

На правах рукописи



ХРЕНОВ Георгий Михайлович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
В ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО
БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Пухаренко Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Славчева Галина Станиславовна**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», кафедра Технологии
строительных материалов, изделий и конструкций,
профессор;
Смирнова Ольга Михайловна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет», кафедра Строительства горных
предприятий и подземных сооружений, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарева».

Защита диссертации состоится «06» октября 2021 в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.07** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220).

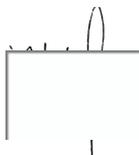
Тел./Факс: (812) 316-58-73

E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/hrenov-georgiy-mihaylovich>.

Автореферат разослан «01» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Конюшков Владимир Викторович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Способы непрерывного безопалубочного формования бетонных и железобетонных изделий и конструкций, в том числе технология трехмерной печати, соответствуют современному уровню развития техники и демонстрируют высокую конкурентоспособность благодаря значительной степени автоматизации и роботизации технологических процессов, низкой металлоемкости производства и возможности выпуска изделий широкой номенклатуры при минимальной переналадке линий. Вместе с тем, указанные технологии до сих пор не стали ведущими в отрасли, их широкое распространение сдерживается рядом причин, одной из которых является нарушение сплошности свежееотформованных изделий в результате внешних механических воздействий, которые могут носить как непреднамеренный (случайный) характер, так и целенаправленный, связанный с необходимостью придания изделию или конструкции нужной формы. И в том и другом случае, бетонная смесь, не способная сопротивляться значительным нагрузкам, деформируется, а изделие приобретает нежелательные дефекты и трещины еще до начала твердения.

Для устранения указанного недостатка специалисты в основном сосредоточили усилия на разработке и совершенствовании технологического оборудования, а также программного обеспечения для полной компьютеризации процессов. Гораздо меньше внимания уделяется исследованию поведения бетонной смеси в новых условиях, определяющих появление указанных выше нагрузок и воздействий, описанию характера и величины деформаций, вызванных этими воздействиями, а также разработке методов и средств улучшения свойств материала, обеспечивающих возможность его деформирования без нарушения сплошности. В качестве материалов для новых технологий по-прежнему применяют традиционные бетонные смеси, не отвечающие в полной мере потенциалу прогрессивности, конкурентоспособности и экономической целесообразности непрерывного безопалубочного формования, способного обеспечить значительные сдвиги в вопросах повышения эффективности строительной продукции.

Учитывая выше сказанное, разработка теоретических и практических вопросов проектирования бетонных смесей с особыми реологическими характеристиками, обеспечивающими бездефектность и формостабильность свежееотформованных изделий применительно к оборудованию для непрерывного безопалубочного формования, представляется весьма актуальной.

Диссертационные исследования выполнены в соответствии с Планом фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН (раздел 3.1.2. Развитие научных основ создания строительных материалов нового поколения, тема 3.1.2.3. «Развитие научных и практических основ получения строительных изделий и конструкций непрерывным безопалубочным формованием»), а также при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в виде 2-х грантов (грант № 16474 и № 17595).

Степень разработанности темы диссертации. Разработка современных методов проектирования состава бетонных смесей основана на результатах фундаментальных исследований И. Г. Малюги, Абрамса, Н. М. Беляева, БолOMEя, которые получили дальнейшее развитие в работах, проводимых в разное время под руководством Б. Г. Скрамтаева, Ю. М. Баженова, П. И. Боженова, И. А. Рыбьева, В. П. Сизова, П. Ф. Шубенкина и многих других ученых. Большое количество работ в данной области обусловлено широтой диапазона различных видов и модификаций бетона, в том числе обладающих специфическими свойствами в соответствии с требованиями, которые нельзя не учитывать. Так со временем появились методы проектирования состава легких бетонов (Н. А. Попов), высокопрочных бетонов (С. С. Каприелов), в том числе порошковых (В. И. Калашников), фиброармированных (Ю. В. Пухаренко) и др. Очевидно, что для адекватного ответа бетонных смесей на воздействия со стороны механического оборудования линий непрерывного безопалубочного формования тоже требуется особый подход при проектировании их состава, что и определило формулирование рабочей гипотезы, цель и задачи диссертационных исследований.

Рабочая гипотеза. Получение высококачественной продукции при непрерывном безопалубочном формовании, обеспечение формостабильности свежееотформованных изделий, исключение в них трещин и других дефектов от действия технологического оборудования достигается разработкой и использованием эффективной методики проектирования бетонных смесей с учетом пластических свойств и возможностью их регулирования в зависимости от вида и характеристик этих изделий и применяемого оборудования.

Цель исследования – разработка метода проектирования составов бетонных смесей с учетом особенностей и свойств, объективно отражающих их поведение в условиях непрерывного безопалубочного формования и обеспечивающих бездефектность выпускаемой продукции.

Задачи исследования

1. Определение реологических и других характеристик бетонной смеси, ответственных за появление трещин в результате ее деформирования при непрерывном безопалубочном формовании.

2. Разработка метода экспериментальной оценки пластических свойств бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования;

3. Разработка математической модели, устанавливающей степень и характер влияния различных факторов на пластические свойства бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании.

4. Разработка способов регулирования пластических свойств бетонных смесей при условии сохранения других показателей качества на заданном уровне.

5. Разработка методики проектирования состава бетонной смеси с учетом заданной величины ее пластичности.

6. Проверка полученных научных результатов, выводов и рекомендаций в производственных условиях.

Объект исследования – бетонные смеси для непрерывного безопалубочного формования.

Предмет исследования – состав и реологические свойства бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования.

Научная новизна исследования

1. Обоснована роль пластичности бетонной смеси как фактора, определяющего наличие или отсутствие трещин в изделии при непрерывном безопалубочном формовании, предложена численная характеристика пластичности – предельная растяжимость бетонной смеси и разработан метод ее определения (патент РФ на изобретение № 2677237).

