

**Обобщение результатов исследований
и оценка их результативности по проекту
"Разработка новой технологии энерго- и ресурсоэффективных
наномодифицированных композиционных материалов для
строительства в эксплуатационных условиях Тихоокеанского региона
на основе региональных сырьевых ресурсов России и Вьетнама"
(уникальный идентификатор проекта RFMEFI58318X0072)**

За отчетный период 2018-2020 гг. выполнения прикладных научных исследований по проекту «Разработка новой технологии энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов для строительства в эксплуатационных условиях Тихоокеанского региона на основе региональных сырьевых ресурсов России и Вьетнама» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» получены следующие научно-технические результаты:

1. Выполнен аналитический обзор современных источников научной, нормативно-технической, методической информации по научно-технической проблеме получения конструкционного легкого композиционного материала с высокой удельной прочностью.

Представлены особенности минерально-сырьевой базы Тихоокеанского региона России и Вьетнама, в том числе цементной промышленности, производства заполнителей и минеральных добавок, а также химических функциональных модификаторов и добавок.

Классифицированы природно-климатические условия Тихоокеанского региона России и Вьетнама. Сформулированы основные требования к конструкционным материалам с учетом условий эксплуатации.

Обобщен российский и зарубежный опыт разработки и применения конструкционных легких бетонов. Установлены области применения наноразмерных модификаторов различной природы в технологии строительных материалов.

Описана теория, российский и зарубежный опыт реализации технологии строительной 3D-печати, выявлены недостатки, сформулированы гипотезы по совершенствованию существующих технологических решений.

2. Разработан алгоритм проектирования энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов, включающий формирование системы критериев качества, ее декомпозицию и классификацию свойств на экстенсивные и интенсивные, выявление управляющих рецептурных и технологических факторов, установление экспериментально-статистических моделей влияния управляющих факторов на критерии качества, проведение многокритериальной оптимизации и проведение оценки соответствия полученных результатов требованиям технического задания.

Проведена декомпозиция системы критериев качества энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов, установлены управляющие рецептурные и технологические факторы, осуществлена скаляризация критериев качества: предложен обобщенный критерий качества, позволяющий оценивать эффективность предлагаемых технологических решений на свойства материала. С использованием критериальной функции получены базовые составы высокопрочных легких бетонов, а также оптимальные соотношения функциональных модификаторов, оказывающих наилучшее положительное влияние на изменение контролируемых эксплуатационных свойств.

В качестве управляющих факторов определены: рецептурные – количество компонентов (вяжущее, заполнитель, минеральный и функциональный наполнители, пластификатор, суперабсорбирующий полимер, фибра, вода), прочность на границе раздела фаз «наполнитель – цементно-минеральная матрица»; технологические – продолжительность и интенсивность перемешивания компонентов, температура и интенсивность тепловлажностной обработки и процедурный фактор введения

наноразмерного модификатора, а также продолжительность и интенсивность формирования.

3. Разработана методика расчета состава энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами (предел прочности при сжатии – не менее 40 МПа, средняя плотность – не более 1600 кг/куб.м) для производства на территории России.

4. Научно обоснован выбор основных компонентов на основе региональной минерально-сырьевой базы для производства на территории России. Разработан обобщенный критерий для обоснования выбора минеральных добавок, учитывающий их влияние на реологические свойства смеси и прочность цементного композита, энергозатраты на диспергирование и распространенность на территории Тихоокеанского региона.

Показано, что получение цементных композитов с заданными эксплуатационными свойствами может осуществляться подбором компонентов для формирования эффективного комплекса «пластификатор – минеральная добавка», обеспечивающего требуемые реотехнологические и прочностные характеристики. Установлено, что эффективными компонентами, доступными в Тихоокеанском регионе России и Вьетнама, для комплекса «пластификатор – минеральная добавка» являются: микрокремнезем, зола-уноса, мука кварцевая и мука ракушечника.

Установлены концентрационные зависимости подвижности растворных смесей и физико-механических свойств композитного цементного камня, пригодные для проведения оптимизации составов высокопрочных бетонов.

Показано, что в качестве структурного параметра, характеризующего влияние минеральных добавок в составе комплекса с пластификатором, может быть использовано отношение толщины цементно-минеральной матрицы к размеру частиц мелкого заполнителя. На основе этого структурного параметра показано отличие влияния выбранных минеральных

добавок на свойства смесей и композитов, заключающееся в различной интенсивности их изменения и складывающееся из протекания конкурирующих конструктивно-деструктивных процессов.

Проведена оценка достижимости показателей эксплуатационных свойств высокопрочного легкого бетона, изготовленного на полых микросферах. Показано, что для получения высокопрочного легкого бетона с параметрами: $\rho_b \in I[1400;1600]$, кг/м³, и $R_{уд} \geq 25$ МПа, содержание полых микросфер необходимо варьировать в диапазоне 21...39 % по объему. Указанное содержание полых микросфер не нарушает формирования непрерывного каркаса композитного цементного камня ($1 - v_f = v_m > 0,34$).

Предложены приемы формирования блокирующего щелочесиликатные реакции слоя, структурирующего зону контакта и способствующего увеличению адгезии цементно-минеральной матрицы к полым микросферам. Для блокирования щелочно-силикатных реакций возможно использование различных соединений лития (рационально использовать $LiCl \cdot H_2O$, Li_2SO_4) или эффективных наноразмерных модификаторов, например на основе золя гидроксида железа (III) и золя кремневой кислоты.

5. Разработана методика исследования параметров структуры и строительно-технологических свойств с помощью высокоинформативных методов исследования, таких как дифференциальный термический анализ, ИК- и КР-спектроскопия, ЯМР-спектроскопия, рентгеновская томография, оптическая микроскопия и реометрия.

6. Изготовлены образцы для исследования структурообразования композитов в начальный и эксплуатационный период. Для цементно-минеральных и бетонных смесей проведены исследования по определению их реологических свойств, для композитов также исследованы параметры структуры и строительно-технологических свойств.

Исследованы процессы структурообразования цементного камня в присутствии наноразмерного модификатора, содержащего золь гидроксида

железа (III) и золь кремневой кислоты. Методом ДТА показано, что наноразмерный модификатор интенсифицирует гидратацию портландцемента и увеличивает количество гидросиликатов кальция на границе раздела фаз «наномодифицированная микросфера – цементный камень». Выявлено, что наноразмерный модификатор увеличивает значение удельной энтальпии первой аномалии (диапазон температур 130...150 °С) на 16,2 %, второй аномалии (диапазон температур 470...500 °С) – на 304 %, а третьей аномалии (диапазон температур 745...770 °С) – на 104 %.

Данные ИК-спектроскопии указывают на появление полосы поглощения, характерной для низкоосновных тоберморитоподобных гидросиликатов кальция. Также установлено, что для цементного камня, модифицированного наноразмерным модификатором, наблюдается снижение относительной интенсивности поглощения для пиков карбонатных связей 870 и 1400 см⁻¹.

