

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Хренов Георгий Михайлович**

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

**Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН  
Ю. В. Пухаренко

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 5  |
| 1. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ<br>НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ.....                                      | 13 |
| 1.1 Технологии непрерывного безопалубочного формования.....  | 13 |
| 1.2 Анализ реологических и технологических свойств бетонных смесей<br>применительно к технологии непрерывного безопалубочного формования | 20 |
| 1.2.1 Реологические свойства и модели бетонных смесей .....  | 20 |
| 1.2.2 Технологические свойства бетонных смесей.....  | 27 |
| 1.3 Вопросы проектирования состава бетонной смеси.....   | 31 |
| Выводы по первой главе.....  | 35 |
| 2. РОЛЬ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ<br>НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ И МЕТОД ЕЕ<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ .....   | 36 |
| 2.1 Причины нарушения сплошности при непрерывном безопалубочном<br>формовании.....   | 36 |
| 2.2 Моделирование непрерывного безопалубочного формования в<br>лабораторных условиях .....   | 43 |
| 2.3 Метод определения пластичности бетонной смеси и прибор для его<br>осуществления .....  | 51 |
| 2.3.1 Обоснование общей схемы определения пластических свойств смеси   | 51 |
| 2.3.2 Прибор для определения пластичности бетонной смеси.....  | 54 |
| 2.3.3 Разработка методики оценки пластических свойств бетонной смеси....   | 56 |
| Выводы по второй главе.....  | 63 |
| 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ<br>.....  | 64 |
| 3.1 Исходные материалы и методы исследования.....  | 64 |
| 3.1.1 Портландцементы .....  | 64 |
| 3.1.2 Мелкие заполнители .....   | 64 |
| 3.1.3 Пластифицирующие добавки.....  | 65 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1.4 Методы испытаний .....   | 66        |
| 3.2 Влияние различных факторов на пластичность цементного теста.....   | 67        |
| 3.3 Влияние заполнителя на пластичность бетонной смеси.....  | 70        |
| 3.4 Влияние объемной доли цементного теста на пластичность бетонной смеси .....  | 75        |
| 3.5 Влияние пластифицирующей добавки на пластичность бетонной смеси  | 77        |
| 3.6 Математическая модель пластичности бетонной смеси.....   | 79        |
| 3.6.1 Разработка математической модели.....  | 79        |
| 3.6.2 Статистический анализ и сравнение математических моделей .....   | 84        |
| 3.6.3 Определение предельной растяжимости бетонной смеси с использованием математической модели пластичности .....     | 89        |
| Выводы по третьей главе.....   | 92        |
| <b>4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ .....</b> | <b>94</b> |
| 4.1 Расчет состава бетона с обеспечением заданной пластичности бетонной смеси .....                                    | 94        |
| 4.1.1 Расчет состава тяжелого бетона .....   | 94        |
| 4.1.2 Расчет состава мелкозернистого бетона .....  | 99        |
| 4.2 Разработка рекомендаций по корректировке состава бетона.....   | 101       |
| 4.2.1 Разработка способов регулирования пластичности бетонной смеси ...  | 101       |
| 4.2.1.1 Улучшение пластичности бетонной смеси с помощью пластифицирующей добавки .....                                 | 102       |
| 4.2.1.2 Улучшение пластичности бетонной смеси с помощью фибры .....  | 106       |
| 4.2.2 Рекомендации по корректировке состава бетона .....   | 115       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.3 Общий алгоритм проектирования состава бетона с обеспечением заданной прочности, удобоукладываемости и пластичности, и пример его использования.....                   | 117        |
| Выводы по четвертой главе.....  | 119        |
| <b>5. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>  | <b>121</b> |
| 5.1 Анализ состояния технологической линии по выпуску предварительно напряженных плит пустотного настила непрерывным безопалубочным способом.....                         | 121        |
| 5.2 Проектирование состава бетонной смеси для производства предварительно напряженных плит пустотного настила с использованием результатов лабораторных исследований..... | 127        |
| 5.3 Выпуск опытно промышленной партии плит пустотного настила и оценка технико-экономической эффективности предложенных решений.....                                      | 129        |
| Выводы по пятой главе.....  | 131        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>133</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>   | <b>136</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>  | <b>150</b> |
| Приложение А – дипломы и справки победителя конкурсов грантов КНВШ Санкт-Петербурга.....  | 151        |
| Приложение Б – патент РФ на изобретение № 2677234.....  | 155        |
| Приложение В – Рекомендации по определению предельной растяжимости бетонной смеси .....   | 156        |
| Приложение Г – акт промышленных испытаний .....   | 162        |
| Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД.....   | 164        |
| Приложение Е – прибор для определения пластичности. КД.....   | 177        |
| Приложение Ж – программа для ЭВМ для расчета состава бетона .....   | 185        |

## ВВЕДЕНИЕ

**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 свежесформованных 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 свежесформованных 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, Боломея, 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 свежесформованных 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 плотности 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 испытанных, 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 формовании бетонных 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-ой, 70-ой, 71-ой и 73-ей научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018, 2020 гг.), 74-ой и 75-ой 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 10 научных работах общим объемом 5,35 п.л., лично автором – 4,35 п.л., из них 3 статьи, в изданиях входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, 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.

# 1. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

## 1.1 Технологии непрерывного безопалубочного формования

В современном жилищном строительстве среди железобетонных изделий наибольшим спросом пользуются такие изделия, как плиты пустотного настила, балки, сваи и ригели [110]. Для производства таких изделий в России и других странах СНГ, как правило, используются агрегатно-поточная или конвейерная технологии. Однако в большинстве промышленно-развитых странах для производства вышеперечисленных изделий используют технологии непрерывного безопалубочного формования несмотря на то, что данные технологии зародились в СССР и носили название «комбайн-настил» [110].

На сегодняшний день технологии непрерывного безопалубочного формования получили совершенно иной, более технологичный и конкурентоспособный вид. Теперь производство бетонных и железобетонных изделий безопалубочным способом возможно не только в заводских условиях, но и в условиях строительной площадки [65, 98]. Сегодня номенклатура изделий, выпускаемых по технологии непрерывного безопалубочного формования, практически неограниченна [61]. В заводских условиях выпускаются такие изделия, как пустотные плиты настила, сваи, балки, дорожные плиты, силовые элементы конструкций и многие другие. В условиях строительной площадки изготавливаются различные лотки, дорожные полотна, каналы, отбойники, бордюры и т.д.

Суть технологии заключается в формировании изделия путем выдавливания малоподвижной (умеренно подвижной) пластичной бетонной смеси через формообразующий элемент. При этом бетонная смесь достаточно подвижна, чтобы принимать необходимую форму, и, в тоже время, она

обладает достаточной пластической прочностью, чтобы сопротивляться действию собственного веса и сохранять свою форму неизменной.

Несмотря на высокий технологический и технический уровень современных формующих машин, для достижения необходимых показателей качества изделий, а именно, прочности, геометрической точности формы и размеров, качества поверхности, необходимо использовать бетонный смеси с повышенным содержанием цемента. Однако, несмотря на высокую энергоемкость вяжущего и его стоимость, наблюдается вполне очевидная экономия, связанная с низкой металлоемкостью, и высокой степенью автоматизации производства [110]. Наряду с техническими преимуществами безопалубочные способы формования имеют преимущества с точки зрения охраны труда и культуры производства [61].

На сегодняшний день выделяют следующие методы непрерывного безопалубочного формования [74, 110]:

- Метод трамбования;
- Метод экструзии;
- Метод виброформования;
- Метод сплитформования;
- Метод непрерывного вибропрессования;
- Метод трехмерной печати.

**Метод трамбования** заключается в уплотнении бетонной смеси специальными молоточками. Данный метод применяется, как правило, в США, например, компанией «*Spancrete Machinery Corporation*». Стоит отметить, что данный метод не считается актуальным и перспективным специалистами многих стран. На примере указанной компании видно, что производство в последние годы пытаются перевести не виброформование. В связи с этим предпринимаются попытки сбыта американского оборудования в страны восточной Европы и Россию. Однако в России и Европе данный способ не пользуется спросом, а соответственно нет и необходимого опыта, и оборудования. Помимо этого, приобретать и внедрять американское

оборудование нецелесообразно, поскольку на американском континенте приняты дюймовые, а не метрические нормалы [110].

**Метод экструзии** состоит в уплотнении и выталкивании через формующие отверстие бетонной смеси шнековыми валами. При этом перемещается не изделие, а формующая машина. Перемещение формующей машины происходит так же за счет шнеков, поскольку машины не оснащаются приводными механизмами, в данном случае формующая машина отталкивается от свежесформованного изделия.

При таком методе формования есть несколько очевидных преимуществ. Во-первых, обеспечивается равномерное по высоте изделия уплотнение, благодаря чему данный метод незаменим при изготовлении изделий, высота которых превышает 500 мм. Во-вторых, экструзионный метод позволяет экономить несколько килограммов цемента на каждом кубометре изделия. В связи с этим данный метод получил широкое распространение в таких странах, как Финляндия, Германия, Канада и некоторые другие.

Кроме очевидных достоинств метод экструзии обладает и принципиальными для Российских условий недостатками [110]:

1) Ограниченная номенклатура изделий. Для нормальной работы экструдера необходима достаточно большая площадь отталкивания, которой обладаю далеко не все изделия. Формование балок, столбов, ригелей и колон просто невозможно;

2) Экструзионное оборудование рассчитано на вяжущее и заполнитель высокого качества, которые не только дорогие, но и недоступные во многих регионах России;

3) Высокие эксплуатационные расходы, связанные с высокой абразивностью используемых бетонных смесей. При взаимодействии шнековых валов со смесью возникает достаточно быстрый износ. Например, для производства 120 тысяч квадратных метров пустотной плиты необходимо 5 комплектов шнековых валов;

4) Сравнительно высокая стоимость оборудования.

**Метод виброформования** заключается в уплотнении бетонной смеси под действием вибрации и выдавливании ее через формообразующий элемент. При этом формующая машина оснащена приводными механизмами, позволяющими машине перемещаться без дополнительных механических воздействий на свежесформованное изделие.

Данный метод наиболее удобен, как в заводских условиях, так и в условиях строительной площадки. Формующие машины неприхотливы к качеству сырья, надежны и долговечны [110]. Номенклатура изделий практически не ограничена. На линиях виброформования возможно производить плиты пустотного настила, ребристые плиты, дорожные плиты, ригели, шпунты, колоны, сваи. В условиях строительной площадки можно производить лотки, отбойники, бордюры, дорожные полотна, и другие изделия и конструкции из бетона и железобетона постоянного сечения.

Следует отметить, что переналадить линию виброформования на выпуск других изделий значительно проще, по сравнению с другими методами (за исключением метода трехмерной печати). Это особенно важно в условиях современных архитектурных тенденций, для которых характерно многообразие и индивидуальность строительных конструкций, а также, в изменчивых условиях рынка. На сегодняшний день две трети всех линий непрерывного безопалубочного формования в России составляют линии виброформования [110].

**Метод сплитформования** представляет собой комбинированный метод формовки, совмещение виброформования и трамбования [74]. При данном методе в первую очередь формуется первый слой изделия, после чего он сразу трамбуется. После трамбовки первого слоя формуется второй слой, затем третий (если высота изделия более 250 мм) [74]. Параллельно с вибрационным воздействием формообразователи и скользящая опалубка совершают горизонтальные возвратно-поступательные движения. Формующие машины оснащены приводными механизмами для обеспечения их перемещения.

К преимуществам данного способа формования можно отнести высокую степень и равномерность уплотнения, достигаемые за счет поочередного уплотнения нескольких слоев. Вместе с тем отмечается возможность использования бетонных смесей с низким расходом цемента.

Однако данная технология обладает и существенными недостатками. Во-первых, оборудование имеет весьма сложную конструкцию. Большое количество моторов и трущихся рычагов усложняет процесс обслуживания формующей машины и увеличивает его во времени, что вызывает дополнительные экономические издержки. Во-вторых, для переналадки технологической линии на выпуск других изделий необходимо заменить формообразующий модуль, стоимость которого составляет, как правило, около 70% от стоимости всей формующей машины [74].

**Метод непрерывного вибропрессования** представляет из себя модификацию виброформования для использования жестких бетонных смесей. Возможность использования жестких смесей достигается за счет подпрессовывания смеси в процессе уплотнения. Данный метод характеризуется большей производительностью по сравнению с виброформованием за счет большей первичной прочности изделий. Также важно, что предъявляются менее строгие требования к используемым бетонным смесям. Однако, для производства по данной технологии необходимо более сложное и дорогое оборудование, которое быстро изнашивается за счет высокой абразивности жестких бетонных смесей. Помимо этого, для данного метода характерны высоки затраты при изменении номенклатуры и переходу к производству изделий другого сечения.

**Метод трехмерной печати** достаточно новый в технологии бетона, вызывающий в последнее время все больший научный и практический интерес [18, 19, 21, 51, 81, 105, 106, 114, 115]. Технология трехмерной печати – это технология полностью автоматизированного послойного создания твердого тела (изделия, конструкции или элемента) на основе цифровой модели без использования различного рода опалубки [16 – 26, 48, 49, 50]. Данная

технология имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с альтернативными технологиями создания строительных изделий. Во-первых, она позволяет изготавливать изделия без помощи опалубки, что существенно снижает стоимость уникальных изделий, это очень важно, при разработке новых изделий или при создании единственных экземпляров изделий [27, 39, 86]. Во-вторых, при использовании данной технологии растет степень автоматизации и роботизации труда, что также положительно сказывается на качестве продукции и на ее стоимости [29 – 38, 40, 44, 46].

В настоящее время разработка данной технологии ведется в Китае, США, Индии, Великобритании, Нидерландах и России. Необходимо отметить, что все разработчики идут схожими путями, и на практике их решения существенно не отличаются друг от друга.

На первый взгляд технология трехмерной печати строительных изделий и конструкций уже получила значительное развитие. Напечатанные изделия и конструкции обладают сложной формой. Напечатанные одноэтажные здания обладают колоссальными экономическими преимуществами, специалисты из Китая отмечают двукратное снижение себестоимости таких построек и высокую скорость их возведения. Напечатанное пятиэтажное здание демонстрирует высокие физико-механические характеристики полученного материала. Однако более детальный анализ имеющихся в свободном доступе фото- (рисунок 1.1) и видеоматериалов показывает наличие существенных недостатков в полученной технологии и в применяемом подходе.

Во-первых, о печати готовых конструкций из бетона или железобетона речь не идет, печатается несъемная опалубка, которая затем армируется и бетонируется. Во-вторых, данная опалубка обладает крайне низким качеством поверхности из-за того, что экструдат на выходе из бетоноукладчика имеет круглое или овальное сечение. В-третьих, до сих пор не опубликовано никаких данных о прочностных или других характеристиках напечатанного материала, что говорит скорее о низких характеристиках, чем о высоких.



