


## Инновационный метод усиления и реконструкции фундаментов зданий и сооружений нанокompозитными составами

Марина Ивановна Панфилова<sup>1</sup> , Николай Иванович Зубрев<sup>2</sup> , Маргарита Анатольевна Журавлева<sup>2</sup> , Иван Владимирович Шилов<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Российская Федерация

<sup>2</sup> Российский университет транспорта, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: ishilov2004@gmail.com

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальной проблемой на сегодняшний день является определение рационального состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов и усиления фундаментов зданий и сооружений, подлежащих реновации, без ударных, вибрационных и механических воздействий. **Целью** исследования является обоснование возможности применения композитного раствора, модифицированного добавкой АНТ для повышения устойчивости фундаментов. **Методы и материалы.** Для усиления грунтов для повышения устойчивости фундаментов зданий проводят инъектирование композитными растворами на различной основе. В композитных инъекционных растворах, кроме основного компонента – цемента, используются различные добавки, способные ускорять структурообразование и снижать его расход в рецептуре. К таким добавкам можно отнести алюмосиликатные нанотрубки. **Результаты.** В результате проведенных экспериментов выявлено значение оптимальной концентрации наноалюминийсодержащей добавки, которая максимально увеличивает прочность композитной системы. Построена аппроксимирующая плоскость, представляющая собой двухфакторную регрессионную модель экспериментальных данных, зависящая от времени и концентрации, представляющая собой полином со степенью по  $x$ , равной 5, а по  $t$ , равной 3. Данные реализованы в программе MathWorks MATLAB. **Обсуждение.** Установлено, что максимальная скорость структурирования композитной системы имеет место при добавке 0,125% АНТ. Появление такого эффекта можно объяснить образованием новой фазы цементного камня, обладающей повышенной адгезией. **Заключение.** Можно сделать вывод, что введение в композитный раствор оптимальной концентрации добавки алюмосиликатной нанотрубки позволит использовать его в качестве композитного раствора для повышения устойчивости фундаментов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инъекционный раствор, композитная система, аппроксимирующая плоскость, двухфакторная регрессионная модель, алюмосиликатные нанотрубки, модифицированный бентонит, структурообразование, прочность, жидкое стекло

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Панфилова М.И., Зубрев Н.И., Журавлева М.А., Шилов И.В. Инновационный метод усиления и реконструкции фундаментов зданий и сооружений нанокompозитными составами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):341–348. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-341-348>. – EDN: NHBVJE.

# Innovative method for strengthening and reconstructing foundations of buildings and structures with nanocomposite

Marina I. Panfilova<sup>1</sup> , Nikolai I. Zubrev<sup>2</sup> , Margarita A. Zhuravleva<sup>2</sup> , Ivan V. Shilov<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, 26 Yaroslavskoe Shosse, Russian Federation

<sup>2</sup> Russian University of Transport, 127994, Moscow, 9 Obraztsova St., bldg. 9, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: ishilov2004@gmail.com

## ABSTRACT

**Introduction.** An urgent problem today is determining the rational composition of an injection solution to improve the quality of soil stabilization and strengthening of foundations of buildings and structures subject to renovation, without impact, vibration, and mechanical effects. The aim of the study is to substantiate the possibility of using a composite solution modified with an ANT additive to increase the stability of foundations. **Methods and materials.** To strengthen soils to increase the stability of building foundations, injection is carried out with composite solutions based on various materials. In composite injection solutions, in addition to the main component – cement – various additives capable of accelerating structure formation and reducing its consumption in the recipe are used. Such additives include aluminosilicate nanotubes. **Results.** The value of the optimal concentration of the nano-aluminum-containing additive, which maximizes the strength of the composite system, was revealed. An approximating plane was constructed, representing a two-factor regression model of experimental data, depending on time and concentration, representing a polynomial with a degree of 5 in  $x$  and a degree of 3 in  $t$ . The data were implemented in the MathWorks MATLAB program. **Discussion.** It was found that the maximum structuring rate of the composite system occurs at an additive content of 0.125% ANT. The appearance of this effect can be explained by the formation of a new phase of cement stone with increased adhesion. **Conclusion.** The introduction of the optimal concentration of aluminosilicate nanotube additive into the composite solution allows it to be used as a composite solution to increase the stability of foundations.