Методом комбинационного рассеивания выявлено, что для границы раздела фаз «наномодифицированная микросфера – цементный камень» дополнительно выделяются пики при 462 и 517 см⁻¹, которые характеризуют внутренние деформации силикатов тетраэдрического типа ν_4 ([SiO₄]). Указанные пики могут быть интерпретированы как соответствующие деформационным колебаниям и антисимметричным изгибам связи O–Si–O. Силикатная фаза в рассматриваемом случае (на спектрах границы раздела фаз «микросфера – цементный камень» такие пики отсутствуют) может принадлежать только наноразмерному модификатору. Указанное подтверждает эффективность приема нанесения наноразмерного модификатора на поверхность микросфер посредством их смачивания раствором наноразмерного модификатора с последующей сушкой. Наличие силикатной фазы на границе «наномодифицированная микросфера – цементный камень» должно обеспечить блокирование щелочной коррозии и предотвратить разрушение микросферы в процессе эксплуатации.

Результаты проведенных исследований смачиваемости микросфер и результатов исследования морфологии поверхности, полученных методом адсорбционной порометрии, показывают, что керамические и стеклянные микросферы не обладают развитой поровой структурой (объем дефектов поверхности размером 40,9 нм не превышает $3,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$), а увеличение расхода воды в составах легких бетонов связано с шероховатостью поверхности микросфер: для стеклянных микросфер коэффициент шероховатости $k_{\text{ш}} = 4,52$, а краевой угол смачивания $\theta_{\text{ш}} = 78,26^\circ$, а для алюмосиликатных (керамических) микросфер – $k_{\text{ш}} = 6,66$ и $\theta_{\text{ш}} = 89,30^\circ$ (значения аналогичных показателей для кварцевого порошка – $k_{\text{ш}} = 1,15$ и $\theta_{\text{ш}} = 28,15^\circ$).

Выявлены особенности влияния различных пластификаторов на подвижность бетонной смеси, содержащей немодифицированные и наномодифицированные микросферы. Показано, что эффективными пластификаторами являются пластификаторы «Melflux 1641F» и «Melflux 2651F». Требуемая подвижность бетонной смеси достигается при концентрациях 0,86 и 0,76 % от массы портландцемента, соответственно, «Melflux 1641F» и «Melflux 2651F».

Применение наноразмерного модификатора снижает подвижность бетонной смеси. Для нивелирования негативного влияния наноразмерного модификатора, нанесенного на поверхность полых микросфер, необходимо увеличить расход пластификатора на 26,3 и 42,8 %, соответственно, для пластификатора «Melflux 1641 F» и «Melflux 2651 F».

Исследовано влияние основных рецептурных и технологических факторов на среднюю плотность и пористость легких бетонов на микросферах. Установлены зависимости влияния количества полых стеклянных и керамических микросфер на среднюю плотность легкого бетона. Определено рациональное количество минеральной добавки – микрокремнезема (15...20 % от массы портландцемента), обеспечивающего за счет заполнения микропор уплотнение цементного камня.

Исследование порового пространства легких бетонов с применением метода Шейкина показало, что наномодифицирование микросфер позволяет улучшить качество структуры бетона: повышается однородность распределения капилляров и уменьшается показатель, характеризующий их средний размер. Проведены расчеты толщины цементного камня, разделяющего закрытые поры, представленные микросферами. Показано, что при определенных параметрах слои уплотненного цементного камня около наномодифицированных микросфер могут объединяться. Указанное должно приводить к реализации синергетического эффекта от применения наномодифицирования микросфер. Показано, что коэффициент среднего размера капилляров для легких бетонов на наномодифицированных микросферах уменьшается в 1,63 раза, а коэффициент однородности распределения капилляров – увеличивается в 1,56 раза. Открытая пористость легкого бетона на наномодифицированных микросферах составляет не более 1,5 %.

7. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования на образцах энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов, включая исследования механических и деформативных свойств композита.

Установлены закономерности влияния рецептурных и технологических факторов на состав, структуру и комплекс свойств энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов.

Установлено, что применение углеродных нанотрубок в качестве модификатора, регулирующего структурообразование цементного камня в разрабатываемых бетонах, сопряжено с трудностями подготовки водных дисперсий с содержанием частиц менее 100 нм более 50 %. Показана адсорбция поликарбоксилатной добавки углеродными частицами, что оказывает отрицательное влияние на подвижность бетонной смеси.

Установлена целесообразность применения наноразмерных гидросиликатов бария и цинка в качестве модификаторов, регулирующих

структурообразование цементного камня: прочность цементного камня, модифицированного смесевым модификатором, содержащим гидросиликаты бария и цинка в соотношении 1 : 4,5, повышается на 33 %, а общая пористость снижается на 12 %. При этом решение о применении указанных модификаторов должно быть принято с учетом технического состояния предприятия по производству бетона и изделий из него. При отсутствии возможности технологического перевооружения производства применение наноразмерных первичных материалов не целесообразно.

С помощью рентгенофазового анализа установлено, что в присутствии наноразмерных гидросиликатов цинка или меди в цементном камне формируются продукты гидратации, характерные для немодифицированного цементного камня. Присутствие таких модификаторов приводит к некоторому изменению содержания отдельных продуктов гидратации. Для целей проекта – разработка и применение высокопрочных легких бетонов в условиях Тихоокеанского региона – рациональной добавкой является модификатор на основе наноразмерных гидросиликатов цинка, обеспечивающий замедление процессов гидратации портландцемента.

Установлено, что цементные смеси, в том числе с минеральными добавками, содержащие поликарбоксилатный пластификатор, характеризуются сложным характером течения. На кривых течения слабоструктурированных подвижных систем в диапазоне $0,5 < \gamma < 0,8$ 1/с наблюдается нисходящий участок напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига. Ключевым фактором в проявлении аномального участка в исследуемых цементно-минеральных дисперсных системах является наличие пластификатора.

Установлено, что реологическая аномалия на кривой течения исследуемых пластифицированных цементных смесей возникает вследствие формирования структурной неоднородности. Интенсивность реологической аномалии определяется балансом величин изменения напряжения сдвига в зонах «сгущения» и «разряжения» структуры смеси, соответственно,

приводящих к уменьшению и увеличению структурного соотношения h/d_f относительно начального значения. Границы реологической аномалии независимо от применяемой минеральной добавки можно описать обобщенным геометрическим критерием, учитывающим параметры структуры смеси (толщину водной прослойки), а также перемещения рабочего органа реометра и частиц дисперсной фазы.

Установлены граничные концентрации компонентов для приготовления суперабсорбирующего полимера, обеспечивающие отложенную полимеризацию для снижения негативного влияния на подвижность цементных композиций – соотношение воды к акрилатной части $B/\Sigma A \geq 8,5$ и количество катализатора $B/A_1 \leq 0,003$.

Калориметрический и рентгенофазовый анализы показывают, что САП в количестве не более 1,0 % от массы портландцемента оказывает положительное влияние на процессы структурообразования цементного камня.

