

УДК: 69.05

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.24

EDN: UMJCTM



Совершенствование технологии и контроля качества устройства монолитных фибробетонных конструкций

А.Ф. Хузин¹, Р.Р. Богданов¹, А.Р. Галаутдинов¹, Р.З. Рахимов¹,
О.В. Хохряков¹, Р.Х. Мухаметрахимов¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Снижение трудоемкости и сроков возведения монолитных конструкций при одновременном обеспечении высокого качества готовой строительной продукции является важнейшим направлением совершенствования данной технологии. Традиционное стержневое армирование является ресурсоемким процессом, а применение фибробетона требует решения задач по обеспечению однородности смеси и контролю его свойств. Цель работы – совершенствование организационно-технологических решений для монолитных фибробетонных конструкций, путем решения задач комплексного подхода к модификации материала и контролю технологии.

Результаты. Разработана и апробирована трехстадийная система контроля качества, включающая входной, операционный и приемочный контроль. Специфика системы заключается в регламентации операций по дозированию фибры и суспензии углеродных нанотрубок, двухстадийному перемешиванию и контролю кинетики твердения. Установлено, что совместное применение стальной фибры и нанотрубок в составе бетонной смеси позволяет достичь синергетического эффекта. Экспериментально подтверждено, что предложенное решение обеспечивает сокращение трудозатрат на 45 % за счет исключения операций по монтажу арматурных каркасов и сокращает продолжительность цикла возведения на двадцать пять процентов благодаря интенсификации твердения бетона.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в разработке готового к практической реализации организационно-технологического решения. Его внедрение позволяет существенно повысить эффективность монолитного строительства за счет снижения трудоемкости и сокращения сроков возведения объектов при гарантированном обеспечении требуемых физико-механических характеристик фибробетонных конструкций.

Ключевые слова: монолитное строительство, фибробетон, технология возведения, контроль качества, трудозатраты, организационно-технологические решения.

Для цитирования: Хузин А.Ф., Богданов Р.Р., Галаутдинов А.Р., Рахимов Р.З., Хохряков О.В., Мухаметрахимов Р.Х. Совершенствование технологии и контроля качества устройства монолитных фибробетонных конструкций // Известия КГАСУ, 2025, № 3 (73), с. 289-298, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.24, EDN: UMJCTM

Improvement of technology and quality control for the construction of monolithic fiber-reinforced concrete structures

A.F. Khuzin¹, R.R. Bogdanov¹, A.R. Galautdinov¹, R.Z. Rakhimov¹,
O.V. Khokhryakov¹, R.Kh. Mukhametrakhimov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem Statement.* Reducing the labor intensity and time required to construct monolithic structures while simultaneously ensuring high quality of finished construction

products is the most important area for improving this technology. Traditional rebar reinforcement is a resource-intensive process, and the use of fiber-reinforced concrete requires solving problems related to ensuring the mix uniformity and controlling its properties. The aim of the work is to improve organizational and technological solutions for monolithic fiber-reinforced concrete structures by solving the problems of an integrated approach to material modification and technology control.

Results. A three-stage quality control system has been developed and tested, comprising input, operational, and acceptance control. The system's specificity lies in the regulation of operations for dosing steel fiber and carbon nanotube suspension, two-stage mixing, and monitoring the kinetics of hardening. It has been established that the combined use of steel fiber and nanotubes in the concrete mix composition provides a synergistic effect. It has been experimentally confirmed that the proposed solution ensures a 45% reduction in labor costs by eliminating rebar cage installation operations and reduces the construction cycle duration by twenty-five percent due to the intensification of concrete hardening.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the development of an organizational and technological solution ready for practical implementation. Its implementation makes it possible to significantly increase the efficiency of monolithic construction by reducing labor intensity and shortening project timelines while guaranteeing the required physical mechanical characteristics of the fiber-reinforced concrete structures.

Keywords: monolithic construction, fiber-reinforced concrete, construction technology, quality control, labor costs, organizational and technological solutions.

