрий Александрович – старший преподаватель кафедры «Нефтегазовые сооружения», Волгоградский государственный технический университет, 400074, Волгоград, ул. Академическая, д. 1, Российская Федерация, caf_ngs@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6688-0293>

Богданов Артем Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и композиционные материалы», Волгоградский государственный технический университет, 400005, Волгоград, просп. имени В.И. Ленина, д. 28, Российская Федерация, bogdanov@vstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3918-775X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Перфилов В.А. – научное руководство, разработка концепции исследования, написание исходного текста.

Ляшенко Д.А. – литературный обзор, реализация эксперимента и обработка его результатов, в том числе с применением цифровых методик, промежуточные выводы, адаптация методологии к задачам исследования, написание текста статьи.

Богданов А.И. – реализация эксперимента и обработка его результатов, в том числе с применением цифровых методик, аналитическая обработка литературного обзора, аналитическая обработка литературного обзора и текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.06.2026; одобрена после рецензирования 09.08.2026; принята к публикации 17.08.2026.