2. Определены основные факторы, оказывающие влияние на пластические свойства бетонной смеси, и разработана математическая модель, устанавливающая зависимость предельной растяжимости от объемной доли цементного теста, нормальной густоты цемента и истинного водоцементного отношения, позволяющая без проведения экспериментов расчетным путем производить ее оценку.

3. Разработана методика проектирования состава бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования с учетом заданной пластичности и возможности ее эффективного регулирования способами, применение которых не приводит к снижению удобоукладываемости смеси и прочности бетона.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании важнейшей роли пластичности бетонной смеси для получения качественных изделий и конструкций, обеспечения их бездефектности и формостабильности в процессе непрерывного безопалубочного формования и использования величины предельной растяжимости в качестве ее численной характеристики.

Практическая значимость работы

1. Проведены экспериментальные исследования и разработаны «Рекомендации по определению предельной растяжимости бетонной смеси», включающие описание методики лабораторных испытаний и прибора для ее осуществления.

2. Предложены и исследованы способы регулирования пластичности бетонной смеси путем введения добавки суперпластификатора, позволяющей повысить величину предельной растяжимости на 20...30 % без снижения удобоукладываемости смеси и прочности бетона, а также в результате дисперсного армирования, способного увеличить предельную растяжимость смеси до 40 %.

3. Разработана методика проектирования состава бетонной смеси с обеспечением заданной удобоукладываемости и пластичности, включающая расчет состава с использованием предложенной математической модели, лабораторную проверку полученного результата и его корректировку, в том числе с использованием способов регулирования величины предельной растяжимости.

4. Проведена опытно-промышленная проверка данных лабораторных исследований в условиях действующего производства с положительным результатом и технико-экономической оценкой предлагаемых технических решений.

5. Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения используются кафедрой «Технологии строительных материалов и метрологии» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 08.04.01 – Строительство.

Методология и методы исследования. Исследование носит теоретико-экспериментальный характер и базируется на принципах формальной логики, анализа, синтеза и эксперименте. Экспериментальная часть исследования производится с учетом современных подходов к планированию эксперимента при изучении бетонных смесей. Помимо этого, предлагаются и новые подходы к изучению пластических свойств бетонных смесей. Не считая стандартных методов испытаний, описанных в нормативных документах, в работе используются методы испытанный, созданные отечественными учеными, а также разрабатывается оригинальный метод определения пластичности бетонной смеси.

Положения, выносимые на защиту

1. Обоснование роли пластичности бетонной смеси в получении бездефектной продукции при непрерывном безопалубочном формировании бетон-

ных и железобетонных изделий и конструкций и использования предельной растяжимости в качестве ее численной характеристики.

2. Результаты разработки и опытной проверки метода экспериментального определения пластичности бетонной смеси по величине ее предельной растяжимости и прибора для его осуществления;

3. Математическая модель пластичности, позволяющая осуществлять расчет и прогнозировать величину предельной растяжимости бетонной смеси в зависимости от ее состава и свойств исходных компонентов.

4. Методика проектирования состава бетонной смеси заданной удобоукладываемости с пластичностью, обеспечивающей формостабильность и бездефектность изделий при непрерывном безопалубочном формовании.

5. Результаты опытно-промышленной проверки сформулированных в диссертации научных положений в производственных условиях при изготовлении предварительно напряженных железобетонных плит пустотного настила методом непрерывного безопалубочного формования.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, а именно пункту 8 «Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий» и пункту 15 «Развитие технологий получения сборных строительных изделий и реконструкции действующих технологических линий и производств».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и получили одобрение на 69-й, 70-й, 71-й и 73-й научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018, 2020 гг.), 74-й и 75-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – Строительство – Транспорт» (СПбГАСУ, 2018, 2019 гг.), I-ой Международной конференции «FIBROMIX – Композиционные материалы и конструкции в современном строительстве» (Санкт-Петербург, октябрь 2018 г.), Международной научной конференции «Современные материалы и передовые производственные технологии» (Санкт-Петербург, июль 2019 г.), Международных академических чтениях «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 15 ноября 2019 г.), международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе» (Саратов, 10 декабря 2020 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 11 печатных изданиях общим объемом 5,35 п.л., лично автором – 4,35 п.л., из них 3 статьи, в изданиях входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журна-

лов, утвержденный ВАК РФ. Получен патент РФ на изобретение № 2677234 от 01.12.2017.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно сформулирована цель работы, определены задачи для ее достижения и сформулирована научная гипотеза, выполнен аналитический обзор научно-технической литературы по теме диссертации, комплекс теоретических и экспериментальных исследований с последующей проверкой сформулированных в диссертации положений в производственных условиях, подготовлены публикации с изложением основных результатов исследования.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа представлена на 195 страницах, включая 46 страниц приложений, содержит 33 рисунка, 28 таблиц, список литературы из 115 наименований.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, представлены цель и задачи, научная и практическая значимость.

В первой главе приведен анализ литературных источников по теме диссертации, установлена актуальность и необходимость развития методов проектирования состава бетонных смесей с учетом особенностей непрерывного безопалубочного формования.

Во второй главе обоснована роль пластичности бетонной смеси в получении качественной продукции непрерывным безопалубочным способом, представлены результаты разработки метода ее экспериментальной оценки и прибора для его осуществления.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на пластичность бетонной смеси с обобщением полученных зависимостей в виде математической модели.

В четвертой главе представлены данные и результаты разработки методики проектирования состава бетона с обеспечением требуемой прочности, удобоукладываемости и пластичности, включающая расчетную часть, предусматривающую использование предложенной математической модели, и экспериментальную, с рекомендациями по корректировке состава с использованием разработанных способов улучшения пластичности.

В пятой главе представлены результаты апробации полученных в исследовании результатов в производственных условиях с технико-экономической оценкой.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Обоснована роль пластичности бетонной смеси как фактора, определяющего наличие или отсутствие трещин в изделии при непрерывном безопалубочном формовании, предложена численная характеристика пластичности – предельная растяжимость бетонной смеси и разработан метод ее определения (патент РФ на изобретение № 2677237).