Рисунок 1.1 – Напечатанные на 3D-принтере строительные конструкции

Несмотря на перспективность данного направления, пока не приходится говорить о существенном производственном опыте. Однако данную технологию нельзя рассматривать в отрыве от технологий непрерывного безопалубочного формования. Она обладает схожими преимуществами и недостатками, и многие задачи по ее совершенствованию распространяются, в том числе, и на технологию непрерывного безопалубочного формования в целом.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что технологии непрерывного безопалубочного формования на сегодняшний день отличаются разнообразием и многозадачностью. Это направление весьма актуально и перспективно, особенно в России. Все из рассмотренных методов формования обладают технико-экономической эффективностью в сравнении с широко распространенными альтернативными технологиями получения бетонной продукции. Однако не стоит забывать и о нерешенных вопросах, которые препятствуют более активному развитию непрерывного безопалубочного формования. Сегодня специалисты и исследователи к таким вопросам относят повышенный расход цемента, высокую экзотермию, недостаточное качество поверхности, регулирование реологии смеси и др. [62, 64, 74, 79, 99, 100, 102, 103, 111].

Таким образом, технологии непрерывного безопалубочного формования представляют значительный научный и практический интерес. Любые разработки и исследования в данной области являются актуальными и востребованными.

## **1.2 Анализ реологических и технологических свойств бетонных смесей применительно к технологии непрерывного безопалубочного формования**

### **1.2.1 Реологические свойства и модели бетонных смесей**

Слово «реология» первым ввел американский химик Юджин Бингам, производя его от греческого «ρεω», что в переводе означает «теку» [59]. На сегодняшний день реология – это наука о деформациях и текучести вязко-пластичных тел, занимающая промежуточное положение между теорией упругости и гидродинамикой [59]. Она открывает большие практические возможности, связанные с техникой и технологией, в том числе при производстве бетона и железобетона [59].

Реология как самостоятельная наука существует уже больше ста лет и обладает огромной базой знаний, общих принципов и закономерностей. Создавалась и развивалась реология такими учеными, как Бингам, Шведов, Грин, Рейнер, Ильюшин, Ландау и многими другими [59]. На сегодня устойчиво закрепились следующие фундаментальные реологические свойства и явления: упругость, пластичность, вязкость, внешнее трение, когезия. В соответствии с общепринятыми и устоявшимися представлениями о реологии, перечисленные свойства присущи всем без исключения вязко-пластичным системам. и в своей совокупности формируют их поведение под какими-либо механическими воздействиями [75, 85].

**Упругость** – это способность тела к упругим деформациям, то есть способность деформироваться под действием механической нагрузки и принимать исходные размеры и форму после ее снятия [55, 59, 85].

**Пластичность** – это способность тела деформироваться под действием механической нагрузки без разрыва сплошности и сохранять приданную форму после ее снятия [55, 59, 85].

**Вязкость (внутреннее трение)** – это способность тела сопротивляться перемещению одной его части относительно другой под действием механической нагрузки [55, 59, 85].

**Внешнее трение** – это способность тела сопротивляться относительному перемещению под действием внешних нагрузок при помощи сил поверхностного взаимодействия [55, 59, 85].

**Когезия** – это связь между находящимися в прочном контакте двух однородных по составу твердых или жидких фаз, обусловленное силами межмолекулярного взаимодействия. По мнению автора [59] не является отдельным самостоятельным свойством, поскольку для различных материалов определяется вязкостью или ее комбинацией с внешним трением.

Данный набор свойств в полной мере характеризует поведение вязко-пластичных систем. Однако он не позволяет до конца понять природу процессов, протекающих в сложных системах, таких как бетонная смесь. В этом случае более показательным и фундаментальным может быть микрореологический подход [59]. Микрореология рассматривает реологические свойства сложных многокомпонентных систем во взаимосвязи с реологическими свойствами их компонентов.

В результате взаимодействия коллоидных частиц и их фиксации относительно друг друга образуются коллоидные структуры. Коллоидные структуры промежуточны по своим свойствам между вязкими жидкостями и упругими телами [59]. Свойства таких систем в значительной степени зависят от свойств частиц, свойств жидких прослоек и их взаимного расположения. В связи с недостаточной глубиной изученности взаимодействия дисперсных

частиц и процессов образования коллоидных структур микрореология пока не получила должного развития. В связи с этим наиболее распространенным и актуальным является макрореологический подход. Макрореология описывает поведение сложных систем различными механическими моделями (рисунок 1.2).

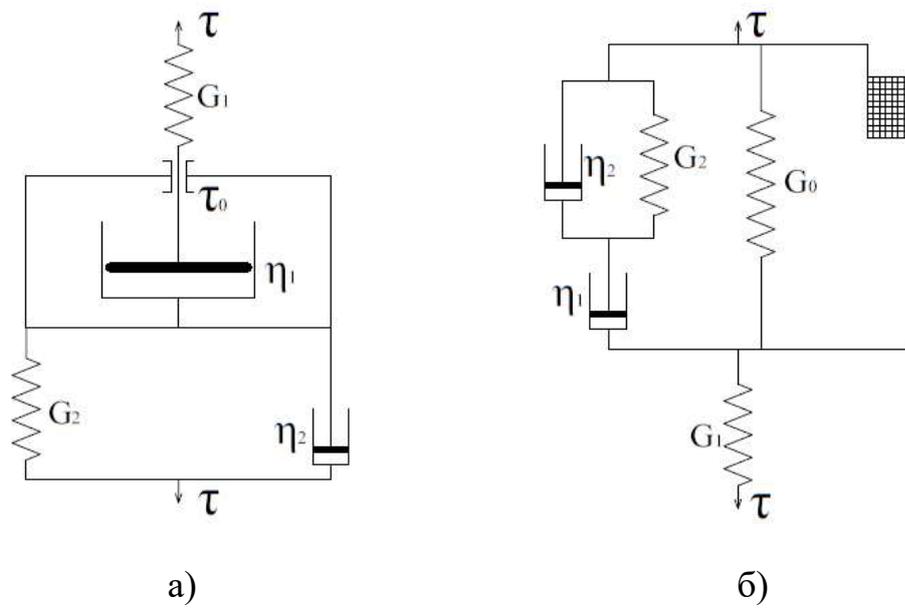


Рисунок 1.2 – Примеры механических моделей бетонной смеси:  
а) модель Шофилда – Скотт-Блера; б) модель А. И. Губанова

Механические модели представлены в виде пружин, цилиндров с поршнями и ползунков, моделирующих соответственно упругость, вязкость и пластичность. Такие элементы называют, соответственно гуковым, ньютоновым и сен-венановым телами. Данные тела выстроены определенным образом в различных комбинациях друг с другом и соединены связями. Связи могут быть последовательными или параллельными. Последовательная связь показывает эффект суммирования деформаций при передаче каждым элементом полной нагрузки, параллельная связь показывает эффект суммирования нагрузок, действующий на каждый элемент при одинаковых скоростях деформации [59].

Для механических моделей характерны следующие преимущества [59]:

- 1) Простота решения дифференциальных уравнений;

2) Возможность использования готовых решений некоторых задач теории упругости и гидродинамики;

3) Осуществление контроля сложных расчетов. Механические модели достаточно наглядны, чтобы в некоторых случаях дать качественное объяснение реологическому явлению, не прибегая к расчетам;

4) Возможность связывать реологическую модель с микроструктурой и молекулярной теорией вещества;

Несмотря на очевидные преимущества таких моделей, они все же охватывают наиболее выраженные свойства изучаемого материала. Таким образом, менее выраженные в отдельности свойства, которые в совокупности оказывают существенное влияние на поведение системы, в таких моделях не рассматриваются.

Для решения технологических задач более применимы и актуальны реологические уравнения состояния [59, 85]. На сегодняшний день предложено множество различных теорий, охватывающих широкий диапазон свойств самых разнообразных материалов. Однако, для составлений реологических уравнений необходимо введение реологических параметров. При введении параметров, приходится удаляться от фундаментальных законов в силу эмпиричности данных величин. По мере удаления от фундаментальных законов возникает специфика для различных материалов, поэтому, если законы, описанные ранее, подходят для всех вязко-пластичных систем, то отдельные параметры и реологические уравнения специфичны для каждого материала.

Не вызывает сомнений, что все вязко-пластичные свойства бетонных смесей обеспечиваются наличием этих свойств у цементного теста. Поэтому далее рассмотрим реологические параметры и уравнения характерные для цементного теста. К реологическим параметрам цементного теста относятся предельное напряжение сдвига, вязкость, время релаксации [55, 59, 85].

**Предельное напряжение сдвига** – это максимальное касательное напряжение в области упругих деформаций тела. Данный параметр

определяет те усилия, которые необходимо приложить к телу, чтобы безвозвратно его деформировать. Иными словами, предельное напряжение сдвига характеризует формуемость цементного теста [55]. Следует отметить, что существующие методы определения предельного напряжения сдвига цементного теста весьма сложные, и возможность определять этот параметр в строительной, как правило, лаборатории отсутствует.

**Вязкость** – это параметр, характеризующий способность тела сопротивляться внешним нагрузкам [55]. Вязкость, как параметр, в отличие от вязкости, как свойства, выражается отношением напряжения сдвига к скорости сдвига, которое является постоянной величиной для ньютоновских жидкостей. Поскольку цементное тесто – это неньютоновская жидкость, а именно, псевдопластичное тело, то его вязкость падает с увеличением скорости сдвига, что существенно усложняет использование данного параметра на практике. В связи с этим определяется вязкость при помощи различных вискозиметров (рисунок 1.3), которые в той или иной степени моделируют технологические процессы. Такие методы испытаний более доступны для строительной лаборатории, однако стоит отметить, что при определении вязкости различными способами могут наблюдаться расхождения в полученных данных, что связано с их высокой эмпиричностью.

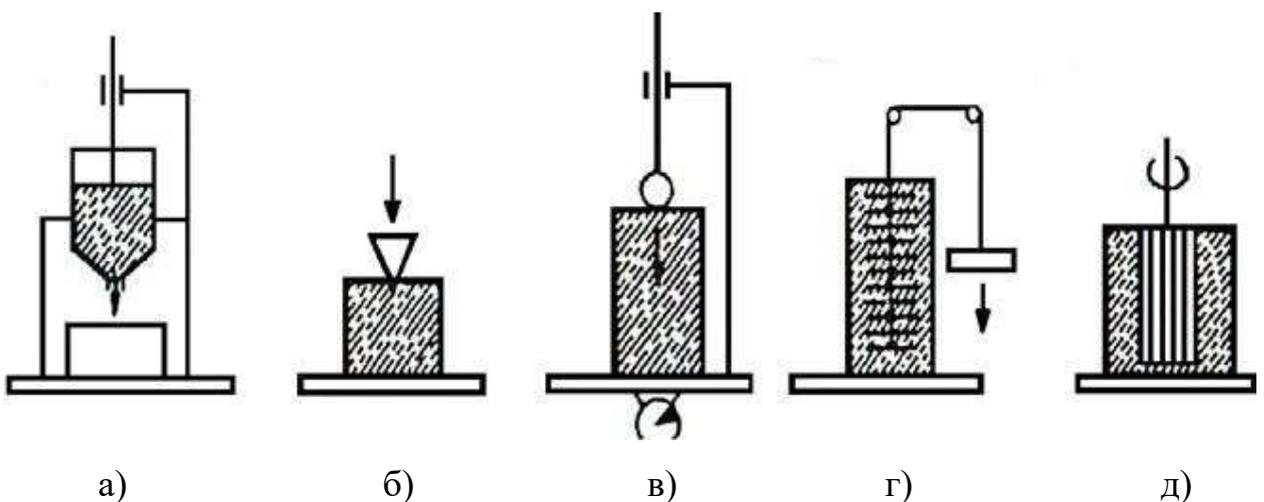


Рисунок 1.3 – Приборы для определения вязкости:

- а) по изменению скорости истечения через отверстие; б) по изменению глубины проникновения конуса; в) по скорости погружения шарика; г) по усилию выдергивания; д) по усилию вращения коаксиальных цилиндров

**Время релаксации** – это время, за которое амплитудное значение возмущений, вызванных внешними воздействиями, уменьшается в  $e = 2,71\dots$  раз [85]. Методы определения времени релаксации весьма сложны и зачастую недоступны для строительной или производственной лаборатории.

Представленные параметры служат математическому описанию реологии цементного теста, и, как правило, определяются в научно-исследовательских лабораториях для выявления общих принципов и закономерностей.

Так, например, предельное напряжение сдвига по [59] удалось связать с водосодержанием цементного теста (уравнение 1.1).

$$\tau_{0,шт} = 40(2 - X_T); \quad (1.1)$$

где  $\tau_{0,шт}$  – предельное напряжение сдвига,  $X_T$  – характеристика относительного водосодержания стандартноуплотненного цементного теста.

Подобные модели позволяют оценить поведение цементного теста под различными воздействиями. Предельное напряжение сдвига, определенное по уравнению 1.1, в сочетании с вязкостью, определенной вискозиметром, могут дать представление о том, как будет вести себя цементное тесто под внешним воздействием. Однако такие модели справедливы лишь для малых объемов, так как в них не учитывается время релаксации и распределение напряжений по объему [85]. Это не позволяет использовать их на практике даже для цементного теста – относительно простой коллоидной системы, не говоря уже о применении к бетонным смесям, более сложным по своей структуре.

Бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из частиц вяжущего, новообразований, зерен заполнителя, специальных добавок, вовлеченного воздуха и жидкой среды [55]. В результате взаимодействия твердых фаз с жидкими, бетонная смесь приобретает связность и свойства единого физического тела. Безусловно, именно цементное тесто, в первую очередь, обеспечивает вязко-пластичные свойства бетонной смеси, вследствие своей высокоразвитой поверхности

раздела твердой и жидкой фаз, на которой развиваются силы молекулярного сцепления. Однако вклад заполнителя в структуру и реологические свойства бетонных смесей сложно переоценить. При введении заполнителя в цементное тесто необходимо вводить новые реологические параметры, такие как коэффициент внутреннего трения, коэффициент сухого трения.

Таким образом, описать бетонную смесь в виде реологической модели весьма сложно, существующие сегодня модели либо не учитывают тиксотропию смесей, либо являются очень сложными и слабовоспроизводимыми.

В настоящее время самой известной реологической моделью бетонной смеси является модель Шведова-Бингама (уравнение 1.2) [55]. Данная модель справедливо характеризует поведение невибрируемой подвижной бетонной смеси, а также транспортируемой по трубам бетононасосами смеси [55].

$$\tau = \tau_0 + \eta_m \frac{dv}{dx} \quad (1.2)$$

где:  $\tau$  – напряжение сдвига,  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига,  $\eta_m$  – пластичная (остаточная) вязкость системы,  $dv/dx$  – градиент скорости сдвига.

Если бетонную смесь подвергнуть вибрационному воздействию, ее начальная структура разрушается, внутреннее трение и сцепление уменьшаются до минимума, и, соответственно, предельное напряжение сдвига также становится малым. В данном случае бетонную смесь с определенной степенью приближения можно описать уравнением Ньютона (уравнение 1.3) [55].

$$\tau = \eta_m \frac{dv}{dx} \quad (1.3)$$

где:  $\tau$  – напряжение сдвига,  $\eta_m$  – пластичная (остаточная) вязкость системы,  $dv/dx$  – градиент скорости сдвига.

