

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента **Иноземцева Александра Сергеевича** на диссертационную работу **Лаврова Ивана Юрьевича** на тему «Химико-технологические факторы формирования вибродинамических свойств высокофункциональных цементных бетонов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия

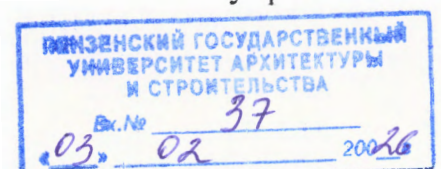
Для отзыва представлен автореферат объемом 28 страниц и диссертация, состоящая из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 130 наименований и 2 приложений. Содержание работы изложено на 198 страницах машинописного текста, включающего 115 рисунков и 30 таблиц.

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Лаврова И.Ю. посвящена направлению по расширению области применения высокопрочных бетонов в современной промышленности, как альтернативы металлическим материалам, эксплуатируемых в условиях интенсивных динамических нагрузок. Решение задачи по получению бетонов с высокой прочностью и эффективным поглощением вибрационных нагрузок позволит обеспечить замену металлических сплавов в ряде узлов и частей технологического оборудования, промышленных конструкций и специальных сооружений. Разработка технологии получения бетонов с повышенными вибродемпфирующими свойствами при сохранении высокой прочности позволит изготавливать указанные конструкции монолитным способом формования, исключая энергоёмкие высокотемпературные технологические процессы производства и монтаж изделий из сплавов черных металлов. В результате это приведет к сокращению производственного цикла, снижению стоимости и повышению экологической эффективности. В этой связи разработка научно обоснованных методов проектирования бетонов с заданными вибродинамическими свойствами представляет собой актуальную задачу, решение которой требует изучения закономерностей изменения диссипативных свойств цементного бетона от его состава и структуры.

Таким образом, тематика представленного диссертационного исследования Лаврова И.Ю. является актуальной и отвечает стратегическим задачам развития наукоёмких производств, ресурсосбережения и технологического суверенитета, что в полной мере соответствует приоритетам научно-технического развития Российской Федерации.

Целью работы является разработка научно обоснованного технологического решения по получению высокопрочных бетонов с управляемыми



вибродемпфирующими и деформативными свойствами для изготовления промышленных конструкций.

2. Структура и содержание диссертации

Во введении автором обоснована актуальность темы исследования, определены его цели и задачи. Также обозначены научная новизна и практическая значимость исследования. Тема выбрана в связи с потребностью в увеличении перечня конструкционных материалов, обладающих более высокими демпфирующими свойствами по сравнению с черными металлами. Отмечается, что к технологии предъявляется требование по, так называемой, «углеродной эффективности», и особую практическую востребованность носит исключение высокотемпературных процессов на этапах изготовления элементов и монтажа конструкций.

Глава 1 посвящена анализу современных технологий создания материалов для применения в промышленном строительстве и машиностроении. Автором рассматривается мировой опыт по применению различных материалов, используемых в конструкциях, подверженных вибрации, и сравниваются их характеристики с возможностями высокофункциональных бетонов. Анализ, проведенный автором, убедительно показал потенциал успешного применения современных бетонов в различных областях строительства, включая возведение опор ветрогенераторов, каркасов заводских цехов, конструкций туннелей, мостов и резервуаров. В главе также описаны основные трудности при проектировании и эксплуатации цементных бетонов в составе вибронагруженных конструкций, рассмотрены методы исследования таких материалов. Автором делается вывод о перспективности составов, сочетающих высокие демпфирующие свойства и низкую материалоемкость конструкций. В завершении главы сформулирована основная задача, направленная на разработку высокопрочного самоуплотняющегося бетона с высокой стойкостью к динамическим нагрузкам.

В главе 2 детально описаны материалы, применяемые в работе, а также методы исследования и используемое оборудование. В ней также приведены особенности разработанных автором методов испытаний.

Методологическая основа включает как стандартные, так и усовершенствованные методики. Для исследования материалов применялись современные методы химического, рентгенофазового и термического анализа. Центральное место заняли авторские разработки и модификации оборудования, направленные на оценку вибродинамических и деформативных характеристик. Сформирована научно-методологическая основа, обеспечивающая корректность и воспроизводимость последующих экспериментальных исследований.