Непрерывное безопалубочное формование железобетонных изделий – сложный технологический процесс, в котором бетонная смесь, с точки зрения реологии и технологической механики, подвергается различным воздействиям, на которые отвечает возникновением внутренних напряжений, деформаций, тиксотропным разжижением и другими явлениями. В связи с этим отличительной особенностью данной технологии является необходимость сохранения структуры смеси и формы изделий, приобретенных в процессе формования и вплоть до начала схватывания, исключительно за счет внутреннего трения. На первый взгляд кажется, что бездефектность отформованных изделий может быть достигнута при условии обеспечения требуемых показателей удобоукладываемости (подвижности или жесткости), которые являются привычными характеристиками и успешно определяются в процессе проектирования состава бетонной смеси. Однако практический опыт показывает, что соблюдение этого условия лишь частично решает обозначенную проблему и позволяет сохранять форму изделий только при отсутствии или пренебрежимо малой величине внешних воздействий, добиться чего удастся крайне редко. Внешние нагрузки, которые чаще всего возникают в процессе работы формующей машины, находящейся в непосредственном контакте с бетонной смесью, как правило значительно превышают способность этой смеси сопротивляться деформированию. Результат этих деформаций, как видно на рисунке 1, может быть различным.

В приведенном примере наличие или отсутствие трещин в свежотформованном железобетонном отбойнике объясняется исключительно различием в составах бетонных смесей, характеристики удобоукладываемости которых при этом были одинаковы.

Анализ литературных источников и принятой терминологии позволил определить, что возможность сохранения сплошности дисперсной системы при деформировании зависит от свойства, которое называется пластич-

ностью, степень изученности которой применительно к бетонным смесям остается на крайне низком уровне: не существует реологических и технологических моделей пластичности, способов и критериев оценки, рекомендаций по ее регулированию.

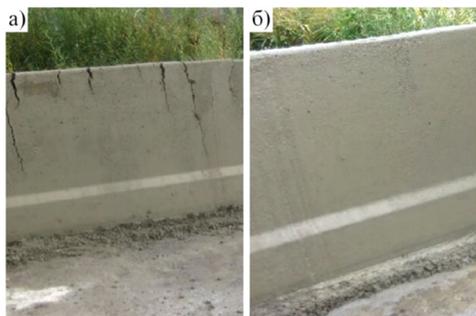


Рис. 1 – результат формования дорожного отбойника с применением безопалубочной технологии:
а) участок с выраженными трещинами;
б) участок без видимых дефектов

В настоящее время для характеристики способности различных материалов деформироваться без нарушения сплошности используются различные показатели и методы испытаний, например: «растяжимость» для текстиля и тканей, «дуктильность» для битумов, «пластичность» для металлов, «предельная растяжимость» для бетонов. Учитывая определенную аналогию, для численной оценки пластических свойств бетонных смесей, предлагается ввести понятие «**предельной растяжимости бетонной смеси** (ϵ^{np} , мм/м), которое является критерием пластичности и определяет относительное удлинение бетонной смеси, при котором нарушается ее сплошность.

Для измерения предельной растяжимости предлагается методика, основанная на использовании специально разработанного устройства (рис. 2), позволяющего изгибать свежееотформованный бетонный образец-призму и при этом обеспечивать равномерное растяжение одной из его граней на участке значительной протяженности вплоть до образования трещин в соответствии со схемой, показанной на рисунке 3.

В качестве измеряемой величины предлагается использовать критический прогиб образца (h^{kp} , мм), при котором на его растянутой грани образуются трещины, заметные невооруженным глазом. Для пересчета h^{kp} в ϵ^{np} разработана таблица соответствия (таблица 1).

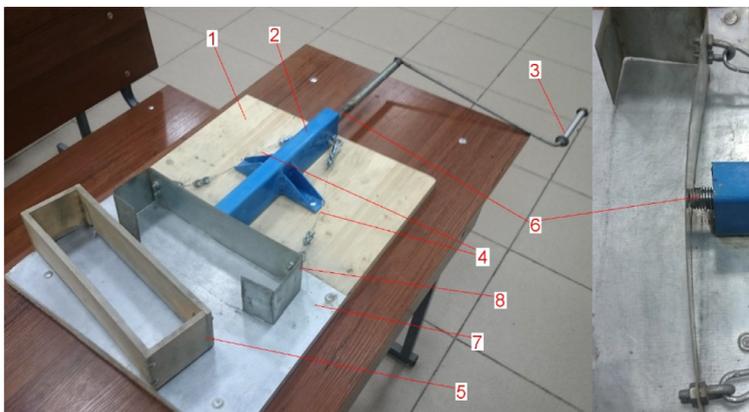


Рис. 2 – прибор для определения предельной растяжимости бетонной смеси:
 1 – станина прибора; 2 – силовой элемент; 3 – вороток; 4 – стропы;
 5 – съемная форма; 6 – винтовой шток; 7 – поверхность скольжения;
 8 – гибкая оснастка



Рис. 3 – схема определения предельной растяжимости бетонной смеси (вид сверху)

Таблица 1. Соответствие предельной растяжимости бетонной смеси и критического прогиба

$h^{кр}$, мм	ϵ^{up} , мм/м	$h^{кр}$, мм	ϵ^{up} , мм/м	$h^{кр}$, мм	ϵ^{up} , мм/м
1	9	6	52	11	96
2	17	7	61	12	105
3	26	8	70	13	113
4	35	9	78	14	122
5	43	10	87	15	131

Окончание табл. 1

$h^{сп}$, мм	$\varepsilon^{сп}$, мм/м	$h^{сп}$, мм	$\varepsilon^{сп}$, мм/м	$h^{сп}$, мм	$\varepsilon^{сп}$, мм/м
16	140	22	193	28	247
17	149	23	202	29	256
18	157	24	211	30	265
19	166	25	220	31	274
20	175	26	229	32	283
21	184	27	238	33	293

На предлагаемые метод и прибор получен патент РФ на изобретение № 2677234 и разработаны «Рекомендации по определению предельной растяжимости бетонной смеси».