**KEYWORDS:** injection solution, composite system, approximating plane, two-factor regression model, aluminosilicate nanotubes, modified bentonite, structure formation, strength, liquid glass

## FOR CITATION:

Panfilova M.I., Zubrev N.I., Zhuravleva M.A., Shilov I.V. Innovative method for strengthening and reconstructing foundations of buildings and structures with nanocomposite. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(3):341–348. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-341-348>. – EDN: NHBVJE.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство требует использования высокопрочных и долговечных материалов, особенно при возведении фундаментов, которые являются основой любого здания. Возведение фундамента осложняется ограниченностью территории, особенностями грунта, необходимостью работы с близлежащими зданиями и выполнения работ в короткие сроки. Как опорная конструкция любого здания, фундамент испытывает огромные нагрузки, находясь под давлением всего расположенного над ним массива сооружения. Показатели прочности, несущая способность со временем ослабевают под влиянием ряда разрушающих факторов. Причин несколько, и они бывают естественной и техногенной природы. Дело доходит до разрушений целостности фундамента, разрушения

бетонной защиты. Происходит осадка, возникают трещины. Только вовремя выполненное усиление фундамента остановит вертикальное распространение трещин по стенам, нежелательные деформации в виде перекошенных оконных и дверных блоков, проваливания полов.

Необходимость проведения работ по реконструкции зданий обусловлено снижением прочности материала фундамента при эксплуатации в основном за счет увеличения нагрузок на конструкции, появления трещин в стенах или фундаменте, деформации грунтов основания, проседания грунта или изменения его свойств (например, из-за подтопления или высыхания, возведения рядом с существующим зданием нового строительного комплекса).

Технологии упрочнения фундаментов имеют различные решения из-за учета их зависимости от раз-

личных факторов. К ним относятся качество грунта, климатические условия, уровень подземных вод и сейсмичность района.

Существуют различные способы упрочнения фундаментов [1]. Наиболее перспективным из них является инъекционный метод, при котором вводят под давлением цементный раствор с различными добавками [2].

Преимуществами данного метода являются: минимальное вмешательство в конструкцию (не требуется проведение масштабных земляных работ); возможность проведения работ без остановки эксплуатации здания; высокая эффективность (инъекционные составы проникают в мельчайшие трещины и поры, обеспечивая комплексное укрепление фундамента и грунта); универсальность применения (подходит для различных типов фундаментов и грунтов); быстрота выполнения работ (занимает значительно меньше времени, чем традиционные методы реконструкции); долговечность результата (современные инъекционные составы обеспечивают длительный эффект усиления); экологичность (многие инъекционные материалы являются экологически безопасными и не оказывают негативного влияния на окружающую среду).

В настоящее время для усиления фундаментов в процессе реконструкции в инъекционные растворы вводят различные добавки на основе полимерных композиционных материалов (далее ПКМ) и различных волокон, например, углеродных [3, 4].

Так, установлено, что добавки углеродных трубок (УНТ) и ПАВ при восстановлении железобетонных конструкций приводят к повышению их трещиностойкости и повышению прочности на 115%.

Улучшение технологических параметров конструкций получено при добавках УНТ в структуру композитного бетона. Это позволяет снизить трещинообразование и повысить прочностные показатели бетона [5–8]. Для усиления эффективности использования добавок углеродных нанотрубок повышают адгезию гидрофильной матрицы бетона к гидрофобной поверхности нанотрубок путем повышения гидрофильности УНТ за счет их поверхностной модификации, обеспечивающей образование на поверхности УНТ полярных групп [9]. Такая задача решается использованием технологии жидкофазного окисления, например, в кислотной среде. Окисленные УНТ образуют стабильные дисперсии в водной среде, что позволяет достичь высокой равномерности распределения наполнителя в водной фазе и матрице [10–21].

Актуальной проблемой на сегодняшний день является определение рационального состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов и усиления фундаментов зданий

и сооружений, подлежащих реновации, без ударных, вибрационных и механических воздействий.

Технологическое качество инъекционных тампонажных растворов определяется легкой прокачкой насосами, небольшой плотностью, водо-твердым отношением, добавками пластификаторов и ускорителей твердения.