For citation: Khuzin A.F., Bogdanov R.R., Galautdinov A.R., Rakhimov R.Z., Khokhryakov O.V., Mukhametrakhimov R.Kh. Improvement of technology and quality control for the construction of monolithic fiber-reinforced concrete structures // News of KSUAE, 2025, № 3 (73), p. 289-298, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.24, EDN: UMJCTM

1. Введение

Современное монолитное строительство характеризуется возрастающими требованиями к повышению эффективности [1-3], снижению трудоемкости и стоимости процессов при безусловном обеспечении требуемых показателей прочности, трещиностойкости и долговечности возводимых конструкций. Традиционное стержневое армирование, являясь отработанной и надежной технологией, связано со значительными трудовыми затратами на такие операции, как вязка или сварка объемных арматурных каркасов, их транспортировка, установка в проектное положение и фиксация с соблюдением защитного слоя. Эти процессы не только увеличивают сроки возведения объектов, но и повышают долю ручного труда, создают организационные сложности и требуют привлечения высококвалифицированных рабочих кадров. Кроме того, наличие сложного арматурного каркаса затрудняет процесс укладки и уплотнения бетонной смеси, что может приводить к образованию пустот и дефектов, снижающих однородность и несущую способность конструкции в целом.

В этом контексте все более широкое и обоснованное применение в мировой и отечественной практике находит фибробетон – перспективный композитный материал, упрочненный дисперсными волокнами (фиброй) [4]. Ключевой фактор эффективности стальной фибры, определяющий ее армирующую способность, — это качество ее анкеровки в цементном камне [5,6]. Гладкие фибры, удерживающиеся в матрице лишь за счет сил адгезии и трения, могут относительно легко выдергиваться под нагрузкой, в то время как фибры с анкерными зацепами (крючки, волнистость) или сложным профилем создают мощное механическое зацепление, обеспечивая высокое сопротивление их выдергиванию (Рис. 1) [6-8].

Эффективность анкеровки напрямую влияет на такие ключевые характеристики фибробетона, как прочность на растяжение при изгибе, ударная вязкость и сопротивление усталостному разрушению [9-11].

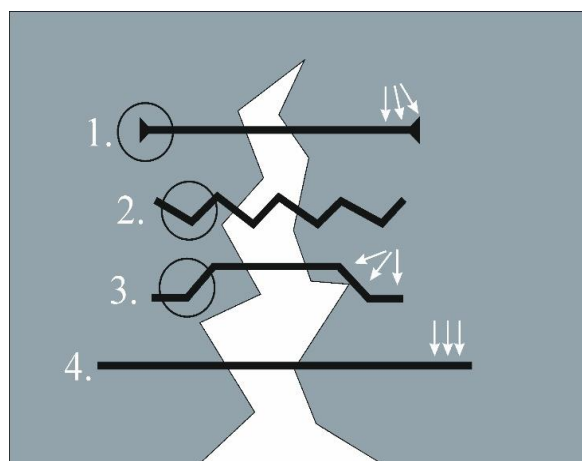


Рис. 1. Схема анкеровки стальных фибр различных форм в цементном камне: 1 - фибра с конусовидными концами; 2 - волновая фибра; 3 - фибра с загнутыми концами; 4 - прямая фибра: кружки – механизмы анкеровки фибры; стрелки – поверхности сцепления [12]

Fig. 1. Anchoring scheme of steel fibers of various shapes in cement stone: 1 – fiber with conical ends; 2 – wave fiber; 3 – fiber with curved ends; 4 – straight fiber: circles – fiber anchoring mechanisms; arrows – bonding surfaces [12]

Полная или частичная замена пространственного арматурного каркаса стальной или синтетической фиброй позволяет кардинально изменить технологию устройства конструкций, сократив количество операций, минимизировав использование ручного труда и снизив металлоемкость. Кроме того, благодаря трехмерному и равномерному распределению фибры по объему бетона и ее эффективной анкеровки в бетонной матрице, достигается результат повышенной стойкости к трещинам, пониженной усадки и ползучести (Рис. 2) [13].