Полученные зависимости реологических свойств цементных смесей и физико-механических свойств цементного камня от содержания САП показывают, что в отличие от использования гранулированных добавок суперабсорбирующих полимеров растворы таких полимеров позволяют сохранить воду в смеси на требуемый период времени. Эффективной концентрацией САП, обеспечивающей сохранение реологических и прочностных характеристик, является 0,5...1,0 % от массы портландцемента.

8. На основе положений теории перколяции и фрактальной геометрии разработана аналитическая модель хаотического армирования, учитывающая геометрические характеристики и физические свойства волокон. Полученная зависимость демонстрирует, что волокна в композиционном материале формируют пространственную сетку (аналогичную сетки Шкловского – Де Жена), плотность структурных элементов которой в существенной степени зависит от гибкости волокон.

Математическое моделирование формирования перколяционного каркаса из волокон показывает, что зависимость между объемной долей волокон и относительным числом N_c/N контактов между ними имеет линейный характер. Тангенс угла наклона указанной зависимости зависит от коэффициента формы волокна (соотношения L_0/d_l).

Использование комплексного наноразмерного модификатора способствует повышению предела прочности при сжатии высокопрочного легкого бетона. Наибольшее значение удельной прочности такого бетона наблюдается при количественном соотношении ионов хлора в адсорбционном и диффузионном слое мицеллы золя гидроксида железа к ионам Na^+ , равном 1/1,25...1/1,5.

Выбор комбинации минеральных добавок в цементно-минеральных комплексах и их соотношения является существенным фактором для обеспечения требуемых механических свойств бетона. Наибольшую прочность имеют составы высокопрочного легкого бетона с минеральным комплексом, включающим микрокремнезем: предел прочности при изгибе и сжатии достигает 5 и 57 МПа в возрасте 1 сутки после ТВО, соответственно. Результаты экспериментальных исследований позволяют установить минимальное объемное содержание микрокремнезема – 4,8 %. При этом вклад в повышение прочности бетона любой из других минеральных добавок (золы-уноса, муки ракушечника, муки кварцевого песка) в комплексе с микрокремнеземом не существенен.

Установлено, что в отличие от цементных смесей подвижность бетонных смесей высокопрочного легкого бетона при введении САП уменьшается. Увеличение содержания полиакрилатов до 2,3 % от массы портландцемента приводит к снижению диаметра расплыва смеси на 20 %. Для обеспечения требуемых параметров подвижности бетонной смеси и средней плотности высокопрочного легкого бетона, полученного с применением комплекса минеральных добавок и САП, необходимо ограничить величиной 1,5 % от массы портландцемента. С учетом

требований по прочности разрабатываемого бетона оптимальное содержание САП составляет 1,0...1,5 % от массы портландцемента.

Исследование влияния вида и количества волокон на прочность высокопрочного легкого бетона позволило установить, что максимальное увеличение прочности разрабатываемого композита наблюдается при введении полипропиленового волокна. Оптимальное содержание такого волокна, обеспечивающее допустимое снижение подвижности и наибольшую прочность бетона, составляет 1,25...1,5 % от массы портландцемента.

Разработанные составы высокопрочного легкого бетона обладают меньшим по сравнению с тяжелым бетоном модулем упругости. Необходимо отметить, что значение коэффициента Пуассона для такого бетона свидетельствует о высокой хрупкости высокопрочных тяжелых бетонов. Применение наноразмерного модификатора, сопровождающееся образованием дополнительного количества гидросиликатов на границе раздела фаз «цементный камень – микросфера», приводит к увеличению модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Установлены значения энергии акустической эмиссии, учитывающие суммарную амплитуду и количество сигналов, коррелирующие с механическими свойствами материала. Показано, что снижение дефектности легкого бетона на керамических микросферах может быть достигнуто за счет модифицирования поверхности полого наполнителя наноразмерной добавкой.

Доказано, что использование растворов суперабсорбирующих полимеров является эффективным технологическим решением для снижения усадочных деформаций разработанных материалов, применение которых связано с неблагоприятными условиями твердения портландцемента, например при 3D-печати.

Результаты определения деформаций образцов высокопрочного легкого бетона и высокопрочного легкого фибробетона под воздействием динамических нагрузок показали их высокую стойкость к такому виду

нагрузок. При воздействии циклической нагрузки 0,1 и 1,0 МПа величина относительных деформаций после установленного количества циклов находится в близком диапазоне и составляет 0,39 и 0,24 мм/м, 0,45 и 0,34 мм/м для ВПЛБ и ВПЛФБ, соответственно.

9. Выполнена оценка долговечности композитов из региональных материалов с учетом особенностей климата западного Тихоокеанского региона, характерного для регионов России.

Установлено, что бетонные смеси высокопрочного легкого бетона обладают высокой водоудерживающей способностью – более 98 %. Кроме того, применение суперабсорбирующего полимера позволяет снизить потерю воды на 10...19 % по сравнению с базовым составом.

Определены гидрофизические свойства высокопрочных легких бетонов. Установлено, что для наномодифицированных составов по сравнению с контрольным наблюдается в 1,4 раза более высокое водопоглощение. При этом коэффициент, характеризующий скорость поглощения воды, у наномодифицированных составов в 2,9 раза меньше, чем у контрольного. Введение фибры или суперабсорбирующего полимера приводит к снижению водопоглощения на 21,0 и 31,3 % по сравнению с контрольным составом, соответственно. Для составов высокопрочного легкого бетона, твердевшего в неблагоприятных условиях, введение суперабсорбирующего полимера по сравнению с контрольным составом приводит к повышению значения водопоглощения вследствие сорбции указанным полимером воды. При этом значение коэффициента скорости сорбции, при равном объеме порового пространства, характеризующего относительную плотность и размер капилляров, для составов высокопрочного легкого бетона с суперабсорбирующим полимером на 21,9 % меньше, чем для контрольного состава. Это закономерно характеризует наличие меньшего количества капилляров, формирующихся при испарении воды, а следовательно, указывает на меньшую интенсивность

испарения воды из твердеющего цементного камня в присутствии суперабсорбирующего полимера.

Изучена водонепроницаемость высокопрочного легкого бетона. Показано, что марка по водонепроницаемости таких бетонов, в том числе, модифицированных фиброй или суперабсорбирующим полимером, равна W20.

Исследована коррозионная стойкость высокопрочных легких бетонов. Показано, что наномодифицирование (введение наноразмерных гидросиликатов меди) позволяет повысить стойкость бетона к агрессивным средам, моделирующим протекание коррозии I, II и III видов по Москвину. Для наномодифицированных высокопрочных легких бетонов характерны наилучшие сочетания кинетических и энергетических параметров процесса деструкции. Использование суперабсорбирующих добавок в составах высокопрочных легких бетонов, твердевших в неблагоприятных условиях, способствует повышению стойкости к агрессивным средам.