Использование инъекционного раствора определяется геологическими, гидрогеологическими условиями, технической возможностью предприятия, его эффективностью и экологической целесообразностью.

Основными компонентами инъекционного раствора используются цемент и бентонит, исполняющий роль пластификатора и стабилизатора вязкости.

Инновационное строительство предъявляет повышенные требования к используемым материалам, особенно в части их прочности, долговечности и устойчивости к внешним воздействиям. Это обусловлено как усложнением инженерно-геологических условий застройки, так и необходимостью обеспечения безопасности и надежности зданий и сооружений на протяжении всего их жизненного цикла. Фундаменты, являясь основой любого здания, воспринимают весь спектр нагрузок от вышележащих конструкций, а также испытывают постоянное воздействие грунтовых вод, сезонных перепадов температур, морозного пучения и агрессивных компонентов, содержащихся в почве. Поэтому повышение эксплуатационных характеристик фундаментных конструкций является одной из ключевых задач строительного материаловедения.

Традиционные цементные смеси, несмотря на широкое распространение и проверенную временем технологию, имеют ряд недостатков. К их числу относятся относительно низкая прочность на растяжение и изгиб, склонность к усадке и трещинообразованию, недостаточная водостойкость и подверженность коррозии в агрессивных средах. Эти ограничения снижают долговечность конструкций, требуют проведения дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ и ограничивают область применения традиционных бетонов в сложных условиях эксплуатации. В связи с этим возникает объективная потребность в модификации цементных систем с целью придания им улучшенных физико-механических и эксплуатационных свойств.

Внедрение нанотехнологий в строительные материалы открывает принципиально новые возможности для создания композиционных материалов с заданными свойствами. Наноразмерные добавки, вводимые в цементную матрицу, способны активно влиять на процессы гидратации, структурообразования и формирования контактной зоны между вяжущим и заполнителем. Благодаря высокой удель-

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ной поверхности и повышенной реакционной способности наночастицы выступают в роли центров кристаллизации, ускоряя твердение и способствуя образованию более плотной и однородной микроструктуры цементного камня. Это, в свою очередь, приводит к повышению прочностных характеристик, снижению пористости и проницаемости, а также к улучшению деформативных свойств материала. [22–24].

Известно, что введение комплексной микродисперсной добавки кристаллогидратов сульфатоалюминатного клинкера (САК) и гиперпластификатора в состав цемента не только обеспечивает повышение прочности цементного камня, но и компенсирует усадочные деформации, обеспечивая высокую трещиностойкость и долговечность камня. Расширение цементного камня даже при небольших количествах комплексной добавки обеспечивает снижение расхода расширяющейся добавки при получении напрягающих цементов, что повышает экономические показатели их производства.

Для усиления грунтов для повышения устойчивости фундаментов зданий проводят инъектирование композитными растворами на различной основе.

Для этого в грунт, находящийся около фундамента, через предварительно пробуренные отверстия вводят инъектор, через который прокачивают раствор, происходит усиление массива грунта в радиусе 0,6–1,2 м вокруг инъектора (рис. 1).

Инъекциями композитного раствора путем модифицирования свойств искусственного основания можно снизить воздействие сейсмичности на устойчивость сооружений. Такое изменение достигается за счет упрочнения структуры и сплошности цементного камня и, как следствие, повышения его устойчивости к различным деформациям.

В композитных инъекционных растворах, кроме основного компонента — цемента, используются различные добавки, способные ускорять структурообразование и снижать его расход в рецептуре. К таким добавкам можно отнести алюмосиликатные нанотрубки (АНТ).

АНТ состоят в основном из оксидов кремния и алюминия, содержание которых достигает 75%. Они представляют собой полые трубки с внутренним диаметром 15 нм и внешним около 50 нм. На внутренней поверхности скрученной в спираль стенки находится оксид алюминия с отрицательным зарядом и на внешней — оксид кремния с положительным (рис. 2).

## МЕТОДОЛОГИЯ

В работе использовали: цемент марки 500, модифицированный бентонит, АНТ и жидкое стекло.