Глава 3 посвящена разработке составов высокофункциональных бетонов. В главе изучены закономерности формирования структуры бетона с высокой способностью к рассеиванию энергии колебаний. Автором с использованием численного моделирования гетерогенной структуры бетона, представленной тремя фазами (матрица, заполнитель и граница раздела фаз) выполнено прогнозирование свойств разрабатываемых бетонов. Особое внимание уделяется влиянию микроструктуры цементного камня, в частности этtringитовой фазы, на вибропоглощение.

Дополнительным целевым параметром качества для выбранного в работе объекта исследования выступает усадка, для снижения которой предложено использовать добавку на основе сульфoалюмината кальция (Denka CSA20) и бутилцеллозольв для управления поверхностным натяжением капиллярной жидкости. Совокупный эффект от противоусадочной добавки Denka CSA20, связанный с синтезом кристаллов этtringита, выражается в улучшении деформативных и диссипативных свойств бетона. Это подтверждают результаты вибродинамических испытаний, показывающие увеличение логарифмического декремент на 4,3–17,4 % при повышении сульфoалюминатной добавки о 15 % от массы цемента. В комбинации с бутилцеллозольвом позитивный эффект от предложенных добавок увеличивается на 4...5 %.

К несомненным достоинствам работы соискателя стоит отнести не тривиальный подход к решению поставленных задач исследования. Для проведения вибродинамических испытаний автором предложена экспериментальная установка для анализа вынужденных и свободных колебаний. С целью повышения точности определения логарифмического декремента затухания предложен усовершенствованный алгоритм, основанный на построении экспоненциальной модели сигнала колебаний. Для обоснования корректности предлагаемого подхода автором выполнена верификация полученных результатов испытаний с результатами численного моделирования.

В главе предложен и экспериментально обоснован комплексный подход к проектированию составов бетонов с заданными вибродемпфирующими свойствами, включающий целенаправленное формирование структуры цементного камня, модификацию межфазных границ и оптимизацию рецептуры посредством химических добавок.

В главе 4 представлены результаты экспериментального исследования свойств разработанных составов бетонов и их оптимизации. Автором установлено, что увеличение удельного расхода цемента с 300 до 734 кг/м³ приводит к росту логарифмического декремента затухания в 1,22 раза, что объясняется повышением гетерогенности микроструктуры и увеличением доли гелевых фаз, затрудняющих распространение упругих колебаний.

Исследование влияния минеральных добавок показало, что после 7 суток твердения наблюдается снижение динамического модуля упругости и демпфирующей способности, связанное с потерей химически несвязанной воды. При этом бетоны без пуццолановых добавок демонстрируют лучшее вибропоглощение, поскольку микрокремнезём способствует формированию гелевых C-S-H структур.

Исследование морозостойкости показало, что после циклического замораживания-оттаивания оптимальные составы сохраняют стабильность характеристик, тогда как составы с избытком расширяющей добавки демонстрируют значительное снижение модуля упругости (до 60 %) и значительный рост демпфирования вследствие образования микротрещин. Определение коэффициентов линейного термического расширения показало, что для разработанных бетонов этот параметр находится в диапазоне $(11,7...12,9) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, что сопоставимо с черными металлами и существенно ниже, чем у полимербетонов.

В главе 5 представлены результаты верификации разработанных материалов и прототипов бетонных конструкций посредством физического моделирования и натурных испытаний. Автором выполнено моделирование работы вибронагруженных конструкций из разработанного бетона, включая несущий портал фрезерного ЧПУ-станка. Сравнение результатов натурных испытаний и численного моделирования показало их хорошую сходимость в заданном частотном диапазоне.

Таким образом, комплексное моделирование, дополненное экспериментальной проверкой, подтвердило адекватность применённых расчётных моделей и продемонстрировало эффективность использования высокофункциональных бетонов в вибронагруженных конструкциях промышленного оборудования.

В заключении представлены основные научные результаты и положения, подтверждающие решение поставленных задач, а также сформулированы рекомендации и перспективы для дальнейших исследований в данной области.

Приложения содержат документацию, подтверждающую практическую значимость работы (акты внедрения) и апробацию представленных результатов (диплом победителя программы «УМНИК»).