Установлено, что контрольные составы высокопрочного легкого бетона имеют отличия в величине линейных деформаций в результате протекания щелоче-силикатной коррозии, а именно: их величина для бетонов, твердеющих в неблагоприятных условиях, выше в $\approx 3,5$ раза, чем для бетонов, твердеющих в нормальных условиях. Введение суперабсорбирующего полимера при $\sum A/C = 1,5\%$ позволяет снизить расширение бетона в 1,86 раза, а при увеличении $\sum A/C$ до 2,3 % модифицирование оказывается неэффективным. Использование коллоидных растворов гидросиликатов цинка и меди позволяет снизить величину линейного расширения в 1,45 и 1,29 раза, соответственно.

Исследованы деформации образцов высокопрочного легкого бетона при динамическом нагружении. Установлена высокая стойкость высокопрочных легких бетонов к действию циклической нагрузки 0,1; 1,0 и 10 МПа. Величина деформаций после 100 000 циклов нагружения для контрольного состава составляет 0,033...0,037 %, для образцов

высокопрочного легкого бетона с суперабсорбирующим полимером максимальное значение относительных деформаций не превышает 0,007...0,010 %, для образцов высокопрочного легкого фибробетона – 0,012...0,015 %, а для образцов высокопрочного легкого бетона с фиброй и с суперабсорбирующим полимером – 0,008...0,010 %.

Исследована стойкость высокопрочного легкого бетона к циклическому воздействию полного увлажнения и высушивания. Установлено, что этот вид воздействия оказывает негативное влияние на прочность энерго- и ресурсоэффективных композитов. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным технологическим решением для снижения интенсивности негативного влияния является использование полипропиленовой фибры и суперабсорбирующего полимера. Причем оптимальная концентрация суперабсорбирующего полимера составляет $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 1,5 \%$.

Установлено, что высокопрочные легкие бетоны обладают высокой маркой по морозостойкости F_{1300} . Применяемые технологические приемы имеют различную эффективность. Так, наноразмерный модификатор не оказывает существенного влияния на марку по морозостойкости высокопрочного легкого бетона, а хаотическое армирование высокопрочного легкого бетона обеспечивает повышение его сопротивления к циклическому замораживанию и оттаиванию: марка по морозостойкости увеличивается с F_{1300} до F_{1800} . Применение суперабсорбирующего полимера позволяет компенсировать твердение материала в неблагоприятных условиях и обеспечить получение высокопрочного легкого бетона с маркой по морозостойкости F_{1300} ; при дополнительном армировании такого бетона можно увеличить марку по морозостойкости на 1 шаг – до F_{1400} .

Показано, что легкие бетоны на полых микросферах обладают высокими теплофизическими свойствами. Предлагаемые бетоны обладают близкими к теплоизоляционным материалам показателями коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости. Это

позволяет классифицировать предлагаемые бетоны как материалы полифункционального назначения, обладающие как конструкционными качествами, так и высокими показателями теплоизоляционных свойств. Уточнены эмпирические формулы для расчета указанных теплофизических свойств высокопрочных легких бетонов.

Установлено, что высокопрочные легкие бетоны обладают коэффициентом линейного температурного расширения равным $(11,78 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Показано, что использование полипропиленовой фибры, суперабсорбирующих добавок или наноразмерного модификатора не приводит к значительному изменению коэффициента линейного температурного расширения.

Проведены исследования по определению теплостойкости высокопрочных легких бетонов. Установлены экспериментально-статистические модели влияния температуры и продолжительности нагрева на прочность таких бетонов, в том числе модифицированных наноразмерными гидросиликатами, дисперсно-армированных, а также содержащих суперабсорбирующий полимер. Установлен различный характер влияния эксплуатационных факторов на прочность высокопрочных легких бетонов. Показано, что, как правило, повышение температуры и продолжительности нагрева приводят к повышению прочности таких бетонов, за исключением высокопрочного легкого бетона с суперабсорбирующим полимером.

Выявлено, что в условиях нагрева до $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ энерго- и ресурсоэффективные наномодифицированные композиционные материалы сохраняют не менее 80 % марочной прочности. При этом наибольшую прочность имеют составы с полипропиленовой фиброй, для которых коэффициент теплостойкости составляет 89 %. Составы с суперабсорбирующим полимером имеют коэффициент стойкости, равный 79 %.

Проведены исследования по определению трещиностойкости высокопрочных легких бетонов. Установлено, что технологические приемы, использованные для повышения эксплуатационных свойств таких бетонов: введение наноразмерных гидросиликатов меди, введение фибры и/или использование суперабсорбирующего полимера, приводят к повышению значений критерия хрупкости (не менее, чем на 25 %). Наибольшее повышение критерия хрупкости закономерно наблюдается при дисперсном армировании высокопрочного легкого бетона.

Установлено, что прочность сцепления металлической арматуры с высокопрочным тяжелым бетоном в зависимости от диаметра арматуры изменяется в диапазоне от 7,0 до 11,0 МПа: для высокопрочного легкого бетона и высокопрочного фибробетона этот показатель составляет 4,0...6,2 МПа и 6,1...10,1 МПа, соответственно. Однако относительная прочность сцепления арматуры $R_{сц}/R_{сж}$ для высокопрочного легкого бетона и высокопрочного фибробетона для рассмотренных диаметров арматуры выше на 4,9...10,9 % и 60,0...77,8 %, соответственно, по сравнению с высокопрочным тяжелым бетоном. Это указывает на то, что при равной прочности бетона прочность сцепления с арматурой у высокопрочного легкого бетона и высокопрочного фибробетона выше по сравнению с высокопрочным тяжелым бетоном.

Структура разработанных бетонов оказывает существенное защитное воздействие на протекание коррозионных процессов в условиях агрессивного циклического воздействия увлажнения – высушивания. Удельное количество продуктов коррозии в составах с наномодификатором составляет 0,166...0,378 г/м² и 0,103...0,233 г/м² – с САП, что до 11,5 % и 45 % меньше чем у базового состава, соответственно.

На основе разработанного обобщенного критерия качества проведена многокритериальная оптимизация и сделан вывод о том, что разработанные новые научно обоснованные технологические решения не только обеспечивают достижение сформулированных требований, но и позволяют

превысить их более чем на 20 %. Применение предложенных технологических решений, в том числе наномодифицирования разработанных бетонов на полых микросферах, приводит к дополнительному повышению качества материала с $F_k = 1,20$ до $F_k = 1,37...1,42$, то есть на 14,2...18,3 %.

Разработанный энерго- и ресурсоэффективный наномодифицированный композиционный материал обладает высокими эксплуатационными свойствами: подвижность бетонной смеси – 168...211 мм, водоудерживающая способность бетонной смеси – 98,4...98,7 %, средняя плотность – 1400 кг/м³, прочность при изгибе – 4,8...6,8 МПа, прочность при сжатии – 60,3...72,3 МПа, удельная прочность – 43,1...51,6 МПа, модуль упругости – 14,6...15,3 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,28...0,37, прочность сцепления с арматурой – 6,2...9,6 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,68 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности – $4,04 \cdot 10^{-7}$ м²/с, удельная теплоемкость – 1,17 кДж/(кг·К), теплостойкость – 0,84...1,0, водопоглощение – 1,2...6,03 % мас., водонепроницаемость – W20, водостойкость – 0,85...1,19 % мас., деформации усадки – 9,9...12,9 мм/м, активность коррозии – 0,23...0,39 г/м², морозостойкость – F300...F800.