С постепенным увеличением концентрации крупного заполнителя в бетонной смеси и снижением водоцементного отношения, сопротивление сдвигу значительно увеличивается. Это связано с повышением величины

вязкого трения, а также с развитием внутреннего сухого трения между зернами заполнителя. В данном случае для описания бетонной смеси используется уравнение Кулона (уравнение 1.4) [55].

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + \eta_{\text{ст}} \quad (1.4)$$

где:  $\sigma$  – нормальное напряжение,  $\varphi$  – угол внутреннего трения,  $\eta_{\text{ст}}$  – структурная вязкость системы.

Как видно, самые распространенные реологические модели не только не учитывают всех свойств бетонных смесей, но и справедливы только в узком диапазоне условий и составов. На сегодняшний день не существует реологических моделей, охватывающих широкий спектр внешних условий, рецептур и свойств компонентов бетонной смеси. Для умеренноподвижных бетонных смесей вообще не существует каких-либо пригодных реологических моделей [59]. Параметры, которыми оперируют реологические модели, достаточно сложны для определения.

В связи с вышеперечисленными тезисами на практике при производстве бетонных и железобетонных изделий реологические модели и параметры не применяются, используются в основном технологические свойства и параметры бетонных смесей [54, 55, 64].

### 1.2.2 Технологические свойства бетонных смесей

Технологические свойства и параметры бетонных смесей отражают их технологичность, то есть применимость бетонной смеси с определенным набором свойств, выраженных параметрами, для конкретной технологической линии или способа бетонирования.

По мнению автора [85] технологические свойства бетонной смеси делятся на две группы: свойства, связанные с потенциальной энергией самой бетонной смеси (подвижность, растекаемость), свойства, связанные с внешними источниками энергии (формуемость, удобоукладываемость,

тиксотропность). Следует отметить, что данные свойства в основном связаны с теми или иными технологическими воздействиями и операциями и не являются фундаментальными. Перечисленные свойства носят эмпирический характер и строго соответствуют процессам, протекающим при производстве бетонов.

**Подвижность** – это способность бетонной смеси расплываться под действием собственной массы и связности [17]. Как правило, данным свойством наделены смеси, предельное напряжение сдвига которых меньше напряжений, вызываемых действием собственной массы [85]. То есть такие смеси после формования не имеют первичной прочности. Рациональная область применения таких смесей – это литьевые технологии. Следует отметить, что малоподвижные бетонные смеси, которые обладают первичной прочностью, в обычном состоянии не являются подвижными, но они обладают тиксотропией, которая позволяет под вибрационным воздействием приобретать заметную подвижность. Такие смеси также используются в литьевых технологиях, но в условиях тиксотропного разжижения.

**Растекаемость** – это способность бетонной смеси не просто изменять свою форму под действием сил гравитации, как в случае подвижности, но и растекаться, то есть самостоятельно принимать форму сосуда и выравнивать верхнюю поверхность [85]. Таким свойствам наделены самоуплотняющиеся бетонные смеси, используемые в литьевых технологиях, при которых нет возможности создания условия для тиксотропного разжижения. Такое свойство может потребоваться при изготовлении изделий и конструкций сложной формы или с высоким коэффициентом армирования.

**Формуемость** – это способность бетонной смеси принимать любую заданную форму в условиях сжатия со сдвигом [55]. Данным свойством наделены все бетонные смеси, но определяется оно только для смесей, формуемых дополнительным сжимающим воздействием. Стоит отметить, что большое распространение получил термин жесткость. **Жесткость** – это свойство обратное формуемости, то есть, способность бетонной смеси

сопротивляться деформациям под действием сжатия со сдвигом. Данный термин получил широкое распространение из-за способов определения формуемости, которые более наглядно показывают жесткость.

**Удобоукладываемость** – это собирательное свойство, которое характеризует способность смеси к формованию с созданием сплошной и плотной среды под внешними воздействиями или без них при конкретных условиях формования [55]. Данный термин носит исключительно технологический характер. Одна и та же смесь может быть удобоукладываемой или не являться таковой, в зависимости от технологии формования.

**Тиксотропность** – это способность бетонной смеси становиться более подвижной (или более формуемой) под механическим воздействием и возвращаться к исходным свойствам после снятия этого воздействия [55].

Также следует отметить, что бетонные смеси обладают еще большим набором технологических свойств, таких как расслаиваемость, сохраняемость, пористость и т.д. Однако данные свойства не связаны с поведением бетонной смеси под механическими воздействиями, и характеризуют бетонную смесь с точек зрения, не связанных непосредственно с процессом формования. Поэтому в данной работе перечисленные свойства остаются второстепенными.

Для определения пригодности бетонной смеси к использованию в той или иной технологии используются ее технологические параметры. Параметры характеризуют свойства бетонной смеси и полностью отражены в нормативной документации, они нормируются в [11] и определяются в соответствии с [2]. К таким параметрам относятся осадка конуса, жесткость, распыл смеси.

**Осадка конуса (ОК)** определяется по изменению высоты свежесформованного конуса под действием собственного веса и измеряется в сантиметрах. В нормативной документации [11] существует разделение бетонных смесей на 5 марок по осадке конуса. Данная величина характеризует

подвижность бетонной смеси. Для определения осадки конуса используют стандартный конус Абрамса. Следует отметить, что данный метод оценивает только геометрические изменения формы свежеотформованной бетонной смеси, причем только по одному показателю – высоте. Данный метод никак не учитывает тиксотропность смеси.

**Жесткость** бетонной смеси измеряется в секундах, и характеризует то время, за которое смесь принимает необходимую форму под внешним воздействием. Этот параметр характеризует формуемость бетонной смеси. Для определения жесткости смеси в [11] существует три метода. По методу Вебе жесткость определяется на приборе Вебе. В данном случае жесткость – это время в секундах, необходимое для изменения формы бетонной смеси от свежеуложенной в конус до формы цилиндра и дальнейшего отделения цементного теста под действием вибрации и сжатия со сдвигом. По методу Красного жесткость – это время в секундах до начала отделения цементного теста из уложенной в стандартную форму бетонной смеси под действием вибрации и пригруза. Данный метод можно использовать только для определения жесткости мелкозернистых бетонных смесей. По методу Скрамтаева жесткость – это время в секундах, необходимое для изменения формы бетонной смеси от свежеуложенной в конус до формы куба (стандартная форма ФК-150 или ФК-200) и выравнивания верхней поверхности под вибрационным воздействием. В данном случае используется стандартный конус Абрамса. Согласно [11] жесткость разделена на пять марок по жесткости. Данный параметр используется для бетонных смесей, формуемых в заводских условиях при наличии вибрационного воздействия и (или) пригруза.

**Распływ бетонной смеси** определяется по величине расплыва свежеотформованного конуса из бетонной смеси под действием собственного веса и встряхиваний на встряхивающем столе. Согласно [11] распływ бетонной смеси делится на 6 марок по расплыву. Данный показатель характеризует подвижность бетонной смеси с учетом ее тиксотропности, а

также учитывает возможное расслоение бетонной смеси в результате механических воздействий.

Как уже говорилось ранее, каких-либо пригодных реологических моделей для описания малоподвижных бетонных смесей нет, а ведь именно такие смеси используются при непрерывном безопалубочном формовании. То же самое касается и технологических свойств, и параметров бетонной смеси. Существующие на сегодняшний день классификации, методы и методики совершенно четко разделяют бетонные смеси на группы. К таким группам относятся подвижные и жесткие бетонные смеси, которые обладают выраженными свойствами подвижности и жесткости, соответственно. Бетонные смеси для непрерывного безопалубочного формования находятся на границе и обладают свойствами обеих групп. Такие смеси принято называть малоподвижными или умеренноподвижными. Малоподвижные бетонные смеси могут обладать первичной прочностью, но, в тоже время, легко приобретают подвижность под малыми воздействиями, которых в процессе производства сложно избежать. Более того, все существующие параметры так или иначе связаны с моделированием процессов формования по соответствующим технологиям, а перечисленные методы моделирует процесс непрерывного безопалубочного формования лишь частично.

Следует отметить, что все технологические свойства бетонных смесей так или иначе отражают их реологические свойства, однако детальный анализ позволил установить, что существующие методы испытаний моделируют процессы, при которых невозможно увидеть и оценить проявлений таких фундаментальных реологических свойств как упругость и пластичность. [28, 59, 69, 70, 77 – 79, 81, 91, 92, 108, 113]

### **1.3 Вопросы проектирования состава бетонной смеси**

Сегодня существует большое число различных методик проектирования состава бетона, которые, как правило, включают 6 обязательных этапов [55]:

- 1) Формирование задания на подбор состава бетона, включающего все требования к бетонной смеси и бетону, которые назначаются исходя из особенностей изготовления и эксплуатации строительных изделий и конструкций на основе многолетнего опыта специалистов и действующей нормативной документации;
- 2) Выбор сырьевых материалов для бетона и получение необходимых данных, в достаточной степени характеризующих их свойства;
- 3) Расчет предварительного состава бетона с использованием как обобщенных зависимостей, так и единичных (полученных с использованием конкретных сырьевых материалов);
- 4) Экспериментальная проверка предварительного состава в лабораторных условиях и при необходимости его корректировка, с получением лабораторного состава;
- 5) Экспериментальная проверка лабораторного состава в заводских условиях и при необходимости его корректировка, в том числе уточнение расходов основных компонентов на  $1 \text{ м}^3$ , с получением заводского состава;
- 6) Корректировка состава в процессе производства с учетом изменчивости свойств сырьевых материалов.

При реализации представленных этапов, комплекс основных свойств бетонной смеси и бетона главным образом формируется уже к 4-му этапу, а затем лишь корректируется и доводится до полного соответствия поставленной технической задачи.

Так на первом этапе закладываются требования к бетонной смеси и бетону, обеспечение которых должно позволять решать поставленную задачу – получение строительного изделия или конструкции, соответствующую требованиям проекта. Требования в данном случае выражаются в виде численных характеристик, марок, классов и т.д. Для полноценной реализации данного этапа для изделий, получаемых непрерывным безопалубочным способом, сегодняшних знаний о бетонных смесях недостаточно, так как до

сих пор не установлены характеристики, отвечающие за сохранение сплошности смеси при формовании.

Выбор материалов и необходимость определения тех или иных их свойств на втором этапе обуславливается безусловным влиянием сырья на свойства получаемой продукции. Однако, поскольку не определены характеристики, отвечающие за сохранение сплошности бетонной смеси при формовании, неизвестным остается и влияние сырья на эти характеристики, что так же препятствует полноценной реализации второго этапа.

На этапе расчета предварительного состава используются различные зависимости, как обобщенные, так и единичные. Существующее сегодня многообразие методик подбора состава обусловлено в основном различными способами его расчета, но все они, так или иначе, в математическом смысле сводятся к решению системы, состоящей из  $n$  уравнений (не обязательно в алгебраическом виде, но и графическом, табличном и др.), где  $n$  не меньше количества сырьевых компонентов бетона [55]. При этом уравнения должны взаимосвязывать свойства бетонной смеси и бетона с расходами сырьевых материалов и их свойствами. Например, один из самых известных на сегодня методов расчета состава бетона – метод абсолютных объемов – заключается в решении системы уравнений 1.5...1.8.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_B = R_C \cdot A \cdot \left( \frac{C}{B} \pm 0,5 \right) \end{array} \right. \quad (1.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{B}{\rho_B} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{P}{\rho_P} + \frac{Щ}{\rho_{Щ}} = 1 \end{array} \right. \quad (1.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} ОК = f(B) \end{array} \right. \quad (1.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Щ = \frac{1000}{\frac{\alpha \Pi_{Щ}}{\rho_{Щ}^H} + \frac{1}{\rho_{Щ}}} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

где:  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $R_C$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей;  $C$ ,  $B$ ,  $P$ ,  $Щ$  – расход цемента воды, песка, щебня на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_C$ ,  $\rho_P$ ,  $\rho_{Щ}$  – плотность зерен цемента, песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>; ОК – осадка конуса, см;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен;  $\Pi_{Щ}$  – пустотность щебня;  $\rho_{Щ}^H$  – насыпная плотность щебня; уравнение 4.1 – основной закон прочности бетона;

уравнение 4.2 – уравнение абсолютных объемов; уравнение 4.3 – зависимость осадки конуса от расхода воды, представляется в виде номограммы; уравнение 4.4 – зависимость расхода щебня от зернового состава заполнителей, выраженного коэффициентом раздвижки зерен и пустотностью щебня.

Расчет состава бетона методом абсолютных объемов производится по алгоритму, позволяющему аналитически решить представленную систему уравнений путем выражения одних неизвестных через другие. Расходы основных компонентов – Ц, П, Щ, В – являются неизвестными, а поскольку их 4, то и уравнений в системе тоже 4. Как видно из данного примера, система включает обобщенные зависимости, которые были получены исследователями и сегодня являются в строительном материаловедении основными законами и правилами. Другими словами, для полноценной реализации расчетного этапа подбора состава необходимо обладать научными знаниями о влиянии различных факторов на свойства бетонных смесей и бетонов, представленными в виде обобщенных моделей. Не являются исключением и свойства смеси, отвечающие за сохранение сплошности при формовании, знания о которых сегодня отсутствуют.

На последующих этапах осуществляется лишь корректировка состава, необходимость которой обусловлена изменчивостью свойств сырьевых материалов и некоторой неточностью методов испытаний сырьевых материалов и обобщенных зависимостей. Для их реализации, как правило, не требуется дополнительных знаний.

Исходя из краткого анализа существующих методик подбора состава можно сделать вывод, что сегодняшние знания не позволяют целенаправленно спроектировать состав бетона в полной мере удовлетворяющего условиям непрерывного безопалубочного формования. Таким образом, можно сформулировать вопросы, ответы на которые позволят существенно улучшить существующие методики подбора состава бетона:

- 1) Какие характеристики бетонной смеси в полной мере отражают поведение бетонной смеси при непрерывном безопалубочном формовании?

- 2) Каким образом измерить эти характеристики у бетонной смеси?
- 3) Как и в какой степени свойства сырьевых материалов влияют на эти характеристики?
- 4) Какие обобщенные зависимости необходимо включить в расчет состава бетона, для обеспечения этих характеристик?

### **Выводы по первой главе:**

На основе анализа литературных источников и имеющихся в них данных по исследуемой теме можно сделать следующие выводы:

1) Технологии непрерывного безопалубочного формования являются актуальным и перспективным направлением в производстве бетонных и железобетонных изделий, соответствуют современному уровню развития техники и технологии и обладают потенциалом к дальнейшему развитию;

2) Современные реологические модели не описывают в достаточной степени поведение малоподвижных бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании. Формирование и развитие представлений о реологии таких смесей является актуальной задачей в строительном материаловедении;

3) Существующие методики подбора состава бетона, базирующиеся в том числе на знаниях о реологии бетонных смесей, не позволяют в полной мере гарантировать получение качественной бездефектной продукции непрерывными безопалубочными способами;

4) Ключевые вопросы для развития технологий непрерывного безопалубочного формования связаны с проектированием бетонных смесей и состоят, главным образом, в определении характеристик смеси, в полной мере отражающих ее поведение при формовании, степени и характера влияния на них свойств сырьевых материалов и в создании обобщенных моделей, учитывающих это влияние.