2. Определены основные факторы, оказывающие влияние на пластические свойства бетонной смеси, и разработана математическая модель, устанавливающая зависимость предельной растяжимости от объемной доли цементного теста, нормальной густоты цемента и истинного водоцементного отношения, позволяющая без проведения экспериментов расчетным путем производить ее оценку.

Наличие и уровень упруго-вязко-пластических свойств бетонной смеси главным образом определяются количеством в ее составе цементного теста и его пластичностью.

Экспериментальные данные, полученные с использованием различных цементов, показали (рис. 4), что предельная растяжимость цементного теста изменяется по линейному закону в зависимости от разницы между водоцементным отношением (В/Ц) и его нормальной густотой (НГ). При этом в ситуации, когда В/Ц = НГ, ее значение составляет 360 мм/м ($\pm 3\%$) независимо от вида и свойств цемента.

По мере введения в цементное тесто заполнителя пластичность смеси снижается, о чем свидетельствуют экспериментальные данные, полученные с использованием разных песков (рис. 5).

При постоянном значении В/Ц (линия *a*), наблюдаются два участка с различным влиянием заполнителя на предельную растяжимость смеси. На первом участке при концентрации заполнителя до 41 % по объему предельная растяжимость бетонной смеси понижается за счет уменьшения пластичности цементного теста в результате сорбции воды зернами заполни-

теля и, соответственно, уменьшения истинного водоцементного отношения ($V/C_{ист}$). При дальнейшем насыщении смеси заполнителем (более 41% по объему) имеет место своеобразный перколяционный эффект, при котором помимо указанных выше факторов особое значение приобретает снижение концентрации цементного теста, что приводит к структурированию бетонной смеси и большее заметному снижению предельной растяжимости. При поддержании постоянным значения $V/C_{ист}$ (линия б) заполнитель на первом участке практически не оказывает влияния на пластичность бетонной смеси, а на втором участке его влияние заметно увеличивается и приобретает нелинейный характер.

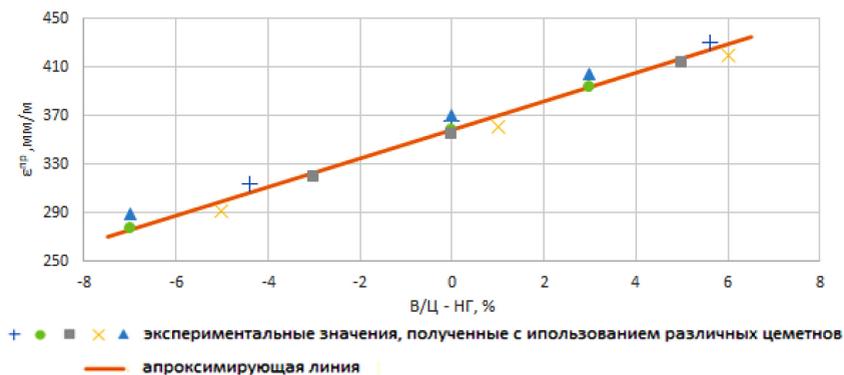


Рис. 4 – зависимость пластичности цементного теста от ($V/C - НГ$)

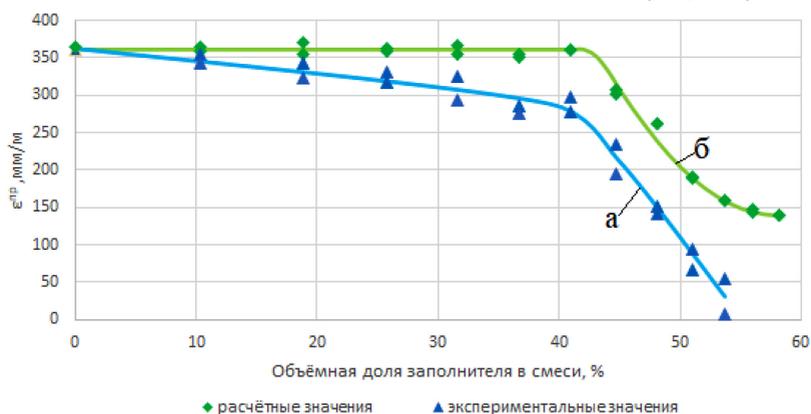


Рис. 5 – влияние заполнителя на пластичность бетонной смеси:
 а) при постоянном V/C ; б) при постоянном $V/C_{ист}$

Экспериментально установлено существенное (до 20...55%) улучшение пластичности бетонной смеси в результате введения пластифицирующих добавок в количестве свыше 0,2% от массы цемента (рис. 6).

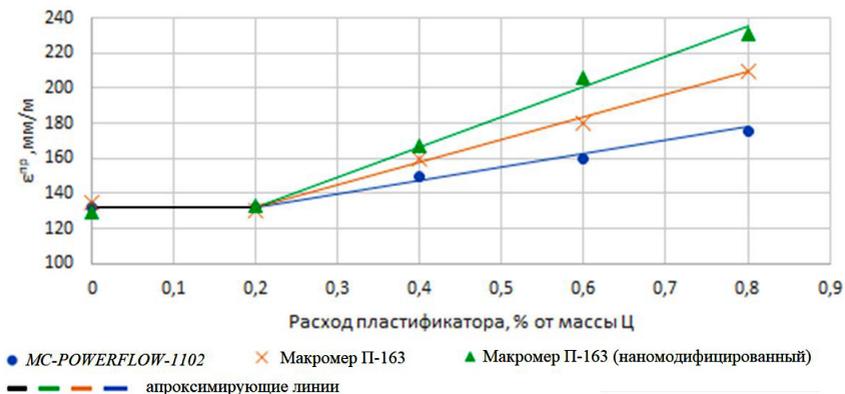


Рис. 6 – влияние пластифицирующих добавок на предельную растяжимость бетонной смеси

Приведенные данные указывают на разную степень влияния используемых добавок на величину предельной растяжимости бетонной смеси, что объясняется различиями в механизмах их взаимодействия с цементом, позволяет использовать полученный результат для решения конкретных практических задач, но, к сожалению, делает невозможным точное математическое обобщение данного эффекта.