Содержание **автореферата** соответствует диссертационной работе.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обеспечиваются системным подходом к планированию и проведению

исследований. В работе представлено системное изложение экспериментальных данных, их анализ и выявленные закономерности, логически ведущие к достижению заявленной цели. Теоретические положения и экспериментальные выводы опираются на фундаментальные принципы механики композитов, а также на анализ современных достижений отечественных и зарубежных учёных в области высокофункциональных бетонов. В ходе работы применялось сертифицированное и поверенное лабораторное оборудование, а также стандартизированные и оригинальные методики испытаний. Для анализа материалов использовались современные физико-химические методы: рентгенофазовый, дифференциально-термический, калориметрический анализ, позволившие установить взаимосвязи между составом, микроструктурой и макроскопическими свойствами бетонов.

Степень достоверности экспериментальных данных подтверждается корректным применением математических методов планирования и обработки результатов, а также валидацией данных численного моделирования с результатами натурных испытаний. Расхождение между расчётными и экспериментальными значениями ключевых вибродинамических параметров не превысило 1...5 %, что находится в пределах допустимой погрешности для решения инженерных задач.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс и используются в научно-исследовательской деятельности, а также в реальном производстве по заказу промышленных предприятий. Полученные результаты и выводы не противоречат известным научным данным и подтверждаются 20 публикациями, в том числе 10 – в рецензируемых журналах, в том числе индексируемых в международных базах.

Таким образом, основные выводы и рекомендации, представленные в диссертации и автореферате, объективно отражают результаты проведённых исследований и подтверждают решение поставленных задач.

4. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Полученные соискателем результаты и сформулированные выводы обладают научной новизной, являются обоснованными и доказательными. В качестве основных научных результатов, определяющих новизну работы, можно выделить следующие. Автором установлены и теоретически обоснованы принципы целенаправленного формирования структуры высокопрочных самоуплотняющихся бетонов с заданными вибродемпфирующими и деформативными свойствами, заключающиеся в управлении рецептурой и свойствами на разных масштабных уровнях, направленном на увеличение

энтропийного фактора и снижения капиллярных сил усадки на микроуровне; создании демпфирующего слоя на границе заполнителя и матрицы на мезоуровне; оптимизации соотношения и свойств компонентов на макроуровне.

Установлена зависимость вибропоглощающей способности бетона от минерально-фазового состава цементного камня. Доказана эффективность применения эластичного кремнийорганического полимера для создания демпфирующего межфазного слоя, а также наличие синергетического эффекта от совместного использования расширяющих сульфоалюминатных добавок и модификаторов поверхностного натяжения (бутилцеллозольва) для компенсации усадочных деформаций.

В работе экспериментально подтверждено, что разработанные технологические решения позволяют повысить коэффициент демпфирования бетона на 45...60 % при введении 5 % модифицированного заполнителя, а также сократить содержание расширяющей добавки в 1,6 раза для получения безусадочных составов высокопрочного бетона. Разработаны и внедрены усовершенствованные методики и оригинальное оборудование для экспресс-оценки совместимости компонентов и вибродинамических характеристик бетонов.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования

Теоретическая ценность работы заключается в расширении научных представлений о влиянии микроструктуры и минерального состава цементного камня на вибродинамические свойства высокопрочных бетонов. Установлены закономерности влияния этtringитовой фазы и общей степени кристалличности системы на диссипативную способность материала. С практической точки зрения, автором разработаны и внедрены научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие получение высокопрочных бетонов с заданными функциональными свойствами. Разработанные рецептуры и методика подбора компонентов позволяют целенаправленно регулировать соотношение между демпфированием и деформативностью бетона. Важным практическим результатом является доказанная экономическая эффективность: снижение себестоимости разработанных составов по сравнению с зарубежными аналогами, а также сокращение расхода дорогостоящей расширяющей добавки в 1,6 раза.

Практическая востребованность и реализуемость полученных результатов подкреплены успешным внедрением бетонов для изготовления станин испытательного оборудования, несущий каркас фрезерного станка с ЧПУ, о чем свидетельствует акт опытно-производственной апробации на предприятии ООО «СКАЙ ТЕХНОЛОДЖИ 2015».

Разработанные методики испытаний и экспериментальное оборудование внедрены в учебный и научно-исследовательский процесс.

6. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научных изданиях

Результаты исследований опубликованы в 20 научных работах. Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в 13 научных публикациях, в том числе в 10 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; в трех научных работах в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных и системе цитирования SCOPUS. Техническая новизна решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2820187 (30.05.2024).