## **2. РОЛЬ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ И МЕТОД ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ**

### **2.1 Причины нарушения сплошности при непрерывном безопалубочном формовании**

Так как реология – это наука о деформациях, то для понимания протекающих с точки зрения реологии процессов в бетонной смеси необходимо рассмотреть ее деформирование в результате осуществления технологических операций. При таком подходе в первую очередь необходимо выделить отличительные особенности безопалубочных способов формования, которые связаны непосредственно с процессом укладки, так как выбор способа приготовления и транспортирования бетонной смеси осуществляется независимо от способа ее формования.

При таком подходе следует выделить две технологические операции: укладка смеси, включая процесс уплотнения и выдавливания; ожидание схватывания свежесформованного изделия.

При уплотнении и выдавливании бетонной смеси на нее действует нагрузки от собственного веса и механизмов и стенок формующей машины. Очевидно, что воздействие формующей машины на бетонную смесь несоизмеримо больше, чем воздействие сил собственного веса. На этом технологическом этапе происходит следующее:

- 1) Формующая машина, воздействуя механически на бетонную смесь, создает в ней напряжение сдвига;
- 2) Если напряжение сдвига превышает предельное напряжение сдвига, то начинается процесс течения бетонной смеси;
- 3) Если напряжение сдвига меньше предельного напряжения сдвига, то бетонная смесь не может эффективно деформироваться, уплотняться и выдавливаться.

Другими словами, для создания течения бетонной смеси внутри формующей машины, ее эффективного уплотнения и выдавливания необходимо, что бы предельное напряжение сдвига смеси не превышало тех напряжений, которые создает бетоноукладчик. С учетом того, что предельное напряжение сдвига – это характеристика вязкости, можно сформулировать следующие требование данной технологической операции: вязкость бетонной смеси не должна превышать требуемую, для создания течения внутри формующей машины.

Практический опыт показал [90, 102, 103], что нормировать данный этап можно и не вязкостью, а с помощью технологических свойств бетонной смеси, например с помощью подвижности и с помощью жесткости. Данные свойства, не являясь фундаментальными реологическими, так или иначе отражают вязкость, что связано со способом их определения.

Поскольку протекание данного процесса представляет огромное значение в технологии непрерывного безопалубочного формования, так как он связан с большими экономическими издержками в случае различных сбоев, современная практика способна эффективно регулировать свойства смеси, с точки зрения требований процесса укладки и уплотнения бетонной смеси.

После выдавливания бетонной смеси из бетоноукладчика и формирования изделия, в зависимости от внешних условий на бетонную смесь могут действовать разные факторы. Обязательным условием непрерывного безопалубочного формования является сохранение приданной формы изделия, так как любой продукт должен соответствовать требованиям по геометрическим характеристикам. Существенное отклонение от заданных размеров недопустимо, однако, не всегда возможно избежать деформирования и на этом этапе. Для полного понимания протекающих процессов в первую очередь рассмотрим случай, при котором созданы идеальные условия формования.

При создании таких условий, на свежесформованное изделие не будет действовать никаких внешних механических нагрузок, воздействие будет

оказывать исключительно собственный вес. При этом возможны два варианта поведения бетонной смеси:

1) Вязкости бетонной смеси достаточно, чтобы напряжения от собственного веса не превышали предельное напряжения сдвига. В этом случае собственный вес не способен запустить процесс деформирования бетонной смеси, а значит и не будет отклонений от заданных размеров и формы. Полученное в таком случае изделие будет соответствовать требованиям по геометрическим характеристикам;

2) Вязкости бетонной смеси недостаточно, чтобы напряжения от собственного веса не превышали предельное напряжение сдвига. В этом случае под действием собственного веса начнется процесс деформирования, свежееотформованное изделие начнет оседать. Процесс осадки будет протекать до тех пор, пока сечение, поперечное направлению действию сил собственного веса, не достигнет площади, при которой напряжение станет меньше предельного напряжения сдвига. Полученное изделие не будет соответствовать требованиям по геометрическим характеристикам.

При обеспечении идеальных условий формования достаточно нормировать вязкость смеси, при этом вне бетоноукладчика она не будет деформироваться вообще. С точки зрения реологии, можно сформулировать следующее требование данной технологической операции: вязкость бетонной смеси должна быть не меньше требуемой, для препятствия действию сил от собственного веса.

На практике обеспечение идеальных условий формования невозможно, связано это в первую очередь с воздействием на бетонную смесь формующей машины, находящейся в непосредственной близости от свежееотформованного изделия и взаимодействующей с ней. Возвращаясь к предыдущему идеальному случаю, требования по вязкости смеси для препятствия оседанию смеси сохраняются, но помимо воздействий от собственного веса, будут и внешние механические воздействия, которые можно разделить на две группы:

1) Непреднамеренные механические воздействия. Эти воздействия связаны с несовершенством используемого оборудования или прочих факторов, влияющих на работу бетоноукладчика. Например, при бетонировании конструкции в условиях строительной площадки, бетоноукладчик движется по недостаточно ровной поверхности, что приводит к отклонению его траектории от идеально прямой линии. В этом случае, при наклоне формующей машины будет оказываться воздействие на свежееотформованное изделие, что приведет к его деформированию. Также возможно и отклонение от скорости перемещения бетоноукладчика. При условии принудительной подачи смеси (например, шнековым валом) также будет наблюдаться деформирование бетонной смеси. Значительно минимизировать такие воздействия представляется возможным исключительно при огромных экономических издержках, связанных с производством высокотехнологичного оборудования и качественной подготовкой поверхности его перемещения, что нецелесообразно в современных экономических условиях а в некоторых случаях невозможно.

2) Преднамеренные механические воздействия. Данные воздействия отличаются от непреднамеренных тем, что изменение траектории или скорости движения формующей машины необходимо для создания изделия заданной формы, как правило нелинейной. Сами воздействия повторяют механизм, описанный в предыдущем пункте, однако от них невозможно избавиться ни при каких обстоятельствах, поскольку продиктованы они не изъянами в технологии или технике, а требованиями к форме изделий.

Все описанные внешние воздействия способны вызывать напряжения, многократно превышающие предельное напряжение сдвига бетонной смеси, в связи с чем нормирование вязкости для компенсации этих воздействий лишено смысла. Насколько высокой не была бы вязкость смеси, она не способно препятствовать деформированию, вызванным, например, поворотом или наклоном многотонной формующей машины.

Однако, процесс деформирования бетонной смеси сам по себе не обязательно негативное явление в технологии непрерывного безопалубочного формования, ведь зачастую, допуски по точности изготовления изделий могут превышать деформации, вызванные внешними воздействиями. Наибольший интерес в данном случае представляет не сама деформация, а ее результат.

На примере устройства бетонного ограждения участка Киевского шоссе в Ленинградской области (рисунок 2.1) можно проанализировать, какие последствия вызывают деформации бетонной смеси и как с ними бороться. На рисунке 2.1-а видны образовавшиеся трещины на поверхности и в глубине свежесформованного дорожного отбойника. В соответствии с комментариями специалиста, осуществлявшего сопровождение бетонирования, данные трещины образовались после выхода бетонной смеси из формующей машины, но до начала схватывания. При этом образование трещин происходило в момент изменения скорости и (или) траектории перемещения формующей машины. То есть возникали деформации, которые приводили к разрыву сплошности среды. В то же время, на рисунке 2.1-б видно, что при схожих условиях формования, но при использовании другого состава смеси, трещин в теле свежесформованного изделия не образуется. Это говорит о том, что бетонные смеси различного состава обладают различными свойствами, которые и определяют устойчивость смеси к разрыву в результате деформации.

Представленные данные подтверждает и опрос специалистов, который показал, что проблема трещинообразования является распространенной и более или менее актуальной в зависимости от технологии формования. Как правило, технологи понимают, как бороться с трещинообразованием свежесформованного несхватившегося изделия. Распространенными способами являются повышение расхода цемента и (или) пластифицирующей добавки. Однако, как говорилось ранее, инструментальная база в технологии бетона характеризуется узкой направленностью, а сами методы испытаний выявляют только вязкость и (или) тиксотропность бетонной смеси. Вследствие

этого, несмотря на интуитивное понимание специалистов, эффективно регулировать свойства смеси для устранения процесса трещинообразования не получается. При отсутствии инструментальной базы, включающей методы испытаний и рекомендации по изменению рецептуры, подобрать оптимальный состав бетонной смеси возможно только при проведении производственных опытов. С учетом того, что производить большое количество пробных производственных замесов и экспериментировать на производственной формующей машине дорого, складывается ситуация, при которой не приходится говорить об использовании в технологии непрерывного безопалубочного формования бетонных смесей оптимального состава. В связи с чем и возникает необходимость разработки такого инструментария, для чего в первую очередь необходимо понять, какое именно свойство смеси, отвечает за данный процесс.



а)

б)

Рисунок 2.1 – свежесформованный дорожный отбойник по технологии непрерывного безопалубочного формования:  
а) с выраженными трещинами; б) без дефектов.

При анализе терминов и определений, приведенных ранее, очевидно, что за сохранение сплошности материала при его деформировании отвечает **пластичность** – способность материала деформироваться под действием механической нагрузки без разрыва сплошности и сохранять приданные размер и форму после ее снятия. Стоит отметить, что само определение пластичности состоит из двух частей: способность деформироваться без разрыва сплошности; способность сохранять приданные размер и форму после снятия внешней нагрузки. Вторую часть определения можно охарактеризовать, как отсутствие упругих или остаточных деформация. Для бетонных смесей не характерно заметное проявление упругих свойств, а возвратные деформации, если и есть, то незаметны невооруженным глазом. В связи с этим, рассматривать данную компоненту применительно к бетонным смесям для непрерывного безопалубочного формования нет необходимости, достаточно остановиться на первой половине определения.

Таким образом можно заключить, что при непрерывном безопалубочном формовании одним из важнейших свойств бетонной смеси является пластичность, которая и определяет наличие или отсутствие трещин на поверхности и в глубине свежесформованного изделия, возникающих при его деформировании. При этом, вопросам пластических свойств смесей не уделяется должного внимания, не существует методов их оценки, прогнозирования и регулирования.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что сегодня реологические модели и параметры, а также технологические параметры и инструментальная база не дают возможности оптимизировать составы используемых при непрерывном безопалубочном формовании бетонных смесей. Исследования, посвященные развитию реологических представлений, а также инструментальной базы являются актуальными и востребованными. Особенно важными являются вопросы, связанные с пластическими свойствами малоподвижных бетонных смесей: на данный момент до сих пор нет способа

понять заранее, будут ли образовываться трещины в свежесформованном изделии или нет.

## **2.2 Моделирование непрерывного безопалубочного формования в лабораторных условиях**

Для моделирования процесса непрерывного безопалубочного формования необходимо сконструировать и изготовить лабораторный бетоноукладчик, моделирующий данный процесс.

В ходе предварительного рассмотрения данной задачи были сформулированы следующие требования к лабораторному бетоноукладчику:

1) Пригодность бетоноукладчика к работе со смесями, наиболее часто используемых в технологии непрерывного безопалубочного формования;

2) Возможность управления скоростью бетонирования;

3) Независимость скорости бетонирования от реологических и технологических параметров смеси.

4) Возможность изготавливать образцы различного размера и формы;

Для обеспечения данных требований была выбрана схема бетоноукладчика с принудительной подачей бетонной смеси шнеком. Несмотря на сложную конструкцию, данная схема позволяет в максимальной степени обеспечить перечисленные требования. Был сконструирован (приложение Д) и изготовлен (рисунок 2.23) лабораторный бетоноукладчик с принудительной подачей бетонной смеси.

Крепежная планка бетоноукладчика изготовлена из массива сосны и необходима для закрепления устройства на рабочей поверхности (на лабораторном столе). Крепежная планка оснащена двумя шарнирами для закрепления основной рамы бетоноукладчика.

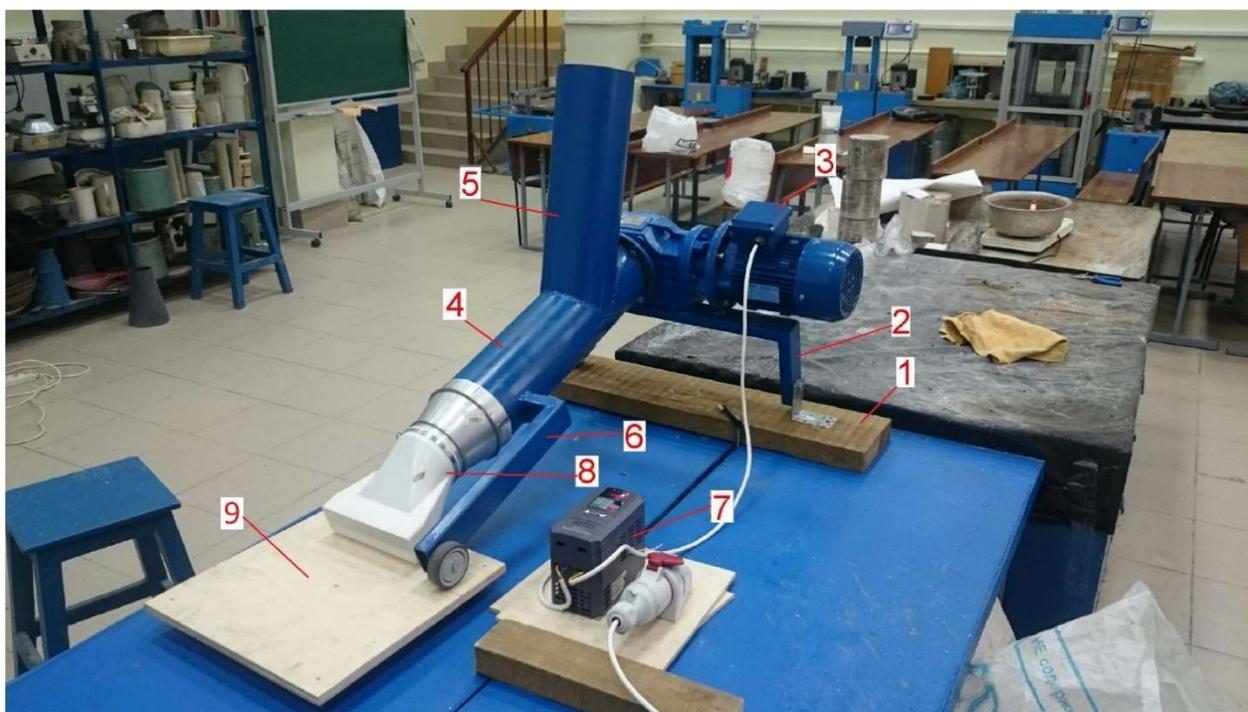


Рисунок 2.2 – Лабораторный бетоноукладчик:

1 – крепежная планка; 2 – основная рама; 3 – мотор-редуктор; 4 – материалный цилиндр; 5 – расходный бункер; 6 – вспомогательная рама; 7 – частотный преобразователь; 8 – сменный формообразователь; 9 – подвижная паллета.