Это позволяет использовать его в производстве изделий для несущих элементов конструкций в промышленном и гражданском строительстве на территории стран западного Тихоокеанского региона. Комплекс эксплуатационных свойств разработанного материала обеспечивает конкурентоспособные преимущества изделий на мировом рынке недвижимости по показателю технико-экономической эффективности применения при строительстве многоэтажных зданий и сооружений.

10. Выполнено технико-экономическое обоснование применения энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов для строительной отрасли Тихоокеанского региона.

Результаты модельного расчета по технико-экономическому обоснованию применения энерго- и ресурсоэффективных

наномодифицированных композиционных материалов для жилищного строительства, основанного на изменении конструктивных особенностей зданий и сооружений, и учитывающего сокращение материалоемкости изделий, показывают высокую их экономическую эффективность.

Разработанные бетоны за счет увеличения этажности при сохранении несущей способности оснований и фундаментов обеспечивают экономический эффект более 35 %. А возможность повышения прочности позволяют снизить металлоемкость железобетонных конструкций не менее, чем на 20 %.

Высокую технико-экономическую эффективность энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов показывают в дорожном строительстве, что показано на примере расчета типовых мостовых конструкций. Результаты расчета свидетельствуют о том, что замена равнопрочного материала более легким аналогом позволяет снизить стоимость строительства на 34,6 % за счет изменения конструктивных особенностей сооружения (уменьшения числа пролетов).

Показано, что использование полифункциональных материалов для технологии 3D-печати в строительстве, позволяет обеспечить высокую экономическую эффективность, в том числе при возведении типовых на сегодня печатных конструкций. Использование энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов с высокой прочностью и низкой средней плотностью для «чернил» в строительных 3D-принтерах обеспечивает возможность печати элементов зданий, как конструкционного, так и теплоизоляционного назначения. При этом экономический эффект составляет от 30,9 %.

11. Проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 и показано, что предлагаемое технологическое решение по получению энерго- и ресурсоэффективного наномодифицированного композиционного материала является патентно чистым (не известно из

действующих в настоящее время охранных документов) и может быть использовано как в Российской Федерации, так и за рубежом.

12. Сформулированы технические требования и предложения по разработке и производству изделий из энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов, полученных на основе региональных сырьевых ресурсов, с учетом технологических возможностей и особенностей организации реального сектора экономики России и/или Вьетнама.

13. При проведении работ использовано научное оборудование, входящее в состав центра коллективного пользования «Головной региональный межвузовский центр коллективного пользования по вопросам развития и поддержания материально-технической базы учреждений профессионального образования ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

14. При проведении работы использованы уникальные научные установки «Комплекс для получения и исследования новых композиционных материалов» (2019 г.) и «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» (2020 г.) ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

15. Основными результатами выполненных прикладных научных исследований являются

– Промежуточные (2018, 2019 гг.) и заключительный (2020 г.) отчеты о выполненных работах.

– Акты об изготовлении образцов для исследования параметров структуры и строительно-технологических свойств в 2018 году, акты об изготовлении образцов энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов в 2019 году и акты об

изготовлении образцов энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов из региональных компонентов с учетом особенностей климата западного Тихоокеанского региона, характерного для регионов России для оценки долговечности в 2020 году.

- Методика исследования параметров структуры и строительно-технологических свойств.

- Методика проектирования энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

- Методика расчета состава энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

- Отчет о патентных исследованиях в 2018 году и отчет о дополнительных патентных исследованиях в 2020 году в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

- Карты подбора состава высокопрочного легкого бетона с заданными свойствами (средней плотностью и пределом прочности при сжатии).

- Технико-экономическое обоснование применения энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов для строительной отрасли Тихоокеанского региона.

- Технические требования и предложения по разработке и производству изделий из энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов, полученных на основе региональных сырьевых ресурсов, с учетом технологических возможностей и особенностей организации реального сектора экономики России.

Результаты работ отражены в 6 научных статьях в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science:

– Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Study of mineral additives for cement materials for 3d-printing in construction // IOP Conference Series: Materials Science And Engineering. 2018. C. 032009.

– Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Physical and mechanical properties of cement stone with superabsorbent polyacrylate solutions // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 5 (89). P. 179-186.

– Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02010.

– Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Effect of superabsorbent polymer solutions on structure formation and properties of cement compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.

– Inozemtcev A.S., Duong T.Q. High-strength lightweight concrete with internal curing for 3D-printing in construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.

– Grishina A.N. Study of the phase composition of nanomodified biocidal cement stone by X-ray analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.

Результаты работ так же продемонстрированы на 10 международных мероприятиях:

– XXI International Scientific Conference on Advanced In Civil Engineering «Construction The Formation Of Living Environment 2018» в период 25-27 апреля в г. Москва;

– XXII International Scientific Conference on Advanced In Civil Engineering «Construction the Formation of Living Environment» в период 18-21 апреля 2019 года в г. Ташкент, Узбекистан;

– 28-ая международная промышленная выставка Вьетнама (VIIF 2019) в период 8-11 октября 2019 года в г. Ханой, Вьетнам;

– International conference on building materials «Science and Technology of Building Materials for Sustainable Development» в период 31 октября-2 ноября 2019 года в г. Ханой, Вьетнам;

– конференция «Modeling and Methods of Structural Analysis» в период 13-15 ноября 2019 года в НИУ МГСУ, г. Москва;

– VI ежегодная национальная выставка ВУЗПРОМЭКСПО-2019 в период 11-12 декабря 2019 года в ЦВК «Экспоцентр», г. Москва.

– городской форум «Инновационные технологии в строительстве» 31 января 2020 года в г. Москва (ЦДП);

– XVI Международная научно-практическая конференция «Новости передовой науки – 2020» в период 15-22 мая 2020 года в г. София, Болгария;

– III Международная научно-практическая конференция «Современные строительные материалы и технологии» в период 26-29 мая 2020 года в г. Калининград;

– XXIII International Scientific Conference on Advance In Civil Engineering Construction The Formation Of Living Environment 2020 в период 23-26 сентября 2020 года (перенесено с апреля 2020 г.) в г. Ханой, Вьетнам.

По результатам выполненных ПНИ **получен патент** на изобретение RU 2718443. **Наномодифицированный высокопрочный легкий бетон.** Авторы: Иноземцев А.С., Королев Е.В. Дата опубликования: 06.04.2020. Бюл. 10. 7 с.