Полученные результаты позволили разработать математическую модель, выражающую зависимость предельной растяжимости от ряда факторов, однозначное и устойчивое влияние которых на бетонную смесь было установлено при проведении экспериментальных исследований (уравнение 1).

$$\varepsilon^{np} = 11,7 \cdot (V/C_{ист} - НГ) + 0,032 \cdot (\varphi^{шт} - 41,5)^3 + 137; \quad (1)$$

где: ε^{np} – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; $V/C_{ист}$ – истинное водоцементное отношение, %; НГ – нормальная плотность цемента, %; $\varphi^{шт}$ – объемная доля цементного теста в смеси, %.

Полученная математическая модель пластичности бетонной смеси демонстрирует высокий уровень статистических показателей при сравнении расчетных и экспериментальных значений предельной растяжимости бетонных смесей известного состава. Помимо высокого коэффициента корреляции, равного 0,99, средняя ошибка аппроксимации

составляет 6 %, что не превышает максимально допустимого значения для подобных математических моделей. Среднее абсолютное отклонение, равное 6,82 мм/м, практически соответствует погрешности измерения предельной растяжимости бетонной смеси. Таким образом, приведенные статистические показатели разработанной модели свидетельствуют о ее адекватности и возможности с высокой степенью достоверности оценивать предельную растяжимость бетонной смеси известного состава без проведения экспериментов.

3. Разработана методика проектирования состава бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования с учетом заданной пластичности и возможности ее эффективного регулирования способами, применение которых не приводит к снижению удобоукладываемости смеси и прочности бетона.

Разработанная методика проектирования состава бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования включает пять этапов:

1) *Формулирование технического задания, которое, помимо обычных требований по прочности бетона и удобоукладываемости бетонной смеси, должно содержать минимально допустимое значение ее предельной растяжимости, исходя из условий формования, следовательно, ожидаемой или измеренной величины возможных деформаций;*

2) *Выбор сырьевых материалов и получение необходимых данных, характеризующих их свойства, в том числе водопотребность заполнителей;*

3) *Расчет состава бетонной смеси с применением разработанной программы для ЭВМ для определения расхода основных компонентов в кг на 1 м^3 .*

Расчет состава основан на решении системы уравнений для мелкозернистого (2) или тяжелого (3) бетонов, которые включают уже известные и широко применяемые на практике математические выражения, такие как основной закон прочности бетона, уравнение абсолютных объемов, а также разработанную математическую модель пластичности, что в совокупности позволяет обеспечить взаимосвязь расхода и свойств основных компонентов не только с прочностью бетона и удобоукладываемостью бетонной смеси, но и с ее предельной растяжимостью.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_b = R_{ц} \cdot A \cdot \left(\frac{\Pi}{B} \pm 0,3 \right) \\ \frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho_{п}} = 1 \\ \varepsilon^{np} = 11,7 \cdot \left(\left(\frac{B}{\Pi} - \frac{\Pi \cdot B_{п}}{\Pi} \right) \cdot 100 - \text{НГ} \right) + \\ + 0,032 \cdot \left(\left(1 - \frac{\Pi}{\rho_{п}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_b = R_{ц} \cdot A \cdot \left(\frac{\Pi}{B} \pm 0,5 \right) \\ \frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho_{п}} + \frac{\Pi}{\rho_{щ}} = 1 \\ \varepsilon^{np} = 11,7 \cdot \left(\left(\frac{B}{\Pi} - \frac{\Pi \cdot B_{п} + \Pi \cdot B_{щ}}{\Pi} \right) \cdot 100 - \text{НГ} \right) + \\ + 0,032 \cdot \left(\left(1 - \frac{\Pi}{\rho_{п}} - \frac{\Pi}{\rho_{щ}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 \\ r = \frac{\Pi}{\Pi} \end{array} \right. \quad (3)$$

где: R_b – заданная прочность бетона, МПа; ε^{np} – заданная предельная растяжимость бетонной смеси; $R_{ц}$ – активность цемента, МПа; A – коэффициент, учитывающий качество заполнителей; Π , B , Π , Π – расход цемента, воды, песка, щебня на 1 м³ бетона, кг; ρ_B – плотность воды, кг/м³, $\rho_{ц}$, $\rho_{п}$, $\rho_{щ}$ – плотность зерен цемента, песка, щебня, кг/м³; r – отношение расхода песка к расходу щебня, назначается исходя из зернового состава заполнителей (для Щ фр. 5 – 20 рекомендуется $r = 0,55 \dots 0,8$; для Щ фр. 5 – 10 рекомендуется $r = 0,65 \dots 1,5$).

Аналитическое решение представленных систем путем алгебраических преобразований и выражений одних неизвестных через другие отличается значительной трудоемкостью и высокой вероятностью ошибок. Разработать шаблон решения также невозможно, поскольку оно включает уравнение 4-й степени, метод решения которого сильно зависит от коэффициентов

перед переменной. Вместе с тем, современный уровень развития техники и технологий позволяет решать такие системы с помощью ЭВМ, которые доступны работникам строительных и заводских лабораторий. Учитывая это, в диссертации разработана программа на базе программного комплекса *MS Excel*, которая позволяет решать представленные системы уравнений методом перебора и содержит необходимый интерфейс (поля для ввода данных из технического задания, характеристик сырьевых материалов и для отображения результатов расчета с указанием расходов основных компонентов смеси бетонной смеси в кг на 1 м^3);

4) *Экспериментальную проверку полученного состава и его корректировку (при необходимости).*

Для корректировки реологических свойств бетонной смеси разработаны рекомендации (таблица 2), учитывающие возможные варианты результатов испытаний, получаемых при пробных замесах, и позволяющие синхронно обеспечить получение заданных характеристик удобоукладываемости и пластичности.