Основная рама бетоноукладчика изготовлена из стальной трубы прямоугольного сечения. Закреплена к крепежной планке через осевые шарниры и имеет возможность вращаться вокруг горизонтальной оси. На силовую раму жестко закрепляется мотор-редуктор бетоноукладчика.

Цилиндроконический мотор-редуктор бетоноукладчика *KAF 47 MS90S-4* мощностью 1,1 кВт закреплен на основной раме прибора и приводит в движение шнековый вал. К мотор-редуктору жестко закреплен материалный цилиндр бетоноукладчика.

Частотный преобразователь *PROSTAR PR6000* подключен к мотор-редуктору через трехфазный кабель, и осуществляет функцию управления работой бетоноукладчика. К частотному преобразователю подключен пятижильный кабель для подключения к электрической трехфазной сети переменного тока с напряжением 380 В.

Материальный цилиндр бетоноукладчика представляет собой стальную трубу диаметром 150 мм. Материальный цилиндр жестко закреплен к мотор-редуктору с заднего торца, к расходному бункеру в верхней части и к сменной формообразующей насадке с переднего торца. Внутри него располагается шнековый вал.

Шнековый вал диаметром 148 мм располагается внутри материального цилиндра и крепится к мотор-редуктору посредством шпоночно-стержневого переходника. Шнековый вал предназначен для нагнетания бетонной смеси через материальный цилиндр бетоноукладчика к формообразующей насадке.

Сменные формообразующие насадки являются переходниками с круглого сечения материального цилиндра на необходимое сечение изготавливаемого образца.

Вспомогательная рама бетоноукладчика изготовлена из стальной трубы прямоугольного сечения и оснащена роликом. Обеспечивает постоянную высоту формования и позволяет плавно перемещать подвижную паллету.

Подвижная паллета устанавливается под ролик вспомогательной рамы и способна беспрепятственно горизонтально перемещаться вдоль оси материального цилиндра и формообразующей насадки.

Расходный бункер представляет собой стальную трубу круглого сечения диаметром 150 мм вваренную в материальный цилиндр бетоноукладчика.

Полученные бетоноукладчик в полной мере позволяет моделировать процесс формования бетонной смеси по технологии непрерывного безопалубочного формования, при этом сам бетоноукладчик остается неподвижным, перемещается исключительно паллета и свежесформованное изделие вместе с ней.

Стоит отметить, что в силу особенностей конструкции лабораторного бетоноукладчика (отсутствие приводных механизмов, неподвижность бетоноукладчика), процесс формовки во многом зависит от оператора, который управляет процессом и подвижной паллетой. В данном случае, процесс формовки сопровождается значительными изменениями скорости и

траектории перемещения паллеты, что вызывает дополнительные воздействия на свежеотформованное изделие.

Для анализа процесса трещинообразования свежеотформованного изделия при помощи лабораторного бетоноукладчика использовались различные бетонные смеси (мелкозернистые бетонные смеси, тяжелые бетонные смеси, фибробетонные смеси, легкие бетонные смеси) отличающиеся по составу (составы отличались расходом вяжущего, соотношением расходов заполнителей, расходом фибры, типом и расходом пластифицирующей добавки). Необходимо отметить, что прослеживаемые в ходе экспериментов тенденции и механизмы схожи для всех использованных бетонных смесей, поэтому рассмотрим и проанализируем процесс трещинообразования только на мелкозернистой бетонной смеси трех различных составов (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Составы бетонной смеси для анализа процесса трещинообразования

| Показатель             | Величина показателя для |               |               |
|------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
|                        | Состава № 2.1           | Состава № 2.2 | Состава № 2.3 |
| Ц/П                    | 1/3                     | 1/2           | 1/3           |
| Расход добавки, % от Ц | 0                       | 0             | 0,4           |
| Погружение конуса, мм  | 49                      | 52            | 50            |

Важно отметить, что все составы мелкозернистых бетонных смесей подбирались исходя из погружения конуса  $50 \pm 5$  мм. Данное требование продиктовано условиями формования, при меньшем ПК бетонная смесь не уплотняется или застревает в материальном цилиндре или формообразователе, при большем ПК наблюдается существенное оседание свежеотформованного образца.

Рассмотрим процесс формования с использованием состава № 2.1 (рисунок 2.3).

Как видно на рисунке 2.3, в процессе формовки на поверхности изделия образуется множество трещин. Данные трещины образуются после выхода смеси из бетоноукладчика, но до начала схватывания. Как уже говорилось

ранее, процесс формовки на лабораторном бетоноукладчике сопровождается значительными изменениями скорости и траектории перемещения паллеты. Другими словами, в процессе формовки возникают деформации свежеуложенной бетонной смеси, в результате которых происходит разрыв сплошности и образуются поперечные трещины.



Рисунок 2.3 – Процесс формовки на лабораторном бетоноукладчике с использованием состава № 2.1

Рассмотрим процесс формирования с использованием состава № 2.2 на рисунке 2.4, из которого видно, что в отличие от предыдущего случая, количество трещин значительно сократилось, при сохранении условий формирования. То есть имели место те же изменения скорости и траектории перемещения паллеты, возникали те же деформации смеси, но трещины образовывались только при сильнейших из них. Как видно из таблицы 2.1,

используемые в первых двух случаях составы отличаются лишь расходом цемента, и обладают одинаковой вязкостью.



Рисунок 2.4 – Процесс формовки на лабораторном бетоноукладчике с использованием состава № 2.2

Рассмотрим процесс формирования с использованием состава № 2.3 на рисунке 2.5, из которого видно, что с сохранением прежних условий формирования, но использованием состава № 2.3, который отличается от состава № 2.2 наличием пластифицирующей добавки, в процессе формирования на лабораторном бетоноукладчике на поверхности образца не образуется видимых трещин. То есть существующие в результате условий формирования деформации смеси, не приводят к разрыву сплошности.

Анализируя все три примера, можно заключить, что бетонные смеси одного типа, одной вязкости, но разного состава, могут обладать существенным различием пластических свойств, от чего и будет зависеть

процесс трещинообразования свежесформованного изделия. Таким образом, предположение о влиянии состава смеси на ее пластичность и на количество трещин от деформирования при непрерывном безопалубочном формовании подтверждено. Так же на примере состава № 2.2 видно, что трещины могут образовываться или не образовываться в зависимости от величины деформаций.



Рисунок 2.5 – Процесс формовки на лабораторном бетоноукладчике с использованием состава № 2.3

С учетом представлений, полученных в результате наблюдений на лабораторном бетоноукладчике, а также общеизвестных знаний о структуре и свойствах бетонных смесей [55, 59, 85], не вызывает сомнений, что способность бетонной смеси деформироваться без разрыва сплошности среды обеспечивается за счет свойств цементного теста. Именно цементное тесто способно к существенным бездефектным деформациям. При деформации

бетонной смеси деформируется именно цементное тесто, а не заполнитель или другие твердые фазы.

В соответствии с общепринятыми представлениями [55, 59, 85] цементное тесто является системой с высокоразвитой поверхностью раздела твердых и жидких фаз. Эта поверхность раздела насыщена различными межмолекулярными и капиллярными взаимодействиями, благодаря которым цементное тесто, а соответственно и бетонная смесь, приобретают связность. Поверхность раздела можно условно охарактеризовать по двум параметрам: величина поверхности и характер взаимодействий на поверхности. На примере вязкости можно наблюдать, как эти параметры влияют на реологию цементного теста. С увеличением поверхности увеличивается и количество взаимодействий, что приводит к большей структурной прочности, то есть большей вязкости. С изменением характера взаимодействия между фазами, например, при введении пластификатора, величина поверхности сохраняется, однако вязкость системы уменьшается. Но вязкость характеризует лишь структурную прочность системы, она не характеризует то, насколько можно удлинять взаимодействия на поверхности раздела фаз, прежде чем они ослабнут и перестанут обеспечивать сплошность.

По аналогии с вязкостью, можно предположить, что пластические свойства цементного теста также зависят от двух характеристик, величины поверхности и характера взаимодействия на поверхности. Эти характеристики определяют то, насколько сильно может деформироваться цементное тесто до разрыва сплошности, что видно на примере формовки на лабораторном бетоноукладчике. С увеличением расхода цемента, увеличивается поверхность раздела твердых и жидких фаз в смеси и соответственно улучшаются пластические свойства бетонной смеси. С введением пластифицирующей добавки, меняется характер взаимодействий на границе раздела фаз и опять же улучшаются пластические свойства смеси.

Резюмируя вышесказанное можно заключить, что процесс образования трещин в бетонной смеси сводится к следующему:

1) В результате внешних воздействий происходит деформация бетонной смеси;

2) В результате деформаций бетонной смеси деформируется цементное тесто, зерна заполнителя и цемента (и другие твердые фазы) не деформируются, а лишь меняют свое расположение относительно друг друга;

3) Деформации цементного теста приводят к ослабеванию межмолекулярных и капиллярных взаимодействий за счет увеличения расстояния между структурными составляющими;

4) При достижении критической деформации взаимодействия структурных составляющих нарушаются, происходит разрыв сплошности, то есть образуется трещина в цементном тесте, и соответственно в бетонной смеси.

Сформулированный механизм образования и раскрытия трещин, полностью согласуются с общепринятыми представлениями о структуре и свойствах бетонной смеси и цементного теста [17, 55, 59, 73, 83, 85, 104, 109], а также с полученными на лабораторном бетоноукладчике экспериментальными данными.

## **2.3 Метод определения пластичности бетонной смеси и прибор для его осуществления**

### **2.3.1 Обоснование общей схемы определения пластических свойств смеси**

На основе представлений о процессе образования трещин в свежеотформованном изделии, в соответствии с которыми трещины возникают и развиваются в результате деформаций растяжения от различных механических воздействий, предлагается следующее.

Для оценки пластических свойств бетонной смеси предлагается моделировать процесс растяжения бетонной смеси под механическим

воздействием. В качестве параметра оценки предлагается использовать относительное удлинение бетонной смеси, соответствующее образованию первой (первых) трещины (трещин).

Для получения достоверных и воспроизводимых данных в условиях строительной (заводской) лаборатории необходимо соблюдение следующих условий:

1) Достаточная база испытания. База испытаний должна соответствовать возможностям распространенных и доступных измерительных инструментов, таких как линейка и штангенциркуль.

2) Деформация бетонной смеси по всей длине базы должна быть максимально равномерна.

3) Процесс трещинообразования должен быть отчетливо виден.

В связи с этим моделирование процесса растяжения бетонной смеси путем ее линейного удлинения не представляется возможным по следующим причинам. Во-первых, при линейном удлинении бетонной смеси необходимо прикладывать распределенную нагрузку, поскольку деформации растяжения в бетонной смеси распространяются не более чем на 20 мм от точки приложения нагрузки (по результатам предварительных исследований). Во-вторых, в точках приложения нагрузки образуются структурные дефекты, провоцирующие образование и развитие трещин вблизи них. Исходя из этого, для моделирования деформирования бетонной смеси путем ее линейного растяжения необходимо разработать и изготовить прибор сложной конструкции, что не гарантирует достоверности и воспроизводимости получаемых данных.

С учетом вышесказанного предлагается следующая схема испытания (рисунок 2.6). В соответствии с данной схемой предлагается не растягивать свежееотформованный образец, а равномерно его изгибать. В данном случае в качестве измеряемой величины служит прогиб образца, который можно легко измерить с достаточной точностью. Равномерный изгиб обеспечивает равномерность растяжения бетонной смеси по наружной поверхности

образца. Открытая наружная сторона позволяет и наглядно наблюдать процесс образования и раскрытия трещин и в нужный момент зафиксировать их. Таким образом, предложенная схема позволяет выполнить все три условия достоверности и воспроизводимости результатов. Кроме того, изгиб – наиболее вероятный путь к образованию трещин в реальных условиях непрерывного безопалубочного формования.

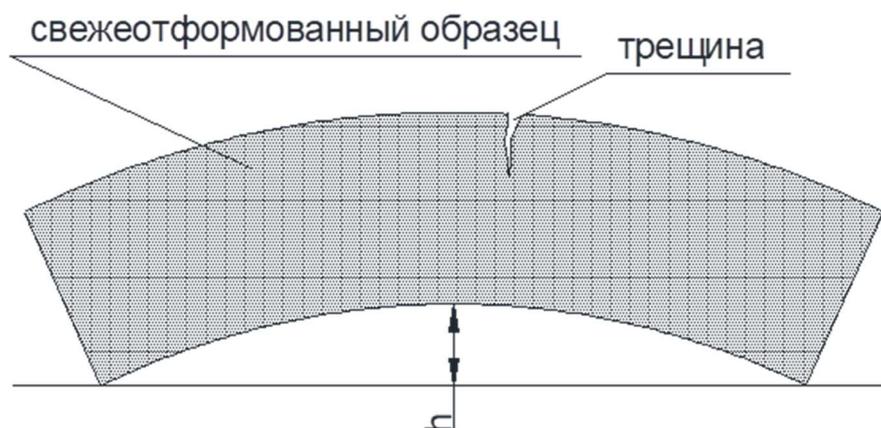


Рисунок 2.6 – Схема испытания

Предложенная схема испытания предъявляет ряд требований к прибору для оценки пластических свойств бетонной смеси:

- 1) Возможность точно измерять величину прогиба образца;
- 2) Возможность управлять скоростью изменения прогиба;
- 3) Возможность испытывать бетонные смеси с различной крупностью заполнителя;
- 4) Возможность уплотнять бетонную смесь до состояния, приближенного к состоянию при непрерывном безопалубочном формовании.

### 2.3.2 Прибор для определения пластичности бетонной смеси

В соответствии с предъявленными требованиями был сконструирован (приложение Е) и изготовлен (рисунок 2.7) прибор для определения пластичности бетонной смеси.

Станина прибора изготовлена из клееной сосны и представляет из себя щит толщиной 18 мм габаритами 550х400 мм. Станина является жестким плоским основанием прибора. Поэтому каких-либо требований кроме достаточной жесткости и плоскостности к ней не предъявляется. Станина может обладать другими габаритами и толщиной и может быть изготовлена из другого материала.