Иностранном партнером предоставлены аннотационные отчеты о выполненных работах, а также справки о финансировании работ за 2018-2020 гг. Работы иностранного партнера выполнены согласно договору о сотрудничестве с НИУ МГСУ от 07.08.2017 №369-163/07 и дополнительному соглашению №1 к договору о сотрудничестве от 03.09.2018 №369-214-1/03 и соответствуют техническому заданию и плану-графику соглашения № 14.583.21.0072 от 12.02.2018 г.:

– Выполнен анализ опыта разработки легких бетонов с высокой прочностью во Вьетнаме, странах Азиатского региона, в том числе

публикаций на региональных языках открытых источников русскоязычной научно-технической информации, демонстрирующие научно-технический опыт российского партнера в рамках проекта.

Установлено, что в качестве эффективного легкого заполнителя для получения высокопрочных легких бетонов может выступать легкая фракция из отходов от сжигания угля ТЭЦ, называемая «полые микросферы». Полые микросферы с плотной алюмосиликатной стенкой имеют микрометрические размеры и низкую плотность, что позволяет снижать среднюю плотность бетона до 1300 кг/м^3 , обеспечивать требуемую удобоукладываемость и предотвращать расслоение бетонных смесей.

Выявлено, что предел прочности при сжатии мелкозернистых бетонов на полых микросферах в сочетании с высокодисперсными минеральными добавками и поликарбоксилатным пластификатором может достигать 70 МПа при снижении средней плотности в 1,4...1,5 раза по сравнению с тяжелым бетоном.

Обеспечение высоких прочностных характеристик легких бетонов на полых микросферах достигается, в том числе за счет применения комплексного наноразмерного модификатора, привитого на поверхности микроразмерного наполнителя и микросфер.

– Выполнен выбор основных материалов с учетом возможностей импорта из стран Азиатского региона, в том числе полых микросфер. Показано, что минерально-сырьевая база Вьетнама и приграничных стран региона позволяет обеспечить снабжение основными материалами для производства легких бетонов с заданными эксплуатационными свойствами. Северные и южные регионы страны обладают как собственными, так и импортными мощностями производства портландцемента различных марок, кварцевых песков и минеральных добавок. Показано, что для высокопрочных легких бетонов в качестве заполнителя можно использовать вспученные материалы естественного или искусственного происхождения. К наиболее распространенным можно отнести керамзитовые заполнители, однако

присутствие в составе зол ТЭЦ до 2 % легкой фракции полых алюмосиликатных микросфер, открывает перспективы для развития нового вида легкого заполнителя для цементных систем. Кроме того, наличия кремнеземистого природного сырья позволяет реализовать технология получения стеклянных микросфер, обеспечивая обособленный от других рынков производственный цикл поставки материалов для легких композиционных материалов.

– Выполнены исследования композиционных материалов с содержанием полых микросфер, полученных в странах Азиатского региона. Показано, что основным поставщиком полых микросфер в страны Азиатского региона является Китайская народная республика. Физико-механические свойства алюмосиликатных микросфер, произведенных в Китае, отличаются в зависимости от месторождения угля и ТЭЦ, где он использовался для сжигания. Исследования цементных материалов на алюмосиликатных микросферы показали возможность получения строительных композитов со средней плотностью менее 1600 кг/м^3 и удельной прочностью более 25 МПа. Составление и конкретизация общих требований к полым микросферам для легких композитов на цементном вяжущем позволит выполнить оптимизацию параметров структуры и рецептур для проектирования составов с заданными эксплуатационными свойствами.

– Выполнен выбор модифицирующих добавок для конструкционных легких композиционных материалов местного производства. Показано, что основываясь на необходимости решения экологической проблемы утилизации золы-уноса во Вьетнаме целесообразным является ее применения в технологии бетонов. Многотоннажные отвалы золы являются эффективным сырьем для получения активных минеральных добавок, позволяющих за счет наличия активной кремнеземистой составляющей повышать прочностные свойства композита и осуществлять экономию цемента.

Установлено, что наномодификаторы для цементных материалов на территории Вьетнама имеют ограниченную доступность. Исследовано

влияние некоторых наноразмерных углеродных и силикатных модификаторов. Установлены преимущества и недостатки исследуемых модификаторов, показаны особенности их влияния на свойства цементных композитов.

– Разработаны основные принципы проектирования конструкционных легких композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами, основанные на достижении требуемой средней плотности путем замещения плотных фракций легким заполнителем определенного размера в оптимизированном высокопрочном композите. Особенности регионального климата формируют особые требования к эксплуатационным свойствам легких бетонов, область применения которых основывается на обеспечении и сохранении заданных характеристик при высокой влажности и температуре. Показано, что разработка таких конструкционных материалов должна выполняться с учетом особенностей протекания деструктивных процессов, вызванных агрессивным климатом и химической активностью местного сырья, например, необходимо учитывать протекание щелоче-силикатной коррозии.

– Выполнены исследования структуры и свойств конструкционных легких композиционных материалов. Установлено, что физические свойства функционального заполнителя позволяют сформировать плотноупакованный каркас из легких частиц с закрытой пористостью и равномерно распределенной по поверхности цементно-минеральной матрицей. Сферическая форма формирует условия перераспределения внутренних напряжений, увеличивая сопротивляемость внешнему механическому давлению. За счет насыщенной газовой фазы внутри сфер, композиционные материалы обладают локализованной поровой структурой, определяющей его низкую водопотребность и как следствие высокое сопротивление диффузионным процессам из эксплуатационной среды, а значит и негативным внешним факторам. Показано, что особенности поверхности полых микросфер требует применения эффективных пластифицирующих

добавок в смесях на их основе для обеспечения требуемых реотехнологических свойств.

Установлено, что определяющим фактором при разработке композиционных материалов средней плотностью менее 1600 кг/м^3 является содержание легкого наполнителя. При этом ключевым для обеспечения высоких физико-механических характеристик является снижения негативного эффекта, вызванного насыщением структуры материала менее прочной фазой. Рецептурно-технологическая оптимизация, направленная на установление базовых соотношений компонентов и технологических режимов приготовления, позволяет сформулировать общие принципы для получения легкого материала конструкционного назначения. Комплексное влияние модифицирующих добавок, в том числе наноразмерных, обеспечивает формирование прочной и плотной структуры не только цементно-минеральной матрицы, но и границы раздела фаз. При этом ограничение для достижения высоких прочностных характеристик композита является прочность стенки полого заполнителя.

– Установлены оптимальные составы и технологические режимы получения энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов. Установлены оптимальные технологические решения для получения бетона со средней плотностью не более 1600 кг/м^3 при объемном содержании легкого заполнителя – 39...53 %. Использование зол-уноса в качестве минеральной добавкой в сочетании с тонкими кварцевыми песками при общем объемном содержании 6,0...11,0 % обеспечивает требуемую подвижность и предотвращают расслоение бетонных смесей. При этом обеспечивается предел прочности при сжатии не менее 40 МПа. Применение поликарбоксилатных пластификаторов, обеспечивающих высокий водоредуцирующий эффект, является ключевым фактором, обеспечивающим удобоукладываемость бетонной смеси при изготовлении сборных или монолитных конструкций. Установлено, что составы энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов за счет

низкой теплопроводности (менее $0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$) позволяют обеспечить снижение затрат на тепловлажностную обработку за счет снижения температуры и продолжительности изотермической выдержки.