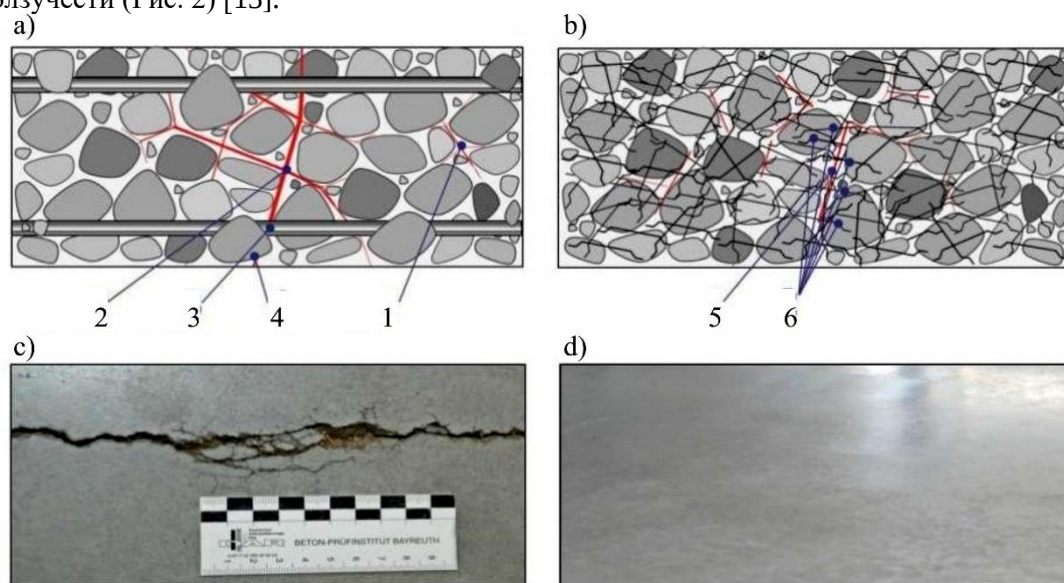


Рис. 2. Схема появления трещин в железобетоне с армокаркасом (а,с) и сталефибробетоне (b,d): 1 – появление микротрещин в неармированной зоне; 2 – распространение и рост микротрещин, превращение в макротрещины; 3 – пересечение зоны армирования макротрещинами; 4 – выход трещины на поверхность; 5 – появление микротрещины; перекрытие микротрещины фибрами [14]

Fig. 2. The pattern of cracks in reinforced concrete with reinforced frame (a,c) and steel fiber concrete (b,d): 1 – the appearance of microcracks in an unreinforced zone; 2 – the spread and growth of microcracks, turning into macrocracks; 3 – the intersection of the reinforcement zone with macrocracks; 4 – the exit of the crack to the surface; 5 – the appearance of microcracks; overlapping microcracks with fibers [14]

Значительный экономический и организационно-технологический эффект проявляется в элементах с большим объемом армирования, таких как балки перекрытий, фундаментные

балки и другие изгибаемые конструкции [15]. Особенно ярко преимущества фибробетона проявляются в конструкциях сложной геометрической формы, где изготовление и установка традиционного арматурного каркаса сопряжены с наибольшими трудностями.

Однако широкое внедрение фибробетона порождает новый комплекс технологических задач, требующих решения для обеспечения надлежащего уровня качества [15]. Во-первых, это обеспечение гарантированной однородности бетонной смеси, поскольку неравномерное распределение фибры по объему конструкции приводит к образованию зон ослабления, локальным концентрациям напряжений и, как следствие, резкому снижению несущей способности и долговечности конструкции [16]. Проблема сегрегации фибры и ее сваливания в комки особенно актуальна при использовании длинной фибры и при транспортировке смеси на большие расстояния. Во-вторых, даже при использовании фибры сохраняется актуальность проблемы интенсификации твердения бетона, особенно на ранних стадиях, для ускорения оборачиваемости опалубки, сокращения продолжительности общего цикла возведения объекта и снижения времени набора распалубочной прочности [17]. Медленный набор прочности на начальном этапе является «узким местом» в технологическом цикле монолитного строительства, ограничивающим темпы производства работ.