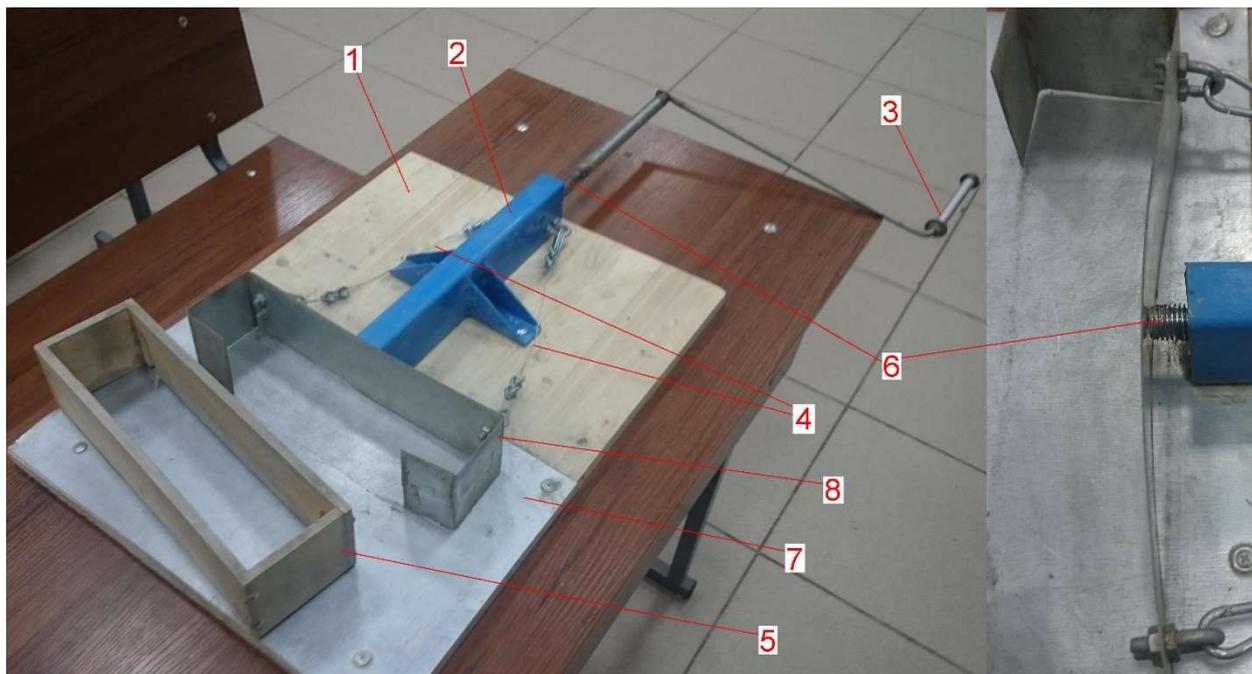


Рисунок 2.7 – Прибор для определения пластичности бетонной смеси: 1 – станина прибора; 2 – силовой элемент; 3 – вороток; 4 – стропы; 5 – съемная форма; 6 – винтовой шток; 7 – поверхность скольжения; 8 – гибкая оснастка.

Силовой элемент представляет собой стальную трубу длиной 300 мм прямоугольного сечения 30х60 мм с соосно сваренными внутри двумя гайками М10 (резьбовая ось гаек параллельна оси трубы) на равном удалении от торцов трубы (около 30 мм). Силовой элемент оснащен двумя упорами для обеспечения устойчивости и жестко связан со станиной. Возможно изготовление данной детали другой конструкции и из других материалов, при условии обеспечения связи между гибкой оснасткой и винтовым штоком, которая позволяет изгибать гибкую оснастку при вращении винтового штока.

Винтовой шток представляет собой шпильку М10 длиной 550 мм. Шпилька вкручена в гайки силового элемента. Шток выполняет функцию преобразования вращательных движений ворота в линейное перемещение торца шпильки с целью образования механического воздействия на гибкую оснастку.

Ворот является органом управления прибора. Придавая вращение вороту и регулируя скорость производится управление процессом испытания. Ворот может быть любой конструкции при условии выполнения его прямой функции.

Стропы изготовлены из стального троса диаметром 1 мм и обладают длиной 300 мм. Стропы оснащены концевыми карабинами для создания связи между гибкой оснасткой и силовым элементом.

Поверхность скольжения обеспечена за счет оцинкованного стального листа толщиной 0,8 мм и габаритами 250x400 мм жестко связанного со станиной.

Гибкая оснастка изготовлена из листовой оцинкованной стали толщиной 0,8 мм. Наружные габариты оснастки 70x70x280 мм. Данная деталь воспринимает перемещение штока средней частью, при этом установленные по краям оснастки стропы препятствуют ее перемещению. Таким образом, линейное перемещение штока преобразуется в изгибание оснастки. Оснастка выполняет функцию передачи собственных деформаций на отформованный образец и обеспечивает равномерное растяжение его наружной поверхности.

Съемная форма изготовлена из фанеры толщиной 8 мм. Внутренние габариты съемной формы соответствуют наружным габаритам гибкой оснастки. На внутренней поверхности формы располагается стальной лист размерами 70x180 мм в соответствии с формой размерами гибкой оснастки. Съемная форма надевается на гибкую оснастку, таким образом создается непрерывная стальная поверхность внутри формы. Функция данной детали заключается в обеспечении возможности укладки и уплотнения бетонной смеси внутри гибкой оснастки для формирования образца балки.

Полученный прибор обеспечивает возможность моделирования процесса растяжения бетонной смеси при ее изгибе, точного измерения прогиба образца, управления скоростью изменения прогиба образца, испытания как тяжелых, так и мелкозернистых бетонных смесей и их уплотнения. Таким образом, соблюдаются все требования, предъявляемые к прибору.

### **2.3.3 Разработка методики оценки пластических свойств бетонной смеси**

#### Допущения

С учетом особенностей полученного прибора и представлений о механизме формирования и развития трещин в свежесформованном изделии предлагаемая методика имеет следующие допущения:

- 1) Трение между образцом и поверхностью скольжения не провоцирует и не препятствует процессу трещинообразования;
- 2) Скорость изменения прогиба в пределах от  $1/280$  до  $5/280$  длины базы в секунду не влияет на величину относительного удлинения, при котором образуются трещины.

#### Равномерность растяжения бетонной смеси

Для обоснования разрабатываемой методики необходимо проверить следующую гипотезу: наружная поверхность образца деформируется равномерно по всей длине базы.

Для проверки данной гипотезы поставлен следующий эксперимент. В соответствии со схемой (рисунок 2.8) в образец было установлено 14 пикетов. Для проверки равномерности деформации штангенциркулем измерялось расстояние между пикетами в процессе испытания. Полученные данные представлены в таблице 2.2.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что на участке от 2-го пикета до 13-го бетонная смесь растягивается равномерно до образования трещин. После образования двух трещин расстояние менялось лишь между 5-

м и 6-м пикетом и между 9-м и 10-м пикетом. Именно в данных местах образовались трещины. В соответствии с полученными данными можно с уверенностью сказать, что бетонная смесь на участке формирования и образования трещин деформируется равномерно до момента образования трещин. Однако необходимо скорректировать базу, база составляет 230 мм. С учетом скорректированной базы гипотеза подтверждена.



Рисунок 2.8 – Схема расположения пикетов в образце (вид сверху)

Таблица 2.2 – Расстояния между пикетами при различных прогибах

| Прогиб, мм   | расстояние между пикетами, мм |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|--|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
|  | 1 и 2                         | 2 и 3 | 3 и 4 | 4 и 5 | 5 и 6 | 6 и 7 | 7 и 8 | 8 и 9 | 9 и 10 | 10 и 11 | 11 и 12 | 12 и 13 | 13 и 14 |
| 0  | 20                            | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    | 20     | 20      | 20      | 20      | 20      |
| 5  | 20,4                          | 20,7  | 20,7  | 20,7  | 20,7  | 20,7  | 20,7  | 20,7  | 20,7   | 20,7    | 20,7    | 20,7    | 20,4    |
| 15   | 21,2                          | 22,1  | 22,2  | 22,1  | 22,1  | 22,2  | 22,2  | 22,2  | 22,1   | 22,2    | 22,1    | 22,2    | 21,2    |
| 20   | 21,6                          | 22,9  | 22,9  | 22,8  | 22,9  | 22,9  | 22,8  | 22,9  | 22,9   | 22,9    | 22,9    | 22,8    | 21,6    |
| Образовались две трещины при прогибе 22 мм между 5-м и 6-м и между 9-м и 10-м пикетами |                               |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
| 25   | 21,8                          | 23,2  | 23,2  | 23,1  | 25,5  | 23,2  | 23,2  | 23,2  | 25,6   | 23,1    | 23,2    | 23,2    | 21,8    |

### Численная характеристика пластичности

Необходимо ввести параметр оценки пластических свойств бетонной смеси. Прогиб образца в качестве параметра не подходит, поскольку не является наглядным и показательным, а также жестко привязан к методике и

прибору. Параметр должен отражает свойство бетонной смеси независимо от методики проведения испытания и используемого оборудования.

Предлагается ввести параметр, отражающий относительные деформации растяжения необходимые для возникновения трещин. Обзор литературных источников [55, 59, 85] не позволил найти подходящего по смыслу для бетонной смеси среди существующих. Однако для оценки способности бетона деформироваться без образования трещин используется характеристика «предельная растяжимость бетона». Таким образом, предлагается ввести параметр «предельная растяжимость бетонной смеси» для оценки относительных деформаций растяжения бетонной смеси, при которых возникают трещины. Предельную растяжимость бетонной смеси предлагается измерять в мм/м. Даная величина показывает, насколько миллиметров надо равномерно линейно растянуть бетонную смесь изначальной длиной 1 м для образования трещин.

Предлагается ввести следующее определение данного показателя:

**Предельная растяжимость бетонной смеси ( $\epsilon^{\text{пр}}$  в мм/м)** – это то относительное удлинение бетонной смеси, при котором происходит разрыв ее сплошности.

Однако предложенная схема испытания предполагает в качестве измеряемой величины критический прогиб образца (тот прогиб, при котором образовались трещины), а значит необходимо разработать модель по преобразованию измеренного критического прогиба в предельную растяжимость.

Для этого решим упрощенную задачу (рисунок 2.9).

В представленной задаче известны следующие величины:  $AB = 280$  мм – размер внутренней стороны гибкой оснастки,  $AB = \text{const}$  на протяжении всего испытания (изменяется форма, но длина постоянна);  $BC = DA = 70$  мм – размер боковой стороны гибкой оснастки, также постоянен на протяжении всего испытания (как размер, так и форма);  $D'D = C'C = 25$  мм =  $\text{const}$  – зона, в которой бетонная смесь не деформируется;  $L = 230$  мм – база испытания,

определенная ранее;  $L' = 280$  мм – длина отрезка  $DC$  до начала испытания.

Величина  $h^{кр}$  является аргументом. Необходимо выразить  $\varepsilon^{пр}$  в мм/м через  $h^{кр}$  (критический прогиб) в мм.

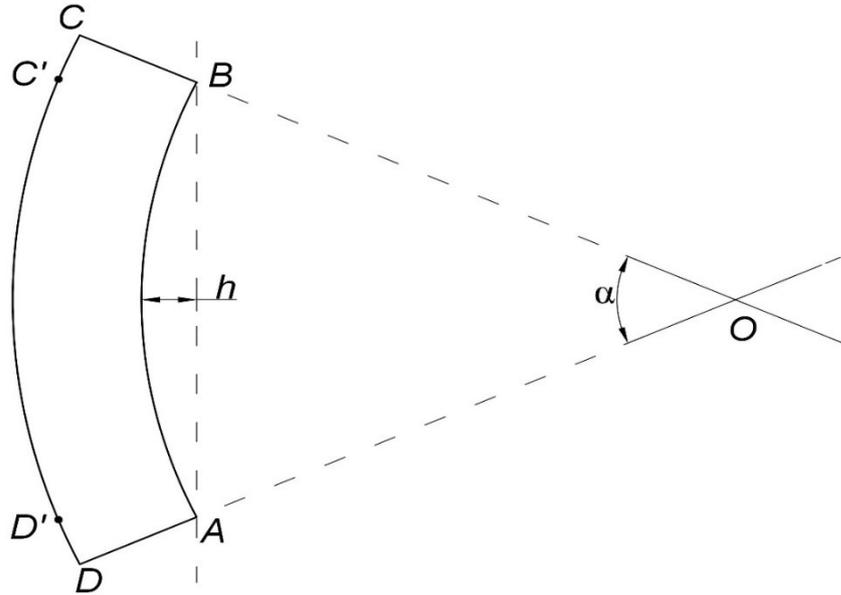


Рисунок 2.9 – Схема к задаче пересчета критического прогиба в предельную растяжимость

Решение:

$$\varepsilon^{пр} = \frac{D'C' - L}{L} \cdot 1000 \quad (2.1)$$

$$D'C' = DC - (L' - L) \quad (2.2)$$

$$DC = \frac{\pi \cdot R^{OC} \cdot \alpha^\circ}{180^\circ} \quad (2.3)$$

$$R^{OC} = R^{OB} + BC \quad (2.4)$$

$$R^{OB} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ} \quad (2.5)$$

$$h^{кр} = R^{OB} \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha^\circ}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$h^{кр} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ} \cdot (1 - \cos \frac{\alpha^\circ}{2}) \quad (2.7)$$

Полученное уравнение 2.7 является трансцендентным, то есть аналитически выразить угол через величину прогиба невозможно, а значит невозможно аналитически выразить  $\varepsilon^{пр}$  через  $h^{кр}$ . Поэтому решим данное уравнение с помощью одного из приближенных численных методов. Разложим косинус угла в ряд Тейлора с двумя членами и получим уравнение 2.8.

$$\cos \frac{\alpha^\circ}{2} \approx 1 - \frac{(\frac{\alpha_{рад}}{2})^2}{2} + \frac{(\frac{\alpha_{рад}}{2})^4}{24} \quad (2.8)$$

Следует отметить, что угол в уравнении 2.8 до знака приближенного равенства измеряется в градусах, а после в радианах. Поэтому, при подстановке уравнения 2.8 в уравнение 2.7 угол в знаменателе переведем в радианы.

$$h^{кр} = \frac{AB}{\alpha_{рад}} \cdot (1 - (1 - \frac{(\frac{\alpha_{рад}}{2})^2}{2} + \frac{(\frac{\alpha_{рад}}{2})^4}{24})) \quad (2.9)$$

В полученном уравнении выражать  $\alpha$  через  $h^{кр}$  нецелесообразно. Найдем  $\alpha$  при известном  $h^{кр}$ . Зададимся величиной  $h^{кр}$ . Пусть  $h^{кр} = 20$  мм. Тогда решив уравнение 2.9,  $\alpha = 0,5754$  рад. Продолжим решать задачу. Переведем  $\alpha$  из радиан в градусы:

$$\alpha^\circ = \frac{180^\circ \cdot \alpha_{рад}}{\pi} = \frac{180^\circ \cdot 0,5754_{рад}}{\pi} = 32,97^\circ \quad (2.9)$$

Далее решим уравнения 2.1 – 2.5 в обратном порядке:

$$R^{об} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ} = \frac{280\text{мм} \cdot 180^\circ}{\pi \cdot 32,9^\circ} = 486,62\text{мм} \quad (2.10)$$

$$R^{OC} = R^{OB} + BC = 486,62\text{мм} + 70\text{мм} = 556,62\text{мм} \quad (2.11)$$

$$DC = \frac{\pi \cdot R^{OC} \cdot \alpha^\circ}{180^\circ} = \frac{\pi \cdot 556,62\text{мм} \cdot 32,97^\circ}{180^\circ} = 320,28\text{мм} \quad (2.12)$$

$$D'C' = DC - (L' - L) = 320,28\text{мм} - (280\text{мм} - 230\text{мм}) = 270, \quad (2.13)$$

$$\varepsilon^{\text{пр}} = \frac{D'C' - L}{L} \cdot 1000\text{мм} = \frac{270,28\text{мм} - 230\text{мм}}{230\text{мм}} \cdot 1000\text{мм} = 175,12 \frac{\text{мм}}{\text{м}} \quad (2.14)$$

Таким образом, получена величина относительного удлинения при  $h^{\text{кр}} = 20$  мм. Рассчитаем таким же образом  $\varepsilon^{\text{пр}}$  для  $h^{\text{кр}} = 1 \dots 33$  мм с шагом 1 мм и полученные данные занесем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – соответствие  $\varepsilon^{\text{пр}}$  и  $h^{\text{кр}}$

| $h^{\text{кр}}$ , мм | $\varepsilon^{\text{пр}}$ , мм/м | $h^{\text{кр}}$ , мм | $\varepsilon^{\text{пр}}$ , мм/м | $h^{\text{кр}}$ , мм | $\varepsilon^{\text{пр}}$ , мм/м |
|----------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1                    | 9                                | 12                   | 105                              | 23                   | 202                              |
| 2                    | 17                               | 13                   | 113                              | 24                   | 211                              |
| 3                    | 26                               | 14                   | 122                              | 25                   | 220                              |
| 4                    | 35                               | 15                   | 131                              | 26                   | 229                              |
| 5                    | 43                               | 16                   | 140                              | 27                   | 238                              |
| 6                    | 52                               | 17                   | 149                              | 28                   | 247                              |
| 7                    | 61                               | 18                   | 157                              | 29                   | 256                              |
| 8                    | 70                               | 19                   | 166                              | 30                   | 265                              |
| 9                    | 78                               | 20                   | 175                              | 31                   | 274                              |
| 10                   | 87                               | 21                   | 184                              | 32                   | 283                              |
| 11                   | 96                               | 22                   | 193                              | 33                   | 293                              |

Полученная таблица позволяет перевести критический прогиб образца в предельную растяжимость бетонной смеси.