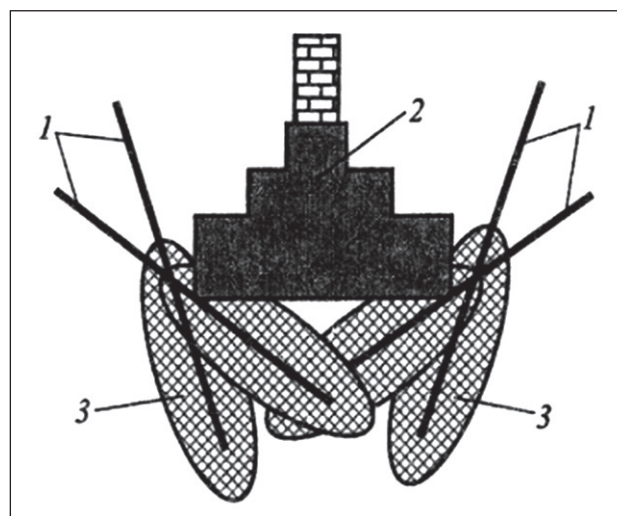


Рис. 1. Усиление фундамента. 1 – инъектор; 2 – фундамент; 3 – укрепленная зона

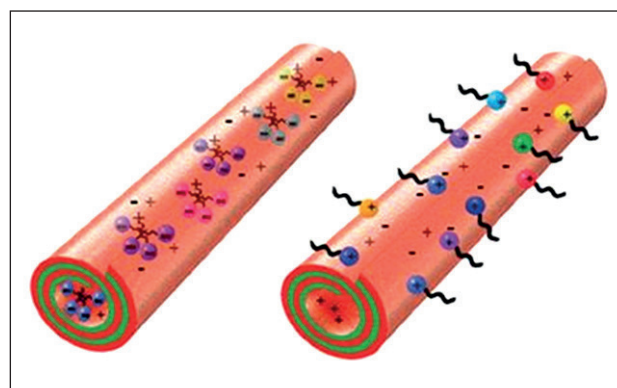


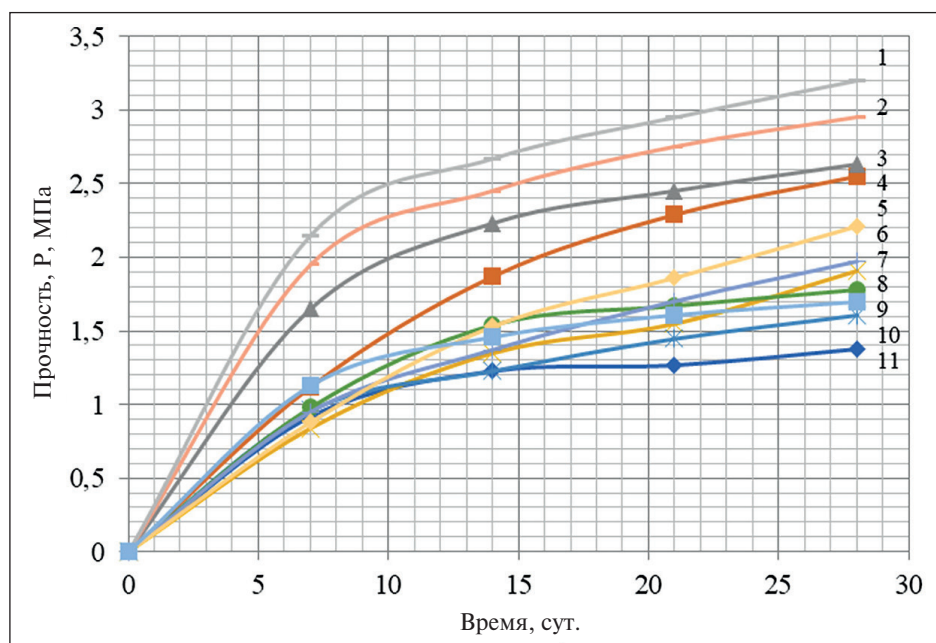
Рис. 2. Структура алюмосиликатных нанотрубок

Композитный раствор с В/Ц 2:1 готовили смешением бентонита с водой и добавками АНТ, после чего добавляли цемент и жидкое стекло. Для определения прочности смеси готовили образцы, которые извлекались из форм через сутки. Перед испытанием их хранили в помещении с температурой  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $(65 \pm 10)\%$ . Образцы извлекали из формы и путем раздавливания кубиков находили прочность на прессе Controls 50-C0050/CAL50 в течение 28 суток.