В связи с этим, особую актуальность приобретают комплексные технологические решения, направленные на синергетическое улучшение свойств бетонной матрицы на разных масштабных уровнях. Перспективным направлением является комбинированное армирование, включающее модификацию фибробетона на микроуровне с применением высокоэффективных наноматериалов, таких как углеродные нанотрубки (УНТ). УНТ, обладая уникальной прочностью и упругостью, позволяют целенаправленно повышать раннюю прочность и плотность микроструктуры цементного камня, блокируя развитие микродефектов [6]. Будучи интегрированными в цементную матрицу, УНТ выполняют роль наноарматуры, заполняющей микропоры и микротрещины, что приводит к существенному упрочнению материала на нано- и микроуровне. Это позволяет не только повысить прочностные характеристики, но и значительно улучшить такие параметры, как водонепроницаемость, морозостойкость и коррозионная стойкость бетона. Такой подход позволяет не только улучшить физико-механические характеристики конструкции (прочность на сжатие и изгиб, ударную вязкость, долговечность) [18], но и получить значительный организационно-технологический эффект за счет сокращения или полной ликвидации технологических перерывов на твердение и упрощения производственных операций. Создание композиционного материала, сочетающего преимущества макроармирования (фибра) и микроармирования (УНТ), представляется логичным и высокоэффективным путем развития технологий монолитного строительства. Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена острой необходимостью разработки и научного обоснования комплекса организационно-технологических мероприятий, интегрирующих преимущества макродисперсного (фибра) и микродисперсного (УНТ) армирования для одновременного снижения трудозатрат и сокращения сроков возведения монолитных конструкций [6,19].

Объектом исследования является технологический процесс устройства монолитных железобетонных конструкций с применением дисперсного армирования на макро- и микроуровне.

Предмет исследования – организационно-технологические решения и зависимости, определяющие снижение трудозатрат и сокращение продолжительности цикла возведения (за счет интенсификации твердения) при применении фибробетона, модифицированного углеродными нанотрубками, диспергированными с помощью пластифицирующих добавок, а также методы контроля обеспечения однородности и проектной прочности получаемого композиционного материала.

Цель работы – совершенствование организационно-технологических решений возведения монолитных фиброжелезобетонных конструкций. Задачами работы являются изучение особенностей применения УНТ в бетонных смесях с выявлением оптимальных параметров приготовления смесей и их практическим применением, оценка эффективности применения УНТ по критерию снижения трудоемкости приготовления бетонных смесей, а также изучение и оптимизация системы контроля качества устройства монолитных фибробетонных конструкций, модифицированных УНТ.

2. Материалы и методы

В контексте развития современных строительных материалов, направленных на повышение механических характеристик и долговечности конструкций, для проведения комплекса исследований был целенаправленно разработан состав фибробетона. Ключевой особенностью данного материала является комбинированное микроармирование, а также целенаправленная модификация цементной матрицы, которая осуществлялась путем введения углеродных нанотрубок (УНТ), что отражено в исследовании [20].

В качестве макроармирующего компонента использовалась стальная анкерная фибра длиной 50 мм и диаметром 0,8 мм, что обеспечивало оптимальное соотношение параметров для эффективного сопротивления выдергиванию. Содержание стальной фибры в смеси составляло 1,5% от объема бетона. Для модификации на микроуровне применялись многостенные углеродные нанотрубки с удельной поверхностью более 250 м²/г. Концентрация УНТ в пересчете на массу цемента составляла 0,05%.

Для обеспечения равномерного диспергирования УНТ в бетонной смеси и предотвращения их агломерации в качестве ключевой технологической добавки применялся высокоэффективный поликарбоксилатный суперпластификатор, используемый в жидком виде. Следует подчеркнуть, что в рамках данной технологии пластификатор выполнял двойную функцию: с одной стороны, он обеспечивал существенное повышение удобоукладываемости бетонной смеси, а с другой стороны, критически важной была его роль в качестве стабилизированного носителя для нанотрубок. Предварительно УНТ диспергировались в водном растворе пластификатора с помощью ультразвуковой обработки в течение 10 минут, что позволяло разрушить агломераты и получить стабильную суспензию. Эта суспензия затем вводилась в бетономешалку на стадии затворения. Такой комплексный подход позволил не только добиться значительного снижения расхода дорогостоящих УНТ, но и гарантировать глубокую гомогенизацию структуры композита на микроуровне, что позволяет достигать необходимые физико-механические показатели.