Таблица 2. Рекомендации по корректировке состава бетонной смеси

Подвижность (жесткость) $\varepsilon^{\text{пр}}$	ниже (выше) требуемой	соответствует требуемой	выше (ниже) требуемой
выше требуемой	Увеличить $\phi^{\text{пр}}$, $V/C = \text{const}$	Корректировка не требуется	Снизить $\phi^{\text{пр}}$, $V/C = \text{const}$
соответствует требуемой	То же	То же	То же
ниже требуемой	То же	Применить один из способов улучшения пластичности	То же

Очевидно, что наибольший интерес вызывает вариант, в котором удобоукладываемость смеси соответствует требуемой, а предельная растяжимость меньше заданного значения. В этом случае повышение пластичности может быть достигнуто путем увеличения объемной доли цементного теста, однако за этим обязательно последует и повышение подвижности (снижение жесткости) смеси, что недопустимо при непрерывном безопалубочном формовании. Учитывая это, были разработаны два способа эффективного улучшения пластичности, применение которых не приводит к изменению подвижности или жесткости смеси и прочности бетона:

- повышение ϵ^{np} при сохранении прочности бетона и подвижности (жесткости) бетонной смеси путем введения пластификатора и соразмерного снижения расхода цемента при постоянном В/Ц.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 7, показывают, что такой способ позволяет повысить ϵ^{np} до 20 % в зависимости от вида применяемой добавки.

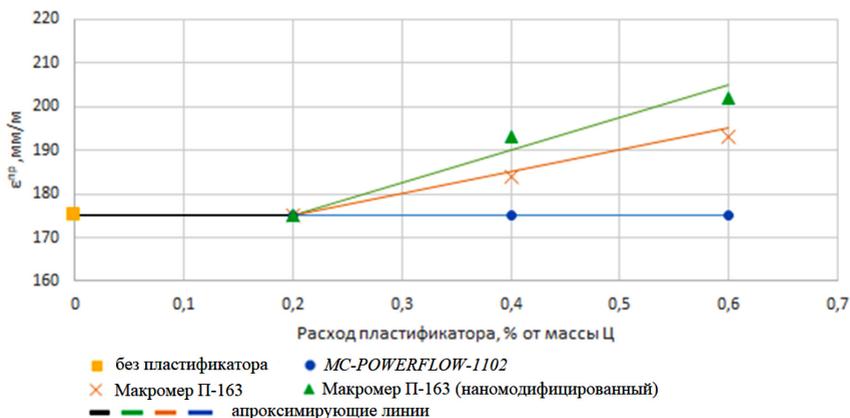


Рис. 7 – влияние вида и количества пластификатора на изменение предельной растяжимости равноподвижных бетонных смесей

Полученный эффект можно объяснить следующим образом. При введении пластификатора происходит снижение вязкости бетонной смеси, которое проявляется, например, в возрастании ее подвижности, что недопустимо при непрерывном безопалубочном формовании. Для поддержания подвижности на требуемом уровне можно уменьшить объемную долю цементного теста в смеси, не меняя при этом В/Ц, поскольку это необходимо для обеспечения заданной прочности. Как было показано выше, использование пластификатора увеличивает ϵ^{np} , а снижение объемной доли цементного теста, напротив, снижает ее. Однако, влияние пластификатора, как правило, оказывается более значимым, чем влияния доли цементного теста, что и приводит в совокупности к улучшению пластичности. Следует отметить, что снижение вязкости можно компенсировать и уменьшением В/Ц, однако опыт показывает, что это, как правило, отрицательно сказывается на пластичности бетонной смеси;

- повышение ϵ^{np} путем введения фибры совместно с дополнительным разжижающим компонентом.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 8, показывают, что при введении в бетонную смесь армирующих волокон и необходимого количества дополнительной воды для сохранения подвижности на заданном уровне возможно повысить $\varepsilon^{пр}$ до 40 %.

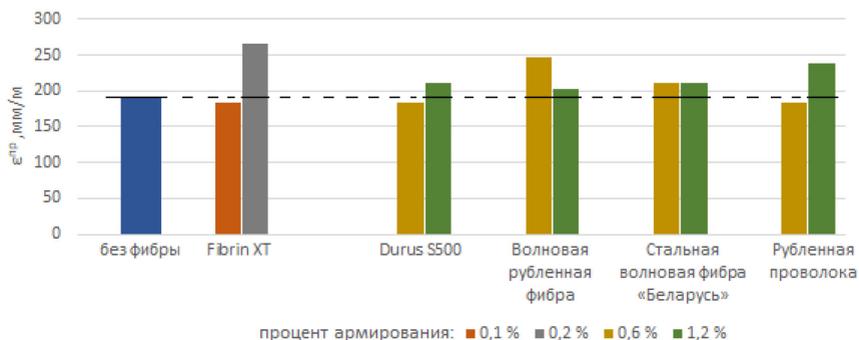


Рис. 8 – Предельная растяжимость равноподвижных бетонных смесей в зависимости от типа и расхода армирующих волокон

Объяснить наблюдаемый эффект можно следующим образом. Сами по себе армирующие волокна не оказывают значительного влияния на предельную растяжимость смеси, но повышают ее связность при малых скоростях сдвига, что проявляется в снижении подвижности (повышении жесткости) и отрицательно сказывается на процессе формирования изделий. Чтобы привести показатели удобоукладываемости к первоначальному уровню, можно увеличить расход воды, что, в свою очередь, приводит к повышению $V/C_{ист}$ и, как показано выше, положительно влияет на пластичность, увеличивая $\varepsilon^{пр}$ бетонной смеси.