Методика проведения испытания:

1) Подготовка прибора к испытанию: гибкая оснастка устанавливается на поверхность скольжения и закрепляется при помощи строп к силовому элементу прибора; на гибкую оснастку надевается съемная форма и выставляется на поверхности скольжения таким образом, чтобы ось винтового штока проходила через центр внутренней и наружной поверхности формы; поверхность скольжения, а также внутренняя поверхность гибкой оснастки и съемной формы увлажняются водой;

2) В съемную форму подготовленного прибора укладывается испытываемая бетонная смесь в три слоя. Каждый слой штыкуется 20 раз. После укладки и уплотнения смеси верхняя поверхность заглаживается и выравнивается по уровню со съемной формой мастерком. Интенсивными ударами (15 ударов) штыковкой по верхним торцам стенок съемной формы создается механическое воздействие, схожее с вибрационным;

3) Аккуратно и плавно съемная форма снимается движением вверх, при этом гибкая оснастка придерживается;

4) Осуществляется визуальная проверка отформованного образца. В случае наличия дефектов предыдущие операции производятся заново;

5) Движением воротка по часовой стрелке шток приводится в касание с гибкой оснасткой;

6) Испытание: вращением воротка по часовой стрелке шток приводится в движение и провоцируется изгибание гибкой оснастки и образца с постоянной скоростью изменения прогиба от 1 до 5 мм/с, при этом осуществляется визуальный контроль наружной поверхности образца; вращение воротка прекращается в тот момент, когда на наружной поверхности образца образовалась трещина и раскрылась примерно на 1 мм;

7) Если трещина образовалась на удалении более чем 85 мм от середины наружной поверхности, результат испытания считается недействительным;

8) Фиксируется прогиб образца в мм. Полученное значение критического прогиба по таблице 2.7 переводится в соответствующие ему значение предельной растяжимости бетонной смеси в мм/м;

9) Завершение испытания: гибкая оснастка снимается с образца; бетонная смесь удаляется с поверхности скольжения; все детали прибора очищаются от бетонной смеси и цементного теста.

Полученная методика испытания позволяет проводить численную оценку пластических свойства бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании.

## Выводы по второй главе

- 1) Одним из важнейших свойств бетонной смеси при непрерывном безопалубочном формовании является ее пластичность, которая отвечает за процесс трещинообразования при деформировании свежеотформованного изделия;
- 2) Процесс образования и раскрытия трещин в свежеотформованном изделии сводится к разрыву сплошности при достижении предельного удлинения цементного теста при деформировании бетонной смеси под действием механических нагрузок;
- 3) Для оценки пластичности бетонной смеси следует использовать введенный параметр: **предельная растяжимость бетонной смеси ( $\varepsilon^{пр}$  в мм/м)** – то относительное удлинение бетонной смеси, при котором нарушается ее сплошность;
- 4) Для определения предельной растяжимости бетонной смеси ее следует равномерно растягивать путем изгибания, для чего разработаны метод, прибор и методика проведения испытания.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

#### 3.1 Исходные материалы и методы испытаний

##### 3.1.1 Портландцементы

В исследованиях применялись бездобавочные цементы из таблицы 3.1, характеристики которых определялись в соответствии с действующими стандартами [5 – 10].

Таблица 3.1 – используемые в исследовании цементы

| Показатель   | Маркировка цемента |      |      |      |      |
|--|--------------------|------|------|------|------|
|  | Ц 1                | Ц 2  | Ц 3  | Ц 4  | Ц 5  |
| Нормальная густота, %                              | 25,4               | 28   | 28   | 28   | 30   |
| Удельная поверхность по Блейну, м <sup>2</sup> /кг | 390                | 281  | 338  | 377  | 320  |
| Средняя активность возрасте 2 суток, МПа           | 23,9               | 20,5 | 21,3 | 22,4 | 23,1 |
| Средняя активность возрасте 28 суток, МПа          | 52,4               | 53,1 | 53,8 | 54,2 | 52,8 |

##### 3.1.2 Мелкие заполнители

В исследования в качестве мелкого заполнителя использовались карьерные пески нормального гранулометрического состава (таблица 3.2, рисунок 3.1), основные характеристики которых определялись в соответствии с действующими стандартами [14, 15], водопотребность определялись по методике предложенной Ю. М. Баженовым и Б. Г. Скрамтаевым [55].

Таблица 3.2 – характеристики используемых в исследовании песков

| Показатель                            | Маркировка песка |      |      |
|---------------------------------------|------------------|------|------|
|                                       | П 1              | П 2  | П 3  |
| Модуль крупности                      | 2,7              | 2,4  | 2,1  |
| Водопотребность, %                    | 4,5              | 5,9  | 6,5  |
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> | 1548             | 1622 | 1554 |
| Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>    | 2651             | 2642 | 2674 |

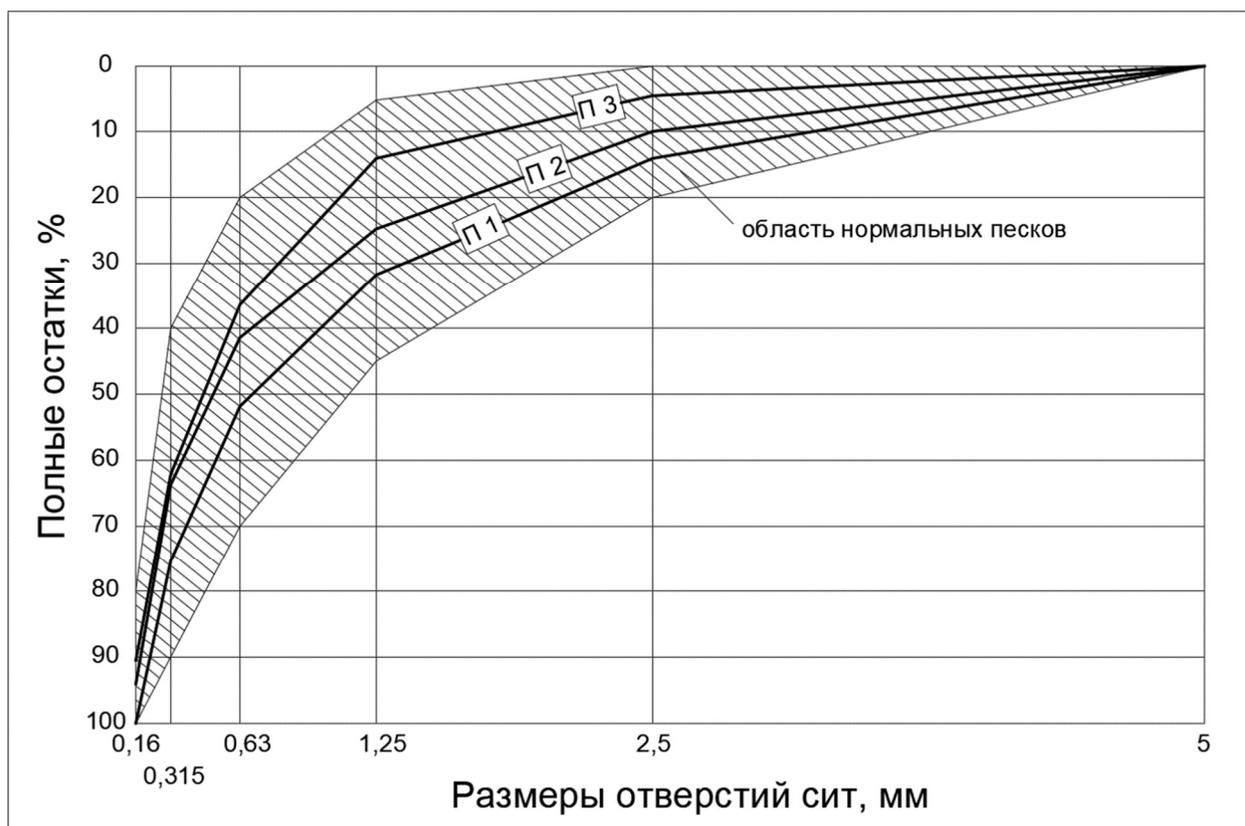


Рисунок 3.1 – кривые рассева используемых в исследовании песков

### 3.1.3 Пластифицирующие добавки

В исследования использовались пластифицирующие бетонную смесь добавки на основе поликарбоксилат эфиров, доступные на рынке Санкт-Петербурга (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – используемые в исследовании пластифицирующие добавки

| Маркировка пластификатора             | Пл 1                | Пл 2               | Пл 3   |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|--|
| Торговое наименование                 | MC-POWERFLOW - 1102 | Макромер П-163     | Макромер П-163, модифицированный углеродно-фуллеройдным наноматериалом |
| Страна изготовитель химической основы | Германия            | РФ                 | РФ   |
| Тип добавки                           | суперпластификатор  | суперпластификатор | суперпластификатор   |

### 3.1.4 Методы испытаний

В данном исследовании использовались следующие стандартные методы испытаний:

1) Основные характеристики цемента (прочность на сжатие в возрасте 2 суток; прочность на растяжение при изгибе в возрасте 2 суток; сроки схватывания; водоотделение; удельная поверхность; нормальная плотность цементного теста; прочность на сжатие в возрасте 28 суток, прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток) по [5 - 10];

2) Основные характеристики песка (гранулометрический состав; модуль крупности; удельная поверхность; плотность насыпная; плотность зерен; пустотность; содержание пылевых и глинистых частиц) по [14, 15];

3) Основные характеристики щебня (плотность насыпная; плотность зерен; пустотность; дробимость; марка по дробимости; содержание пылевых и глинистых частиц; содержание зерен пластинчатой и игловатой формы; группа по содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы) по [12, 13];

4) Основные физико-механические характеристики тяжелого бетона (плотность, прочность на сжатие в возрасте 28 суток) по [1, 3, 4];

5) Основные физико-механические характеристики мелкозернистого бетона (плотность, прочность на сжатие в возрасте 28 суток, прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток) по [1, 3, 4];

6) Технологические характеристики тяжелых бетонных смесей (плотность, осадка конуса, марка по подвижности, жесткость, марка по жесткости) по [2];

7) Технологические характеристики мелкозернистой бетонной смеси (плотность, погружение конуса) по [2, 9];

8) Пластические свойства бетонной смеси по пункту 2.3 диссертации.

### 3.2 Влияние различных факторов на пластичность цементного теста

Как говорилось ранее, нет сомнений, что наличие вязко-пластичных свойств у бетонной смеси обусловлено наличием таковых у цементного теста. Поскольку пластические свойства бетонных смесей совершенно не изучены, данное исследование следует начать с изучения пластичности цементного теста.

Исходя из общепринятых представлений о структуре и свойствах цементного теста (ЦТ), на его реологические свойства влияют главным образом следующие факторы: тонкость помола цемента, минеральный состав цемента, водоцементное отношение (В/Ц).

Тонкость помола цемента принято характеризовать его удельной поверхностью ( $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/кг), изменять которую возможно в широких пределах при совместном помоле портландцементного клинкера и гипса. Сегодня распространено мнение, что удельная поверхность цемента во многом определяет реологические свойства ЦТ и скорость набора прочности цементного камня, однако исследования [112] показали, что при ее изменении от 281 м<sup>2</sup>/кг до 377 м<sup>2</sup>/кг, нормальная плотность (НГ, %) остается неизменной. Можно сказать, что изменение тонкости помола цемента в указанных пределах не влияет на вязкость цементного теста, однако может повлиять на пластичность. Для проверки этого фактора было осуществлено производство трех проб цемента (Ц 2, Ц 3, Ц 4) с одинаковым минеральным составом, но различной удельной поверхностью.

Исследования [112] показали, что НГ цемента главным образом зависит от его минерального состава и от различных добавок, вводимых при его помоле. Таким образом, изучать влияние минерального состава цемента на пластичность не требуется, достаточно использовать в исследовании цементы с различной НГ.

Уже давно известно, что изменение количества жидкости затворения оказывает определяющее влияние на реологию цементного теста в целом, так

как приводит к качественному и количественному изменению поверхностей скольжения между зёрнами цемента, а также приводит к изменению раздвижки зёрен цемента в тесте, что в свою очередь может оказать влияние и на пластические свойства.