В рамках исследования для обеспечения высоких стандартов качества была разработана и апробирована комплексная трехстадийная система контроля качества. Данная система была специально адаптирована для технологии устройства монолитных фибробетонных конструкций, модифицированных УНТ, и включала в себя последовательные этапы: входной контроль поступающих материалов, операционный контроль всех ключевых технологических процессов и приемочный контроль готовой конструкции с проведением необходимых испытаний. Особое внимание в системе операционного контроля уделялось этапу перемешивания, так как именно эта операция является критически важной для достижения заданной однородности композита.

Сравнительная оценка трудозатрат между традиционной технологией и предлагаемым решением проводилась по методу калькуляции затрат на единицу объема возводимой конструкции (1 м³). При этом учитывался полный перечень основных технологических операций: для традиционного армирования это такие трудоемкие процессы, как вязка или сварка арматурного каркаса, его последующая установка и точная фиксация в опалубке. Для фибробетона, модифицированного УНТ, в расчет были приняты операции по дозированию компонентов и приготовлению готовой смеси, включая подготовку стабильной суспензии УНТ. Укрупненные нормативы трудозатрат, выраженные в человеко-часах (чел.-час), были приняты из соответствующих Единых норм и расценок (ЕНиР) и дополнительно скорректированы на основе систематических хронометражных наблюдений за опытными производственными процессами, что позволило повысить достоверность расчетов.

3. Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ трудозатрат на устройство 1 м³ монолитной балки, приведенный в таблице 1, подтвердил значительный организационно-технологический эффект от предложенного решения.

При использовании традиционного стержневого армирования трудоемкость операций по сборке и установке каркаса составила 4-6,5 чел.-часов. Применение фибробетона позволило исключить эти операции, сократив общие трудозатраты на 70-

75 %, что согласуется с выводами других исследователей о ресурсосберегающем потенциале дисперсного армирования [14].

Таблица 1

Сравнение трудозатрат на 1 м³ бетона балки

Этап производства	Затраты труда, чел/час		
	Стержневая арматура	Фибробетон (металлическая фибра)	Фибробетон (металлическая фибра + УНТ (в виде готовой добавки))
1. Изготовление армокаркаса (резка, гнутье, вязка/сварка)	3,5 - 5,0	0	0
2. Установка каркаса в опалубку	0,5 - 1,5	0	0
3. Приготовление бетонной смеси	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,3 - 0,4
4. Укладка и уплотнение бетона	0,8 - 1,2	1,0 - 1,5	1,2 - 1,8
5. Контроль качества	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,5 - 0,7
ИТОГО:	5,2 - 8,3	1,6 - 2,3	2,0 - 3,3

Необходимо отметить, что некоторое увеличение трудозатрат на укладку и уплотнение фибробетона по сравнению с традиционным связано с несколько большей вязкостью смеси, обусловленной наличием фибры. А увеличение затрат на контроль для состава с УНТ вызвано необходимостью проведения дополнительных операций по контролю суспензии и однородности смеси. Однако эти дополнительные затраты могут быть компенсированы экономией за счет минимизации затрат на арматурные работы.

Важным результатом является сокращение продолжительности цикла возведения на 25% по сравнению с традиционной технологией. Данный эффект достигнут за счет двух факторов: исключения трудоемких процессов арматурных работ и интенсификации твердения бетонной матрицы, модифицированной УНТ. Исключение арматурных работ позволило сократить продолжительность подготовительного этапа на 40-50%. Параллельно, за счет интенсификации твердения, был сокращен и основной производственный этап – выдерживание бетона в опалубке до набора распалубочной прочности.

Контроль прочности показал, что применение разработанного состава позволяет достичь 70 % от проектной прочности через 24 часа, в то время как для традиционного бетона этот показатель достигается за 72 часа. Это позволило сократить межоперационные перерывы и ускорить оборачиваемость опалубки, что является ключевым параметром оптимизации строительного потока.

Разработана усовершенствованная трехстадийная система контроля качества (таблица 2), которая показала высокую эффективность при апробации.