Следует отметить, что введение дополнительной воды может негативно сказаться на прочности бетона, поэтому разжижающий компонент следует выбирать с учетом типа и расхода фибры. Например, при использовании синтетических микроволокон *Fibrin XT*, в качестве разжижающего компонента следует применять водный раствор пластификатора с заранее определенной оптимальной концентрацией. В таблице 3 приведен пример использования этих волокон для улучшения пластичности с повышением предельной растяжимости на 25 % и сохранением заданной прочности бетона и подвижности смеси.

5) Производственную проверку полученного состава, при необходимости его корректировку по п. 4 методики и уточнение расходов основных компонентов на 1 м^3 бетонной смеси.

Таблица 3. Пример повышения пластичности бетонной смеси с помощью армирующих волокон *Fibrin XT*

Показатели		бетон без фибры	бетон с фиброй
расход компонентов	цемент, кг/м ³	495	480
	песок, кг/м ³	1485	1430
	вода, кг/м ³	234	245
	пластификатор (Макромер П-163), % от массы цемента	0,3	0,45
	фибра, % от объема бетона	0	0,2
Плотность бетонной смеси, кг/м ³		2215	2157
Плотность бетона, кг/м ³		2202	2145
Погружение конуса СтройЦНИЛа, мм		55	54
ε ^{пр} , мм/м		180	225
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа		6	6,1
Предел прочности при сжатии, МПа		41,8	41,7

4. Осуществлена проверка полученных в диссертации научных результатов, сформулированных выводов и рекомендаций в производственных условиях с технико-экономической оценкой

Промышленная апробация результатов исследования осуществлялась применительно к технологической линии непрерывного безопалубочного формования предварительно напряженных плит пустотного настила на производственной площадке ООО «Полар Инвест» (г. Всеволожск, Ленинградской обл.), где в последние годы участились случаи образования продольных трещин в полках плит и их обрушения (рис. 9) сразу после укладки и уплотнения бетонной смеси.

Подобные дефекты, имеющие место по всей длине 80-ти метрового стенда, вызывают множество издержек, связанных с материальными затратами на производство, сложностью обеспечения стабильности технологического процесса и эксплуатационной надежности получаемых изделий. Анализ процесса разрушения свежесформованных изделий и обследование состояния технологического оборудования позволили установить первопричину появления брака, которая заключается в механическом износе и потере жесткости палубы стенда, ее вертикальных колебаниях при укладке бетонной смеси, вызывающих поперечное растяжение верхних полок плиты, об-

разование в них трещин и обрушение сразу после уплотнения бетонной смеси при незначительном удалении формующей машины.



Рис. 9 – дефекты и обрушение полок свежеотформованной предварительно напряженной плиты пустотного настила

Анализ производственного состава бетонной смеси показал, что ее $\epsilon^{пр}$ составляет 70 мм/м по результатам испытания и 74 мм/м по расчету в соответствии с предложенной математической моделью пластичности. В то же время, измеренная величина относительных деформаций растяжения бетонной смеси при формировании на данной технологической линии достигает 80...100 мм/м.

В соответствии с предложенным алгоритмом проектирования состава был рассчитан и откорректирован состав бетонной смеси, который затем использовался при выпуске опытно-промышленной партии предварительно напряженных плит пустотного настила в объеме 52 м³ (таблица 4).

В ходе заводского эксперимента с использованием рекомендованного состава бетонной смеси осуществлялась визуальная оценка дефектности отформованных изделий, которая показала ее существенное уменьшение за счет увеличения предельной растяжимости смеси до 107 мм/м. На отдельных участках стендов, вероятно наиболее изношенных, растрескивание плиты и обрушение ее полок сохранилось, однако число таких дефектных точек составило не более 10 % от общей массы. Другими словами, за счет улучшения пластичности бетонной смеси удалось добиться снижения числа дефектов при непрерывном безопалубочном формировании плит пустотного настила на 90 %. Очевидно, количество дефектов возможно снизить до нуля путем дальнейшего улучшения пластичности бетонной смеси за счет увеличения ее предельной растяжимости.

Таблица 4. Характеристики рекомендованного и заводского составов бетонной смеси для производства плит пустотного настила

Показатель	Значение		
	заводской состав	рекомендованный состав	требуемое
Расход цемента, кг/м ³	440	380	
Расход песка, кг/м ³	960	940	
Расход щебня, кг/м ³	850	945	
Расход воды, кг/м ³	193	167	
Расход пластификатора, % от расхода цемента	0	0,3	
$R_{сж}$ через 28 часов ускоренного твердения, МПа	46,2	45,3	> 45
$R_{сж}$ через 28 суток, МПа	59,1	63,5	> 56
Жесткость бетонной смеси, с	45	40	30...50
Предельная растяжимость, мм/м	70	107	> 100

Сопоставительная экономическая оценка предложенной бетонной смеси в сравнении с применяемой на заводе показала снижение стоимости входящих в ее состав материалов на 2 % (таблица 5).

Таблица 5. Сравнение стоимости материалов контрольного (заводского) и предлагаемого составов

Показатели	Цена за единицу на 06.2019, руб	Стоимость, руб/м ³	
		Контрольный состав	Предлагаемый состав
Цемент, т	4850	$0,44 \cdot 4850 = 2134$	$0,37 \cdot 4850 = 1794,5$
Песок, т	405	$0,96 \cdot 405 = 388,8$	$0,94 \cdot 405 = 380,7$
Щебень, т	1190	$0,85 \cdot 1190 = 1011,5$	$0,945 \cdot 1190 = 1124,55$
Пластификатор, кг	160	0	$1,11 \cdot 160 = 3477,35$
Стоимость материалов, руб/м ³		3534,3	3477,35
Экономический эффект, руб (%)			57 (2)

Вместе с тем очевидно, что основной экономический эффект заключается в снижении прямых издержек, связанных с материальными затратами на устранение брака при выпуске продукции, усложнением процедуры раскря

и организации процесса распиловки массива на изделия заданной длины, что существенно повышает трудозатраты и понижает производительность технологической линии. К сожалению, точно оценить экономический эффект, связанный с исправлением данной ситуации, без наблюдения за производством в течении длительного времени не представляется возможным, однако можно с уверенностью констатировать факт его наличия.