Исследовали структурообразования в композитных растворах с различным содержанием АНТ во времени. Содержание АНТ к массе цемента варьировалось от 0,000% (нулевой образец) до 0,450%.

На рисунке 3 представлено структурообразование композитного раствора с добавками АНТ при хранении с бентонитом марки П2Т<sub>2</sub>А через 1, 3, 7, 9, 14 и 28 суток хранения.

Исходя из проведенного исследования установлено, что на 7, 14, 21 и 28 суток наибольшая прочность



**Рис. 3.** Прочность композитных растворов в зависимости от продолжительности хранения при различном содержании АНТ к массе цемента, %:  
 1 – 0,125; 2 – 0,100;  
 3 – 0,150; 4 – 0,250;  
 5 – 0,080; 6 – 0,300;  
 7 – 0,075; 8 – 0,400;  
 9 – 0,006; 10 – 0,450;  
 11 – 0,000

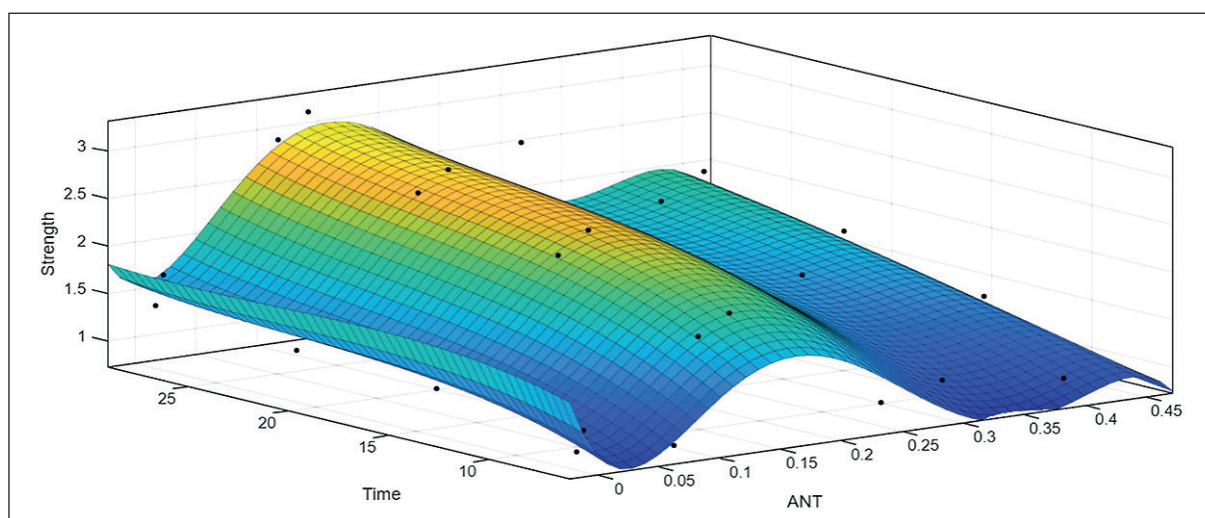
композитного раствора достигается при использовании добавок АНТ в количестве 0,125% к массе цемента.

С целью всестороннего анализа взаимосвязи между концентрацией модифицирующих добавок, продолжительностью выдержки и прочностными свойствами материала выполнена трехмерная аппроксимация экспериментальных данных. Построенная математическая модель устанавливает функциональную зависимость предела прочности  $P$  (МПа) от двух независимых переменных: массовой доли добавки АНТ  $C$  (%) и временного параметра  $t$  (сутки), что формально выражается соотношением  $P = f(C, t)$  уравнения 1.