Установлено, что соблюдение регламентированного порядка и продолжительности перемешивания (двухстадийный режим с подачей фибры на втором этапе) является важным для обеспечения однородности смеси. Визуальный осмотр и испытания контрольных образцов подтвердили отсутствие агломератов фибры и равномерное ее распределение, что соответствует данным, полученным в работе [19]. Испытания на прочность при изгибе показали, что образцы из разработанного композита характеризуются более высокой трещиностойкостью и вязкостью разрушения по сравнению с традиционным фибробетоном. Прирост прочности на изгиб составил 40-45 %, что обусловлено синергетическим эффектом комплексного армирования. Стальная фибра, работая на макроуровне, препятствует развитию макротрещин, в то время как УНТ, диспергированные в матрице, повышают ее прочность на микроуровне, перераспределяя внутренние напряжения и инициируя множественное микротрещинообразование, что в целом повышает энергоемкость разрушения материала. Полученные данные хорошо согласуются с концепцией многоуровневого армирования [21] и исследованиями прочности новых поколений бетонов [22].

Таблица 2

Особенности системы контроля качества устройства монолитных фибробетонных конструкций, модифицированных УНТ

Стадия контроля	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
1. Входной контроль	Подготовка и приемка стальной фибры.	Визуальный осмотр каждой партии на отсутствие коррозии и агломератов. Выборочный замер геометрических параметров (длина, диаметр). Проверка паспортов качества.	Журнал входного контроля. Акт отбора проб.
	Приготовление и приемка суспензии УНТ с пластификатором.	Визуальный осмотр на однородность и отсутствие расслоения. Проверка сопроводительной документации на УНТ и пластификатор. Контроль дисперсности суспензии	Журнал входного контроля. Паспорт на материалы.
2. Операционный контроль	Дозирование компонентов бетонной смеси.	Визуальный контроль работы автоматизированных дозаторов. Фиксация массы дозируемых материалов.	Протокол подбора состава. Запись в журнале бетонных работ
	Приготовление бетонной смеси (перемешивание).	Хронометраж двухстадийного процесса. Визуальная оценка однородности смеси. Выборочный контроль наличия агломератов фибры.	Запись в журнале бетонных работ с указанием времени начала и окончания каждого этапа.
	Контроль удобоукладываемости смеси перед укладкой.	Испытание осадки конуса (ГОСТ 10181) для каждой партии смеси	Протокол испытания. Запись в журнале бетонных работ
	Контроль твердения и прочности.	Определение прочности бетона неразрушающими методами и испытанием контрольных образцов.	Протоколы испытаний.
3. Приемочный контроль	Визуальный осмотр конструкции после распалубки.	Сплошной визуальный осмотр поверхностей на отсутствие раковин, трещин, оголенной фибры и следов расслоения смеси. Контроль геометрических параметров конструкции.	Акт осмотра конструкций.
	Испытание контрольных образцов.	Испытание образцов	Протоколы лабораторных испытаний.

Предложенные организационно-технологические решения не требуют применения специализированного оборудования, за исключением точных дозаторов для фибры и приготовленной суспензии УНТ. Это делает технологию адаптируемой к условиям типовых строительных площадок и заводов товарного бетона. Полученные результаты не противоречат имеющимся научным данным, а развивают их, предлагая конкретный механизм интеграции наномодификаторов в существующую технологическую цепочку устройства фибробетонных конструкций с четко регламентированной системой контроля.

Таким образом, комплексное применение металлической фибры и УНТ в сочетании с разработанной системой контроля позволяет достичь цели исследования – совершенствования технологии монолитного строительства за счет значительного снижения трудоемкости и продолжительности цикла при обеспечении качества конструкций.

4. Заключение

1. Разработана и апробирована усовершенствованная трехстадийная система контроля качества (входной, операционный, приемочный контроль) для технологии

устройства монолитных конструкций из фибробетона, модифицированного углеродными нанотрубками. Контролируемыми параметрами на операционной стадии являются точность дозирования фибры и суспензии УНТ, продолжительность двухстадийного перемешивания и удобоукладываемость смеси.

2. Установлено, что применение фибробетона (стальная фибра + УНТ в суспензии с пластифицирующей добавкой) позволяет достичь синергетического эффекта армирования на макро- и микроуровне, что подтверждается увеличением прочности при изгибе на 40-45 % по сравнению с традиционным бетоном.