Все результаты производственных испытаний закреплены соответствующим актом и изложены в совместном отчете.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установлено, что при непрерывном безопалубочном формовании существует опасность нарушения сплошности бетонных и железобетонных изделий в результате их деформирования под действием внешних нагрузок, которые чаще всего вызваны взаимодействием формирующей машины с бетонной смесью в процессе ее укладки. При этом наличие или отсутствие дефектов, главным образом, определяется пластичностью смеси, для характеристики которой введено понятие «предельная растяжимость бетонной смеси ($\epsilon^{пр}$, мм/м)», то есть относительное удлинение бетонной смеси, при котором нарушается ее сплошность.

2. Предложена методика определения предельной растяжимости бетонной смеси, основанная на использовании специально разработанного устройства, позволяющего изгибать свежесформованный бетонный образец-призму и определять критический прогиб в момент образования трещин на его растянутой грани с дальнейшим переводом полученного значения в $\epsilon^{пр}$ с помощью составленной для этого таблицы соответствия.

3. Показано, что пластические свойства бетонной смеси обеспечиваются пластичностью цементного теста, а ее предельная растяжимость, главным образом, зависит от разницы между истинным водоцементным отношением и нормальной плотностью цемента, а также от объемной доли цементного теста в смеси. На основе обобщения полученных данных разработана математическая модель пластичности бетонной смеси, которая позволяет расчетным путем оценивать ее предельную растяжимость, исходя из состава и свойств компонентов, без проведения экспериментов.

4. Предложена методика проектирования состава бетонной смеси, обеспечивающая получение не только заданной прочности бетона и удобоукладываемости смеси, но и ее пластичности, исключающей появление дефектов в процессе формования изделий по безопалубочной технологии. Разработан алгоритм проектирования бетонной смеси, включающий расчет состава с ис-

пользованием предложенной математической модели, лабораторную проверку полученного результата и его корректировку, в том числе с использованием способов регулирования величины предельной растяжимости.

5. Достоверность полученных результатов подтверждена производственными экспериментами при выпуске опытно-промышленной партии предварительно напряженных плит пустотного настила по технологии непрерывного вибропрессования. В результате существенного улучшения пластических свойств бетонной смеси, рассчитанной и скорректированной по предложенной методике проектирования состава, значительно (на 90 %) снизилось число дефектов изделий, ранее имевших место в процессе формования. При этом, стоимость сырьевых материалов в составе смеси снизилась на 2 %, а главное, существенно сократились организационно-технологические издержки, связанные с ремонтом дефектных изделий, повышающим трудозатраты и понижающим производительность технологической линии.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Совершенствование существующих и разработка новых более эффективных способов улучшения пластических свойств бетонной смеси с учетом сохранения удобоукладываемости и заданной прочности бетона.

2. Исследование возможности и эффективности применения полученных результатов в технологии безопалубочного формования изделий и конструкций из легкобетонных и других смесей с использованием различных видов заполнителей.

3. Развитие методик проектирования состава бетона для непрерывного безопалубочного формования с учетом накопления новых данных и уточнения математической модели пластичности.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пухаренко, Ю. В. Задачи технологической механики в развитии способов безопалубочного формования / Ю. В. Пухаренко, **Г. М. Хренов** // Вестник гражданских инженеров – 2017 – № 6 (65). – С. 152 – 157.

2. **Хренов, Г. М.** Метод определения пластичности бетонных смесей / Г. М. Хренов // Вестник гражданских инженеров – 2018 – № 2 (67). – С. 147–154.

3. **Хренов, Г. М.** Моделирование пластических свойств бетонной смеси // Известия КГАСУ – 2021 – № 1 (55). – С. 49–57.

Патенты:

4. Пат. № 2677234 РФ, МПК G01N 3/28, Способ определения пластичности бетонной смеси и устройство для его осуществления / **Хренов Г. М.**, Пухаренко Ю. В.; опубл. 16.01.2019, Бюл. № 2.

Публикации в других изданиях:

5. **Хренов, Г. М.** Опыт использования технологии трехмерной печати в производстве строительных изделий и конструкций / Г. М. Хренов // Актуальные проблемы строительства: материалы 69-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 3-х ч. – 2016. – Ч. 2. – с. 340–344.

6. **Хренов, Г. М.** Методика определения пластических свойств бетонных смесей для безопалубочного формования / Г. М. Хренов // Актуальные проблемы строительства: материалы 70-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 3-х ч. – 2017. – Ч.1. – с. 139–145.

7. **Хренов, Г. М.** Влияние тонкости помола цемента на пластичность бетонной смеси / Г. М. Хренов // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 3-х ч. – 2018. – Ч.2. – с. 87–92.

8. **Хренов, Г. М.** Влияние объемной доли цементного теста на пластичность бетонной смеси / Г. М. Хренов // Архитектура-Строительство-Транспорт: материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, в 2-х ч. – 2018. – Ч.1. – с. 138 – 141.

9. **Хренов, Г. М.** Дисперсное армирование как возможный инструмент регулирования пластичности бетонной смеси / Г. М. Хренов, А. В. Рерих // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений – 2019. – с. 45–53.

10. **Хренов, Г. М.** Влияние цементного теста на пластические свойства бетонных смесей / Г. М. Хренов // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): Тезисы докладов международной научной конференции. – 2019 – С. 44.

11. **Хренов, Г. М.** Разработка состава фибробетонной смеси повышенной пластичности / Г. М. Хренов, А. В. Рерих // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе: Сборник научных трудов по материалам VIII Международной научно-практической конференции. – 2020 – с. 108 – 118.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 15.06.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 55.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