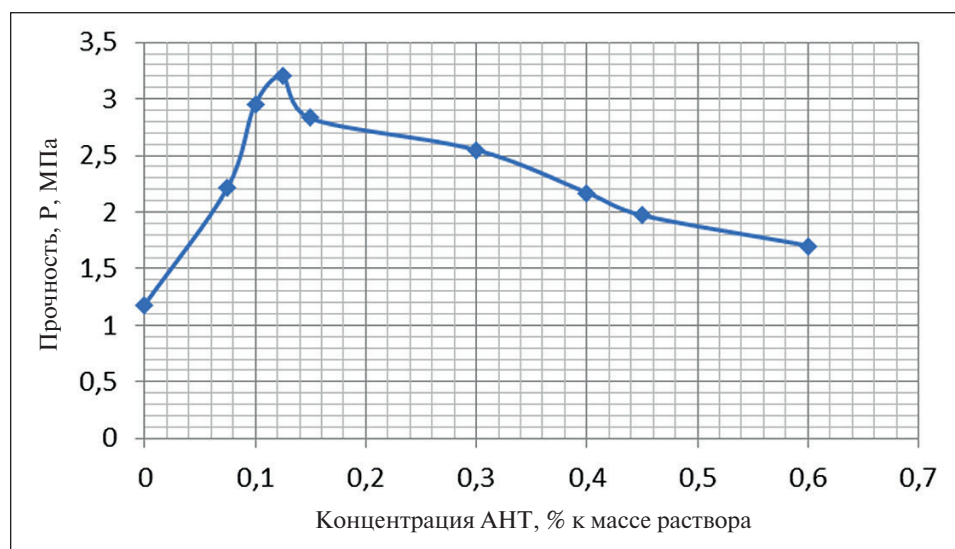
График, показанный на рисунке 4, может быть аппроксимирован следующей функцией:

$$f(x, t) = 0,2452 - 21,4025x + 0,1539t + 424,2941x^2 + 1,0078xt - 0,0071t^2 - 2,59 \times 10^3 x^3 - 3,985x^2 t - 0,0259xt^2 + 1,1558 \times 10^4 t^3 + 6,1655 \times 10^3 x^4 + 6,7885x^3 t + 0,0527x^2 t^2 + 4,5646 \times 10^{-4} xt^3 - 5,023 \times 10^3 x^5 - 9,0763x^4 t + 0,0907x^3 t^2 - 0,0016x^2 t^3. \quad (1)$$

Приведенная выше функция описывает график с достаточной точностью, на это указывает коэффициент детерминации, равный 0,72191, который говорит о том, что функция описывает график с хо-



**Рис. 4.** Прочность композитных растворов в зависимости от продолжительности хранения при различном содержании АНТ к массе цемента



**Рис. 5.** Прочность композитного раствора при различной концентрации модификатора через 28 суток

рошей точностью — она улавливает основную закономерность данных.

На основе полученных экспериментальных данных на рисунке 5 рассчитана скорость структурообразования композитного раствора для изучаемых концентраций добавок АНТ. На основе полученных данных построен график зависимости скорости структурообразования композитных растворов от содержания модификатора.

Экспериментально и графически подтверждено, что введение добавки АНТ в дозировке 0,125% от массы цемента приводит к существенному улучшению прочностных характеристик композиционного материала: прочность возрастает в 2,8 раза относительно контрольного образца без добавок. Данный эффект обусловлен комплексным воздействием добавки на процессы гидратации цемента: формирование более плотной и однородной микроструктуры цементного камня, образование дополнительных кристаллических фаз, упрочняющих матрицу [25].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что с увеличением содержания модификатора нарастание прочности композиционного материала происходит по сложной нелинейной закономерности.

Определена оптимальная концентрация АНТ, при которой прочность композитного раствора через 28 суток хранения достигает максимального значения. Она соответствует 0,125% к объему раствора. При больших и меньших концентрациях модификатора прочность композитного раствора имела тенденцию к уменьшению прочности.

Повышение прочности композитной системы, по-видимому, происходит за счет появления новой дополнительной фазы, обладающей повышенной

твердостью, обеспечивающей лучшее сцепление ее с продуктами гидратации модифицированной бентонито-цементной системы.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что модифицирование композитного раствора АНТ при нормальных условиях приводит к аномальным изменениям в структуре, повышает его прочность и изменяет кинетику структурообразования.

Приведенные решения позволяют значительно изменять структурно-механические свойства основания. Использование композитного раствора с добавкой АНТ в зависимости от глубины обработки существующего основания решит вопрос с устойчивостью фундаментов. Планируются исследования, направленные на доказательство возможности использования других техногенных отходов в рассмотренной сфере применения.