3. Подтверждено, что модификация бетонной матрицы УНТ интенсифицирует процесс твердения, позволяя достичь 70% проектной прочности за 24 часа. Данный фактор обеспечивает сокращение продолжительности оборота опалубки на 25%, что является ключевым для оптимизации строительных потоков и сокращения общих сроков возведения объектов.

4. В результате сравнительного анализа трудозатрат доказано, что полное исключение операций по сборке и установке стержневых арматурных каркасов при замене их дисперсным армированием приводит к сокращению общих трудозатрат на устройство монолитных балок на 45%.

Список литературы / References

1. Замалиев Ф.С., Бота К.Н. Выявление рациональных параметров сталебетонного перекрытия // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2025. № 1 (10). С. 4-15.
Zamaliyev F.S., Bota K.N. Identification of rational parameters of a steel-concrete floor // Building structures, buildings, and structures. 2025. No. 1 (10). P. 4-15.
2. Ермилова Е. Ю., Камалова З. А. Влияние комплексных добавок на прочностные свойства композиционного портландцемента // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 4 (9). С. 46–53.
Ermilova E. Yu., Kamalova Z. A. The effect of complex additives on the strength properties of composite Portland cement // Building structures, buildings, and facilities. 2024. No. 4 (9). P. 46–53.
3. Ермилова Е. Ю., Гилязитдинов Р. Ф., Вахитова Р. Р., Хайдаров Р. И. Влияние УФ обработки воды затворения на прочностные свойства портландцементного камня // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 3 (8). С. 40–45.
Ermilova E. Yu., Gilyazitdinov R. F., Vakhitova R. R., Khaidarov R. I. Influence of UV treatment of sealing water on the strength properties of Portland cement stone // Building structures, buildings and facilities. 2024. No. 3 (8). P. 40–45.
4. Tolchikov Yu. N., Aljaboobi D. Z. M. Study of the carbon nanomaterials synthesis on the cement binder // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 290–298. DOI: 10.17277/jamt.2022.04. P.290-298.
5. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement-based materials // Vestnik of Brest State Technical University. 2021. No. 3. P. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.
6. Mansoori H., Behbahani H. P., Alih S. C. The Combined Effect of Steel Fibres and High-Range Carbon Nanotubes on Properties of High-Strength Concrete // Magazine of Concrete Research. 2022. Vol. 74, No. 24. P. 1270–1279. DOI: 10.1680/jmacr.21.00184.
7. Lin W., Liu G. L., Wang J. X., Yang Z. H., Zhang G. Y. Effect of functionalized carbon nanotube on cement mortar: From experiment to DFT research // Modern Physics Letters B. 2024. Vol. 38, No. 35. Art. No. 2450277. DOI: 10.1142/S0217984924502774.
8. Ebrahim A., Kandasamy S. The effect of using multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of concrete: a review // Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8, No. 9. P. 251. DOI: 10.1007/s41062-023-01219-1.
9. Wang J., Dong S., Pang S. D., Zhou C., Han B. Pore structure characteristics of concrete composites with surface-modified carbon nanotubes // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 128. P. 104453. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104453.
10. Hou M., Zhang D., Li V. C. Material processing, microstructure, and composite properties of low carbon engineered cementitious composites (ECC) // Cement and