– Исследованы эксплуатационные свойства конструкционных легких композиционных материалов с учетом специфики тропического климата.

Установлено, что условия эксплуатации бетонных конструкций для территории Вьетнама характеризуются широким спектром воздействующих внешних факторов в виде высокой температуры (температура в течение года изменяется от $+1$ до $+45^\circ\text{C}$); влаги из осадков или при контакте с водой в области действия грунтовых, паводковых вод (годовой объем осадков – $500\dots3000$ мм, интенсивность дождя 5 мм/мин); переменные циклы увлажнения – высушивания (влажность – $75\dots100\%$); реже замораживания–оттаивания (для горных территорий); коррозии различного рода (температура воды – от $+1$ до $+40^\circ\text{C}$, содержание хлоридов в атмосфере – $30\dots300 \text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$), а также техногенных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании бетонов для изготовления конструкций различного назначения.

Анализ погодных-климатических условий эксплуатации бетонных конструкций различного назначения на территории Вьетнама показал, что совокупность влияющих внешних воздействий является фактором, определяющим необходимые качественные параметры композиционного материала. Исследована способность сохранения механических и деформативных характеристик конструкционных легких композиционных материалов при динамическом нагружении, в том числе после воздействия погодных условий.

Показано, что высокие прочность и модуль упругости являются основными показателями свойств бетона, характеризующими его конструкционную надежность. Низкая средняя плотность (не более $1300 \text{ кг}/\text{м}^3$) для бетонов конструкционного назначения позволит снизить нагрузку на фундаменты (до 40%) в условиях эксплуатации, а также

обеспечить дополнительное преимущество по теплотехническим характеристикам в условиях с экстремальными температурами. Минимальное содержание сообщающихся капилляров и большого количества открытых пор (общая пористость – до 35 %, открытая пористость – менее 2,5 %) обеспечивают низкие насыщение и проницаемость в условиях воздействия воды (высокие барьерные свойства) и, как следствие, отсутствие сопутствующих процессов образования дефектов при замерзании или в результате коррозии под влиянием агрессивных сред. Наличие в структуре бетона армирующих элементов и снижение инерционности вследствие снижения его средней плотности позволяют прогнозировать повышение стойкости конструкций в условиях знакопеременных циклических нагрузок при землетрясении и снизить риск обрушения.

– Выполнена оценка эффективности конструкционных легких композиционных материалов в строительной отрасли во Вьетнаме и России.

Показано, что эффективность конструкционных легких композиционных материалов не может быть оценена по экономическому критерию, основанному на расчете себестоимости, так как не учитывает технологические преимущества. Для этого целесообразно использовать комплексные показатели, учитывающие эксплуатационные свойства материала или особенности его использования в здании или конструкции. Установлено, что исследуемые конструкционные материалы со средней плотностью не более 1600 кг/м^3 и удельной прочностью не менее 25 МПа позволяют увеличить этажность зданий на 7 этажей без изменения несущей способности фундамента. Это обеспечивает увеличение удельной полезной площади на 1 м^2 земли под застройку на 26,6 %. Показан подход для оценки эффективности, основанный на уменьшении расхода материалов для устройства фундамента при сохранении этажности здания или возможность строительства в условиях сложных грунтов.

При этом технология высокопрочного легкого фибробетона, сочетающего низкую среднюю плотность и высокую прочность, связана с

увеличением себестоимости материала, поэтому в качестве существующего ограничения можно выделить: зависимость экономической эффективности от конструктивных особенностей конкретного здания, условий строительства и местных ресурсов, используемых для изготовления бетона.

– Изготовлены изделия из конструкционного легкого композиционного материала в масштабах производства из региональных материалов Вьетнама.

– Модельные исследования деформационных свойств изделий из конструкционного легкого композиционного материала в сейсмических условиях Вьетнама.

Установлено, что использование энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов для строительства многоэтажных зданий в эксплуатационных условиях Тихоокеанского региона позволяет обеспечить ряд преимуществ по сравнению с традиционным тяжелым бетоном. Расчеты показывают, что суммарное перемещение конструкций от действия собственного веса может быть уменьшено до 44,0 %. Воздействие ветровых нагрузок приводит к меньшим на 2,4...2,6 % деформациям при уменьшении периода первых 3 колебаний конструкции здания на 11,3 %.

– Выполнена оптимизация технологии производства материалов на основе региональной минерально-сырьевой базы Вьетнама для конструкционных легких композиционных материалов с учетом результатов модельных исследований.

С учетом модельных исследований, показавших, что использование энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов позволит снизить на 44,0 % суммарное отклонение конструкций 16-тиэтажного здания от действия собственного веса; на 2,5 % воздействие ветровых нагрузок и соответствующему периоду колебаний на 11,3 %; выполнена оптимизация технологии по ключевым рецептурно-технологическим факторам: содержание полых микросфер v_f^{MS} , цементно-минерального комплекса (цемент и микрокремнезем) v_f^{C+SF} и водоцементное

отношение W/C , а также скорость ϑ_{mix} и продолжительность t_{mix} перемешивания компонентов.

– Разработаны типовые конструкции из конструкционных легких композиционных материалов на основе региональной минерально-сырьевой базы Вьетнама, изготовлены бетонные смеси и выполнено бетонирование конструкций из конструкционных легких композиционных материалов, приготовленных в производственных условиях.

Для изготовления конструкций в производственных условиях разработан проект типовых железобетонных балок квадратного сечения со стороной 295 ± 5 мм и длиной 1980 ± 20 мм. Проектная масса изделия 360 ± 25 кг при средней плотности бетона 1400 ± 50 кг/м³ и коэффициенте армирования $\mu = 0,08$.

На основе минерально-сырьевой базы Вьетнама с использованием портландцемента производства «Бут Шон» (Вьетнам), микрокремнезема «АС Micro SF 90» (Китай), фракционированного и молотого речного песка реки «Ло» (Вьетнам), полых микросфер компании «Shanxi Hainuo Technology» (Китай), суперпластификатора «Polycarboxylate GLENIUM SP8S» (Япония) и полипропиленовая фибра «Grace MicroFiber» (США) изготовлены бетонные смеси и выполнено бетонирование трех изделий из конструкционных легких композиционных материалов. Требования к используемым сырьевым материалам соответствовали требованиям действующих нормативов и технических стандартов социалистической республики Вьетнам.

– Проведена промышленная апробация технологии энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов и строительство опытной конструкции в условиях тропического или субтропического климата западного Тихоокеанского региона.