Публикации автора в полной мере отражают основное содержание и научные выводы диссертации.

7. Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В разделе 3.1 (стр. 71) для подтверждения гипотезы о колебательном движении ядра заполнителя-демпфера автор прибегает к анализу лишь 2 конфигураций модели из 4 рассмотренных в таблице 14, а именно К3 и К4, демонстрируя при этом почти двухкратное снижение собственной частоты. Однако автором не описан материал ядра (ТФ-10), оказывающий такой эффект. Кроме того, варьирование одновременно нескольких параметров модели не позволяет установить их вклад в изменение рассчитываемой величины.
2. Чем объясняется выбор мелкозернистого бетона в качестве объекта дифференциального термического анализа для установления влияния добавки Denka на формирование этtringита? Многокомпонентная система создает сложности для объективной интерпретации тепловых эффектов на дериватограммах. Вызывает вопрос отсутствие на рисунке 30 (стр. 80) характерных эндоэффектов для разложения портландита ($\sim 460-550$ °C) и карбонатов кальция ($\sim 700-800$ °C).
3. В чем заключается методология разработки высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов в разделе 3.2? Из текста диссертации следует, что автором осуществлен лишь подбор рецептуры на основе рекомендаций из литературных источников.
4. На стр. 112 в разделе 3.2.2 описывается покрытие поверхности заполнителей, однако не приведены данные о стабильности покрытия в

процессе твердения и эксплуатации, а также о влиянии на адгезию к цементной матрице. Кроме того, не переведены сведения о прочностных испытаниях образцов с модифицированным заполнителем, поскольку покрытие заполнителей резиноподобным материалом может привести к снижению не только деформативных, но и прочностных показателей.

5. В разделе 4.5 автором используется метод математического планирования экспериментов для оптимизации состава бетона, однако ни для одного из оптимизируемых показателей качества (усадка, динамический модуль упругости, логарифмический декремент затухания) не приведены полученные уравнения регрессии, что не затрудняет объективный анализ.
6. Сравнительный анализ разработанных ВФСУБ проводится в основном с традиционными материалами (чугун, сталь) и бетоном на основе Nanodur. В то же время, для полноты картины конкурентоспособности целесообразно, было бы привести прямое сопоставление вибродемпфирующих свойств и удельной стоимости с современными высоконаполненными полимербетонами, которые активно применяются в высокоточном машиностроении.
7. В работе встречается некорректное использование терминов, например:
 - автор не обосновано объединяет понятия «высокофункциональный» и «высокопрочный» бетон при описании объекта исследования;
 - на стр. 5 использовано словосочетание «цементное литье» в контексте конкурентоспособности технологии бетона;
 - на стр. 8 автор описывает «взаимозависимость» состава и вибропоглощающей способности бетона;
 - на стр. 100 технологический показатель диаметр расплыва из конуса Хагерманна относится к реологическим свойствам;
 - на стр. 147 раздел 4.5 «Многокритериальная оптимизация...» результатов такой оптимизации не содержит.

Высказанные замечания не являются критичными, носят рекомендательный характер и не снижают общее положительное впечатление о диссертационной работе.

8. Заключение

Диссертационная работа Лаврова Ивана Юрьевича на тему «Химико-технологические факторы формирования вибродинамических свойств высокофункциональных цементных бетонов» представляет собой завершённую самостоятельно выполненную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи целенаправленного формирования демпфирующих и деформативных свойств цементных бетонов за счёт управления

химико-технологическими факторами на микро-, мезо- и макроуровне, имеющей значение для развития строительного материаловедения.

Учитывая актуальность темы исследования, теоретическую и научную новизну, практическую значимость работы, считаю, что диссертация на тему «Химико-технологические факторы формирования вибродинамических свойств высокофункциональных цементных бетонов» соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции, предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Лавров Иван Юрьевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Официальный оппонент:

доктор технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Иноземцев Александр Сергеевич

«21» января 2026 г.

Подпись Иноземцева А.С. заверяю:



НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
КАДРОВОГО ДЕЛОПРОИЗ-
водства УРП
А.В. ПИНЕГИН
21.01.2026.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Адрес: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Телефон: +7 (499) 188-04-00

E-mail: InozemcevAS@mgsu.ru

С отзывом официального оппонента ознакомлен. 03.02.2026 Лавров