- Concrete Composites. 2022. Vol. 134. P. 104790. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104790.
11. Liu X., Wang G., Yu J., Liu R., Lyu K., Zuo Ju., Shah S. P. Stress-sensitivity of carbon nanotube-grafted-carbon fiber incorporated cement-based composites // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. P. 105589. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105589.
 12. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2022. Т. 19. № 3 (85). С. 436–445.
Pukharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Influence of the type of fiber and the composition of the matrix on their adhesion in fiber concrete // *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2022. Vol. 19. No. 3 (85). P. 436–445.
 13. Петров В. В., Мурашкин В. Г. Монолитные железобетонные перекрытия с повышенной несущей способностью // *Эксперт: теория и практика*. 2021. № 1(10). С. 38–45. DOI: 10.51608/26867818_2021_1_38.
Petrov V. V., Murashkin V. G. Monolithic reinforced concrete floors with increased bearing capacity // *Expert: theory and practice*. 2021. No. 1(10). P. 38–45. DOI: 10.51608/26867818_2021_1_38.
 14. Pikus G. A., Manzhosov I. V. Pressure of Fiber Reinforced Concrete Mixtures on Vertical Formwork Panels // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 836–841. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.560.
 15. Раззаков Н., Яхшибаев Ш., Раззаков Н. Технология возведения сборно-монолитных большепролетных уникальных покрытий из укрупненных элементов оболочки // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. 2024. № 1(6). С. 35–46.
Razzakov N., Yakhshibaev Sh., Razzakov N. Technology of construction of prefabricated monolithic large-span unique coatings from enlarged shell elements // *Building structures, buildings and facilities*. 2024. No. 1(6). P. 35–46.
 16. Матус Е. П., Косолапов Г. В. Проблемы приготовления базальтофибробетонных растворов // *Современное строительство и архитектура*. 2024. № 8 (51).
Matus E. P., Kosolapov G. V. Problems of preparation of basalt-fiber-concrete solutions // *Modern construction and architecture*. 2024. No. 8 (51).
 17. Садовская Е. А., Леонович С. Н., Будревич Н. А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 20–28.
Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Budrevich N. A. A multiparametric methodology for assessing the quality of nanofibre concrete for a construction site // *Concrete and reinforced concrete*. 2021. No. 4 (606). P. 20–28.
 18. Булгаков А. Г., Ерофеева И. В., Ишутин А. А. [и др.] Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 2(17). С. 21–27. DOI: 10.51608/26867818_2022_2_21.
Bulgakov A. G., Erofeeva I. V., Ishutin A. A. [et al.] Flexural tensile strength of new generation concretes // *Expert: theory and practice*. 2022. No. 2(17). P. 21–27. DOI: 10.51608/26867818_2022_2_21.
 19. Габидуллин М. Г., Рахимов Р. З., Хузин А. Ф., Стоянов О. В. Влияние модификации многослойными углеродными нанотрубками на микрои наноструктуру цементного камня // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 2. С. 69–72.
Gabidullin M. G., Rakhimov R. Z., Khuzin A. F., Stoyanov O. V. The effect of modification by multilayer carbon nanotubes on the micro and nanostructure of cement stone // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014. Vol. 17, No. 2. P. 69–72.
 20. Коротких Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения // *Вестник гражданских инженеров*. 2009. № 3 (20). С. 126–128.
Korotkikh D. N. Multilevel dispersed reinforcement of the concrete structure to increase their fracture toughness // *Bulletin of Civil Engineers*. 2009. No. 3 (20). P. 126–128.

21. Ерофеев В. Т., Тараканов О. В., Ананьев С. В., Леснов В. В., Ерофеева И. В., Санягина Я. А., Сидоров Н. С., Ананьева Ю. С. Повышение эффективности дисперсного армирования в высокопрочных самоуплотняющихся и каркасных бетонах // Строительные материалы. 2024. № 3. С. 15–24.

Erofeev V. T., Tarakanov O. V., Ananyev S. V., Lesnov V. V., Yerofeeva I. V., Sanyagina Ya. A., Sidorov N. S., Ananyeva Yu. S. Improving the efficiency of dispersed reinforcement in high-strength self-sealing and frame concrete // Building Materials. 2024. No. 3. P. 15–24.

Информация об авторах

Хузин Айрат Фаритович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: airat-khuzin2010@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8811-8131

Богданов Руслан Равильевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: bogdanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-1047-5400

Галаутдинов Альберт Радикович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: galautdinov89@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9999-6925

Рахимов Равиль Зуфарович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: rahimov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-4251-1605

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850

Мухаметрахимов Рустем Ханифович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Information about the authors

Airat F. Khuzin, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: airat-khuzin2010@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8811-8131

Ruslan R. Bogdanov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: bogdanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-1047-5400

Albert R. Galautdinov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: galautdinov89@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9999-6925

Ravil Z. Rakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: rahimov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-4251-1605

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850

Rustem Kh. Mukhametrakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Дата поступления: 08.08.2025

Дата принятия: 26.10.2025