## ВЫВОДЫ

Предложенный механизм процесса структурообразования цементной матрицы композитного раствора заключается в модифицировании структуры композитного раствора АНТ с образованием новых центров кристаллизации в фазовом растворе цементного камня. В результате такого преобразования образуется композитная система с повышенной плотностью и прочностью, что позволяет использовать ее для снижения воздействия различных деформаций.

Выявлены значения оптимальной концентрации наноалюминийсодержащей добавки, которая максимально увеличивает прочность композитной системы. Аппроксимирующая плоскость, представляющая собой двухфакторную регрессионную модель экспериментальных данных, представлена на рисунке 4. Аппроксимирующая функция плоско-

сти, зависящая от времени и концентрации, представляет собой полином со степенью по  $x$ , равной 5, а по  $t$ , равной 3 (рис. 4). Эти результаты реализованы в программе MathWorks MATLAB. Установлено, что максимальная скорость структурирования композитной системы имеет место при добавке 0,125% АНТ. Появление такого эффекта можно объяснить образованием новой фазы цементного камня, обладающей повышенной адгезией.

Введение в КР оптимальной концентрации добавки АНТ позволит использовать ее в качестве композитного раствора для повышения устойчивости фундаментов.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что применение композитных растворов, модифицированных алюмосиликатными нанотрубками (АНТ), представляет собой перспективное направление в области строительного материаловедения и технологии возведения зданий и сооружений. Введение наноразмерных добавок позволяет целенаправленно влиять на процессы структурообразования цементных систем, обеспечивая формирование более плотной и однородной микроструктуры композита. Это, в свою очередь, способствует повышению прочностных характеристик материала, снижению его водопоглощения и улучшению деформативных свойств.

Полученные в работе экспериментальные данные подтверждают потенциал модифицированных композитных растворов для обеспечения долговременной надежности и эксплуатационной безопасности

зданий и сооружений. Формирование в структуре материала дополнительных кристаллических фаз, обладающих повышенной твердостью и устойчивостью к внешним воздействиям, создает предпосылки для увеличения срока службы усиленных конструкций.

Вместе с тем для полноценного внедрения разработанных составов в практику строительного производства необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение долгосрочной стабильности свойств модифицированных растворов в условиях агрессивных сред. Особого внимания заслуживают вопросы коррозионной стойкости композитов при воздействии сульфатных, хлоридных и биогенных факторов, а также оценка их морозостойкости в условиях переменного водонасыщения. Целесообразным представляется также проведение натурных испытаний опытных участков усиления фундаментов с мониторингом напряженно-деформированного состояния в течение длительного периода эксплуатации.

Кроме того, перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация составов композитных растворов с учетом экономической эффективности и экологической безопасности, включая возможность использования вторичных сырьевых ресурсов в качестве компонентов модифицирующих добавок. Решение указанных задач позволит расширить область применения разработанной технологии и обеспечить ее внедрение в практику строительства и реконструкции зданий различного назначения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коробова О.А. Усиление оснований и реконструкция фундаментов: учебное пособие. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин); 2008. 332 с.
2. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве: монография. Москва: АСВ; 2017. 266 с.
3. Бокарев С.А., Власов Г.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2010;2:222–229.
4. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Москва: Стройиздат; 2004. 139 с.
5. Coleman J.N., Khan U., Blau W.J., Gunko Y.K. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*. 2006;44:1624–1652. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038>
6. Makar J.M., Beaudoin J.J. Carbon Nanotubes And Their Application In The Construction Proceedings. *1<sup>st</sup> International Symposium on Nanotechnology in Construction Industry*. Paisley, Scotland; 2003:1–12.
7. Metaxa Z.S., Konsta-Gdoutos M.S., Shah S.P. Carbon Nanotubes Reinforced Concrete, *Nanotechnology of Concrete: The Next Big Thing is Small*. American Concrete Institute, Farmington Hills. 2009;267:11–20. <https://doi.org/10.14359/51663392>
8. Yakovlev G., Pervushin G., Maeva I. et al. Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Procedia Engineering*. 2013;57:407–413. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.053>
9. Бурмистров И.Н., Ильиных И.А., Мазов И.Н. и др. Физико-механические свойства композитных бетонов, модифицированных углеродными нанотрубками. *Современные проблемы науки и образования*. 2013;5:80.
10. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Банул В.В., Кудряшов А.Ю. Влияние наноразмерных добавок на адгезионную прочность защитных полимерных покрытий. *Строительные материалы*. 2018;1-2:39–44. EDN: YMAQSB