Апробация технологии энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов выполнена в провинции Vinh Phuc компанией Minh Tien в феврале 2020 года. При этом в

качестве рабочего состава использовалось следующее соотношение компонентов, мас. %:

- Портландцемент СЕМ I 42,5 N – 44,0;
- Полые микросферы «Shanxi Hainuo Technology» – 18,3;
- Фракционированный кварцевый песок фр. 0,16...0,63 мм – 9,3;
- Микрокремнезем «АС Micro SF 90» – 7,7;
- Песок молотый – 4,0;
- Фиброволокно «Grace MicroFiber» – 0,6;
- Пластификатор Polycarboxylate GLENIUM SP8S» – 0,5;
- Вода – остальное.

Дополнительно (более 100 %) металлическая арматура – 1,4.

Подвижность бетонной смеси по диаметру расплыва усеченного конуса на встряхивающем столике составила 170 мм.

В феврале-марте 2020 года в регионе Ханой зафиксированы следующие усредненные климатические условия, характеризующие климат западного Тихоокеанского региона:

- Дневная температура – 19,9 °С;
- Ночная температура – 15,1 °С;
- Суточная температура – 17,5 °С;
- Продолжительность дневного солнечного воздействия – 2 часа;
- Количество осадков – 28 мм;
- Количество дождливых дней – 12;
- Влажность – 85 %;
- Скорость ветра – 7,6 км/ч.

– Выполнена организация технологического процесса в соответствии с результатами оценки свойств изделий и конструкций, приготовленных в производственных условиях.

Испытания образцов образцов-балочек 100×100×400 мм из смеси основного замеса, отобранной при изготовлении балок показали следующие результаты в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях:

- Средняя плотность бетона 1420 ± 15 кг/м³;
- Предел прочности при изгибе – $6,0 \pm 0,2$ МПа;
- Предел прочности при сжатии – $61,3 \pm 2,4$ МПа.

Таким образом, организация процесса изготовления изделий из энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов включает в себя следующие технологические этапы:

- Подготовка исходных компонентов;
 - Приготовление бетонной смеси;
 - Формование изделия (укладка бетона);
 - Уход за бетоном (тепло-влажностная обработка);
 - Распалубка форм, проверка ОТК и складирование изделий.
- Осуществлены демонстрация и трансфер технологии.
- Выполнено технико-экономическое обоснование производства и

использования конструкционных легких композиционных материалов в строительной отрасли Тихоокеанского региона из региональных ресурсов Вьетнама.

Установлено, что использование энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов позволяет снизить материалоемкость строительства сооружений дорожного строительства на 29 % за счет увеличения длины пролета. При этом себестоимость всей конструкции изменяется на 2,9 %. Совокупная технико-экономическая эффективность применения разработанного бетона складывается из общей себестоимости элементов конструкций и затрат на строительство и их монтаж. Результаты расчета свидетельствуют о возможности снижения стоимости строительства при замене равнопрочного материала на 34,6 %.

Представленные сведения о результатах работ Иностранного партнера подтверждают возможность получения энерго- и ресурсоэффективных композиционных материалов конструкционного назначения с средней плотностью не более 1600 кг/м³ и прочностью более 40 МПа на основе

минерально-сырьевой базы Вьетнама с высокой долговечностью в климатических условиях Тихоокеанского региона.

Таким образом, результаты прикладных научных исследований «Разработка новой технологии энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов для строительства в эксплуатационных условиях Тихоокеанского региона на основе региональных сырьевых ресурсов России и Вьетнама» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» за период 2018-2020 гг. выполнены в полном соответствии с техническим заданием на выполнение работ по соглашению о предоставлении гранта в форме субсидии.

Совокупность результатов, полученных в рамках настоящих прикладных научных исследований, позволили установить новые знания, дополняющие теорию структурообразования цементных композитов, предложить механизмы структурообразования, устанавливающие фундаментальные взаимосвязи между параметрами структуры и составом, выявить новые факты структурообразования композитов на легких пористых заполнителях при воздействии различных эксплуатационных факторов, установить новые рецептурные и технологические зависимости, позволяющие производить оптимизацию и проектирование состава энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов. Кроме того, обеспечено интегрирование российской строительной науки в общемировую научно-исследовательскую сферу посредством публикаций и участия в международных мероприятиях, расширена география международного научно-технического сотрудничества в Тихоокеанском регионе, в том числе в части подготовки научных кадров.

Полученные энерго- и ресурсоэффективные наномодифицированные композиционные материалы по достигнутому научно-техническому

результату не имеют мировых аналогов. Технический результат защищен патентом Российской Федерации на изобретение.

Энерго- и ресурсоэффективные наномодифицированные композиционные материалы могут быть использованы при изготовлении железобетонных и бетонных изделий в промышленном и гражданском строительстве для возведения многоэтажных жилых и общественных зданий, при строительстве дорожных мостов, эстакад и развязок, при изготовлении большепролетных изделий из бетона, а так же при возведении сооружений специального назначения (морские платформы и др.).

Уменьшенная масса конструктивных элементов зданий, подвижность бетонных смесей и высокая прочность энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов позволяет решать сложные архитектурные задачи и расширяет область применения бетонов в качестве конструкционных материалов.

Дополнительной особенностью такого материала является возможность его использования для строительства в условиях сложных грунтов (береговая линия рек, озер, морей), в районах с развитыми подземными коммуникациями (метро, тоннели), а также в сейсмически нестабильных регионах. Это особенно актуально для мегаполисов или туристических регионов (отели, гостиницы) России и/или Вьетнама. Энерго- и ресурсоэффективный легкий бетон может быть применен для изготовления теплых фасадов, устройства балконных конструкций, производства специальных сырьехранилищ сферической формы и т.д.

Кроме того, энерго- и ресурсоэффективные наномодифицированные композиционные материалы перспективны для строительства по технологии 3D-печати.

Полученные результаты позволят создать условия для реализации технологии новых энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных строительных материалов в Тихоокеанском регионе.

Ориентирование и адаптация технологии на восточно-азиатский рынок открывает перспективы скорой ее реализации и развития в реальном секторе экономики стран-участников проекта.

Разрабатываемые композиты предполагается использовать при изготовлении изделий из железобетона для промышленного и гражданского строительства при возведении многоэтажных жилых и общественных зданий, при строительстве дорожных мостов, эстакад и развязок, при изготовлении большепролетных изделий, а так же при возведении сооружений специального назначения (морские платформы и др.). Кроме того, такие материалы могут получить распространение в специальном строительстве (атомная отрасль, электроснабжение и т.д.).

Дополнительной особенностью является возможность применения разрабатываемого материала для строительства в условиях сложных грунтов (береговая линия рек, озер, морей), в районах с развитыми подземными коммуникациями (метро, тоннели), а также в сейсмически нестабильных регионах, что делает такой материал подходящим для строительства в густонаселенных городах, в туристических регионах (отели, гостиницы) и т.д.

Для отечественных участников консолидация с азиатским партнером (Вьетнамский институт строительных материалов) открывает возможность для внедрения указанной технологии в странах Тихоокеанского региона (Китая, Японии, Таиланда, Вьетнама и других стран).