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

11. Королев Е.В. Оценка концентрации первичных наноматериалов для модифицирования строительных композитов. *Строительные материалы*. 2014;6:31–36. EDN: SGCGKD
12. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных легких бетонов. *Строительные материалы*. 2017;7:11–15. EDN: ZCPZID
13. Королев Е.В. Технико-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование. *Строительные материалы*. 2017;3:85–88. EDN: YMWTDTR
14. Яковлев Г.И. и др. Структурная модификация новообразований в цементной матрице дисперсиями углеродных нанотрубок и нанокремнеземом. *Строительные материалы*. 2016;1-2:16–20. EDN: VOCJJJ
15. Строкова В.В., Нецвет Д.Д. и др. Свойства композиционного вяжущего на основе наноструктурированной суспензии. *Строительные материалы*. 2017;1-2:50–54. EDN: YGNHDR
16. Строкова В.В., Сивальнева М.Н. и др. Особенности механизма твердения наноструктурированного вяжущего. *Строительные материалы*. 2016;1-2:62–67. EDN: VOCJJZ
17. Чернышов Е.М., Потамошнев Н.Д., Артамонова О.В. Концепции и основания технологии и наномодифицирования структур строительных композитов. *Строительные материалы*. 2015;11:65–74. EDN: UOXBTN
18. Яковлев Г.И., Первущин Г.Н. и др. Комплексная добавка на основе углеродных нанотрубок и микрокремнезема для модификации газосиликата автоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2013;1-2:3–6. EDN: PYTLHL
19. Пухаренко Ю.В., Магдеев У.Х., Баженов Ю.М., Морозов В.И. Научные и практические результаты наноструктурного модифицирования цементных бетонов. *Фундаментальные исследования РААСН*. Москва-Иваново. 2010;2:111–116. EDN: NTRVKL
20. Пухаренко Ю.В., Рыжов Д.И. О влиянии углеродных фуллероидных наночастиц на тепловыделение цементного теста. *Вестник гражданских инженеров*. 2013;4(39):156–161. EDN: RIWNUJ
21. Хозин В.Г., Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А. Модификация строительных полимеров однослойными углеродными нанотрубками. *Строительные материалы*. 2017;1-2:55–59. EDN: YGNHDU
22. Zubrev N.I., Ustinova M.V., Zhuravleva M.A. et al. Obtaining composite solutions with the addition of ash from the burning of fuel oil. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(3):10–13. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-10-13> EDN: IMBQPD
23. Panfilova M.I., Zubrev N.I., Gorbachevskii V.P., Efremova S.Y. The renewal of the bearing capacity of rubble masonry by the composite solution. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1425:012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012068> EDN: BCFZHL
24. Ustinova M.V., Zubrev N.I., Panfilova M.I. et al. The preparation of composite solutions with the addition of ash from burning of used sleepers. *Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(5):36–40. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-5-36-40> EDN: XQWVSR
25. Panfilova M., Kashintseva V., Zubrev N. Modifying the structures of composite grouts with aluminosilicate nanotubes. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(13):3616–3621.

## 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

**Панфилова Марина Ивановна** – кандидат химических наук, доцент кафедры Общей и прикладной физики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Российская Федерация, 043210@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5939-7717>

**Зубрев Николай Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры Высшей математики и естественных наук, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Российская Федерация, nZubrev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9992-6740>

**Журавлева Маргарита Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры Высшей математики и естественных наук, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Российская Федерация, crane\_64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2723-1127>

**Шилов Иван Владимирович** – студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Российская Федерация, ishilov2004@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8267-4270>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Панфилова М.И.** – концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

**Зубрев Н.И.** – научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

**Журавлева М.А.** – администратор проекта, структурирование материала и оформление фактов и цифр в удобочитаемом виде.

**Шилов И.В.** – проведение эксперимента и обработка результатов измерений.

## Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.03.2026; одобрена после рецензирования 02.06.2026; принята к публикации 08.06.2026.