Для изучения влияния перечисленных факторов на пластические свойства цементного теста было приготовлены и испытаны составы ЦТ из 5-ти различных цементов при трех различных В/Ц (в том числе при В/Ц = НГ). Полученные данные представлены в таблице 3.4 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний цементного теста

| № состава<br>ЦТ | Цемент     |                  |                               | В/Ц, % | В/Ц –<br>НГ, % | $\varepsilon^{пр}$ , мм/м |
|-----------------|------------|------------------|-------------------------------|--------|----------------|---------------------------|
|                 | маркировка | НГ<br>цемента, % | $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг |        |                |                           |
| 3.1             | Ц 1        | 25,4             | 390                           | 21     | – 4,4          | 314                       |
| 3.2             |            |                  |                               | 25,4   | 0              | 365                       |
| 3.3             |            |                  |                               | 31     | 5,6            | 430                       |
| 3.4             | Ц 2        | 28               | 281                           | 21     | – 4,4          | 277                       |
| 3.5             |            |                  |                               | 28     | 0              | 359                       |
| 3.6             |            |                  |                               | 31     | 3              | 394                       |
| 3.7             | Ц 3        | 28               | 338                           | 25     | – 4,4          | 320                       |
| 3.8             |            |                  |                               | 28     | 0              | 355                       |
| 3.9             |            |                  |                               | 33     | 5              | 413                       |
| 3.10            | Ц 4        | 28               | 377                           | 23     | – 4,4          | 291                       |
| 3.11            |            |                  |                               | 29     | 1              | 361                       |
| 3.12            |            |                  |                               | 34     | 6              | 420                       |
| 3.13            | Ц 5        | 30               | 320                           | 23     | – 4,4          | 288                       |
| 3.14            |            |                  |                               | 30     | 0              | 370                       |
| 3.15            |            |                  |                               | 33     | 3              | 405                       |

Анализ полученных результатов позволяет установить следующие:

- 1) С увеличением В/Ц предельная растяжимость цементного теста линейно возрастает с угловым коэффициентом 11,7 вне зависимости от удельной поверхности цемента и от НГ;
- 2) Удельная поверхность цемента не оказывает заметного влияние на пластичность цементного теста, что хорошо видно на примере составов с использованием цементов Ц 2, Ц 3 и Ц 4;

3) Отклонение экспериментальных значений предельной растяжимости цементного теста от общей аппроксимирующей линии составляет  $\pm 10\%$ ;

4) Цементное тесто нормальной плотности обладает предельной растяжимостью  $360 \text{ мм/м} \pm 3\%$ , вне зависимости от свойств цемента.

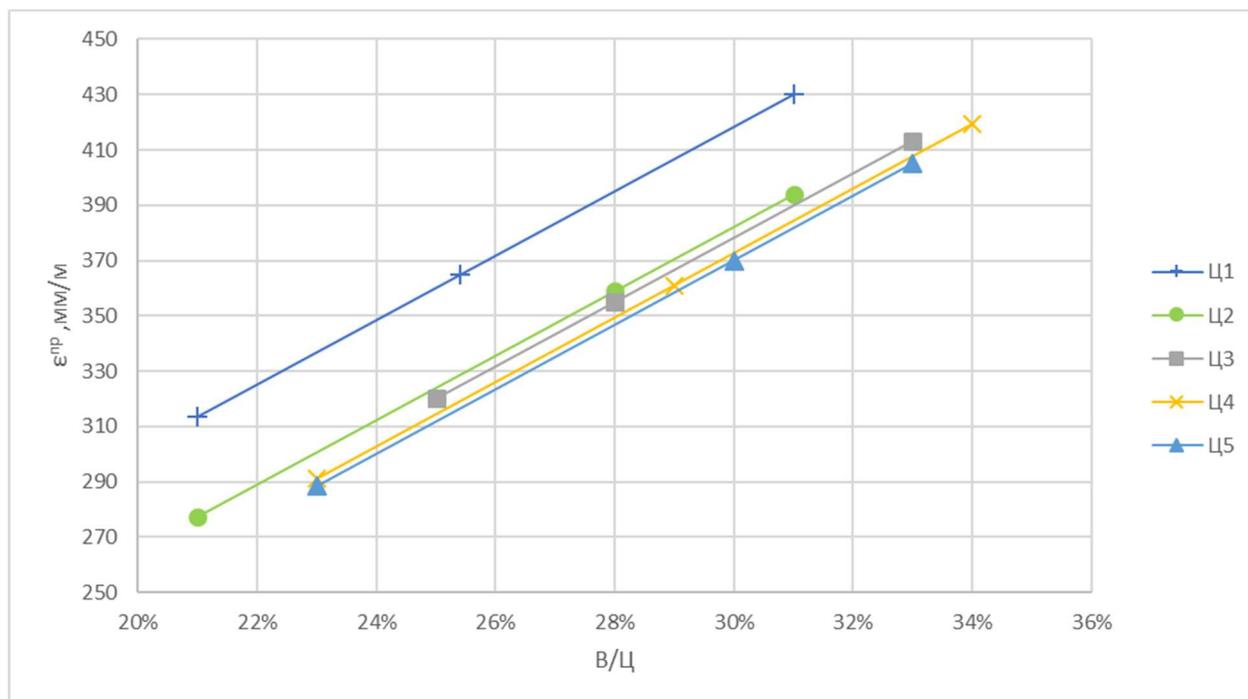


Рисунок 3.2 – Предельная растяжимость ЦТ в зависимости от В/Ц.

Так как цементное тесто нормальной плотности обладает постоянным значением предельной растяжимости, а линейный закон увеличения предельной растяжимости при увеличении В/Ц одинаково справедлив для всех испытанных цементов, следует предположить, что пластичность ЦТ зависит от относительного содержания воды в нем. Содержание воды в ЦТ относительно водопотребности цемента можно выразить разницей между В/Ц и НГ. В таком случае полученные данные можно представить в виде зависимости предельной растяжимости цементного теста от В/Ц – НГ (рисунок 3.2).

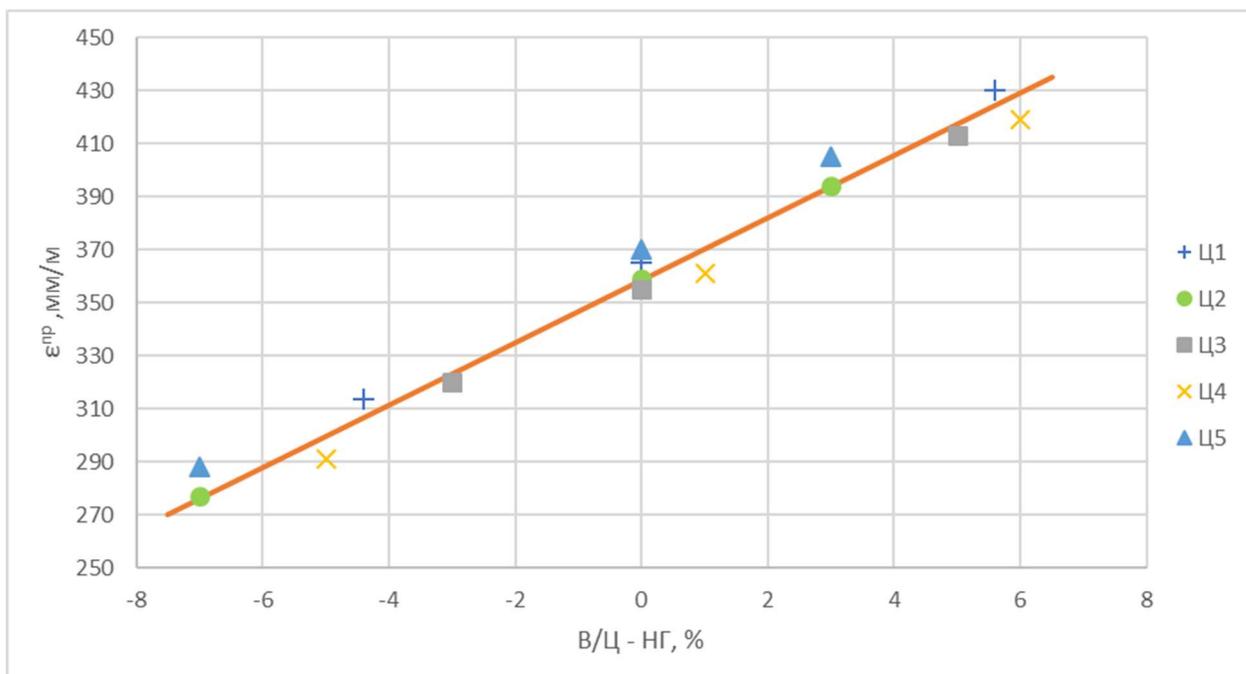


Рисунок 3.3 – Предельная растяжимость ЦТ в зависимости от В/Ц – НГ.

Данные, представленные на рисунке 3.3, позволяют заключить, что пластичность цементного теста главным образом зависит от разницы между фактическим водоцементным отношением и нормальной плотностью цемента. Так как результаты получены с использованием цементов, существенно отличающихся по своим свойствам друг от друга, а отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующей линии оставляет не более 3%, можно говорить об успешном выявлении определяющего фактора влияющего на пластичность цементного теста.

### 3.3 Влияние заполнителя на пластичность бетонной смеси

Хорошо известно, что заполнитель оказывает значительное влияние на реологию бетонной смеси в целом [38, 41 – 47, 55, 59, 63, 85, 87]. Понимая природу пластических свойств бетонной смеси, которая заключается в бездефектном деформировании цементного теста с изменением взаимного расположения зерен заполнителя, можно предположить, что введение заполнителя в ЦТ будет приводить к снижению предельной растяжимости.

Это связано в первую очередь с тем, что твердый наполнитель при деформировании бетонной смеси не подвергается растяжению или сжатию, а значит его зерна с точки зрения пластичности бетонной смеси можно рассматривать как отошающий компонент.

Для проверки данной гипотезы был проведен эксперимент, в котором в цементное тесто нормальной густоты (Ц 1) вводились с постепенным увеличением расхода песка различной гранулометрии (П 1, П 2, П 3), при этом отслеживалась объемная концентрация песка в бетонной смеси и ее предельная растяжимость. Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.4.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний бетонных смесей с различной концентрацией наполнителя

| № состава б/с | Используемый песок | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      | ε <sup>пр</sup> , мм/м |
|---------------|--------------------|---|-------|------|------------------------|
|               |                    | цемент                                      | песок | вода |                        |
| 3.1           | П 1                | 1376  | 275   | 349  | 355                    |
| 3.2           |                    | 1117  | 670   | 284  | 331                    |
| 3.3           |                    | 1037  | 830   | 263  | 324                    |
| 3.4           |                    | 896   | 1076  | 228  | 298                    |
| 3.5           |                    | 848   | 1187  | 215  | 234                    |
| 3.6           |                    | 753   | 1356  | 191  | 96                     |
| 3.7           |                    | 722   | 1444  | 183  | 52                     |
| 3.8           | П 2                | 1233  | 493   | 313  | 342                    |
| 3.9           |                    | 1149  | 689   | 292  | 318                    |
| 3.10          |                    | 963   | 963   | 245  | 283                    |
| 3.11          |                    | 896   | 1076  | 228  | 274                    |
| 3.12          |                    | 788   | 1261  | 200  | 152                    |
| 3.13          |                    | 753   | 1356  | 191  | 67                     |
| 3.14          | П 3                | 1376  | 275   | 349  | 343                    |
| 3.15          |                    | 1233  | 493   | 313  | 324                    |
| 3.16          |                    | 1037  | 830   | 263  | 293                    |
| 3.17          |                    | 963   | 963   | 245  | 274                    |
| 3.18          |                    | 848   | 1187  | 215  | 193                    |
| 3.19          |                    | 788   | 1261  | 200  | 140                    |
| 3.20          |                    | 722   | 1444  | 183  | 9                      |

Полученные экспериментальные значения подтверждают гипотезу о влиянии наполнителя на пластичность бетонной смеси. Однако, анализ

результатов показал, что в зависимости от объемной концентрации заполнителя в смеси зависит и уровень ее влияния на предельную растяжимость. Так при увеличении концентрации заполнителя от 0 % до 41 % по объему наблюдается линейное снижение предельной растяжимости с угловым коэффициентом  $-1,88$ , а при увеличении концентрации от 41 % до 58 % предельная растяжимость снижается с угловым коэффициентом  $-20,7$ .

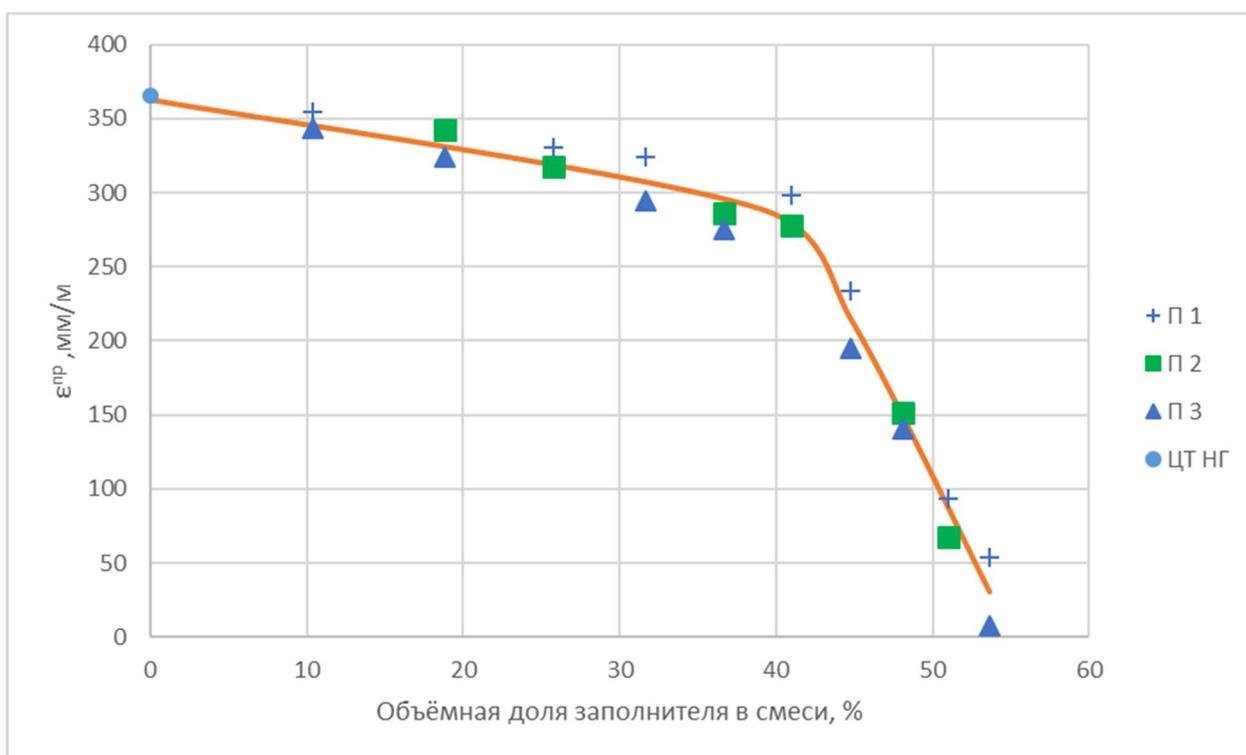


Рисунок 3.4 – Экспериментальные значения предельной растяжимости при различной концентрации заполнителя в бетонной смеси

Такое различие угловых коэффициентов говорит о различных механизмах влияния заполнителя на предельную растяжимость бетонной смеси. Следует предположить, что с введением заполнителя в смесь происходит не только отощение пластичного компонента (ЦТ), но и меняется пластичность самого цементного теста. Связанно это может быть с водопотребностью заполнителя: зерна заполнителя сорбируют воду, снижая таким образом реальное количество воды, находящейся в цементном тесте. Как установлено ранее, при снижении В/Ц снижается и предельная растяжимость цементного теста.

Данную гипотезу можно проверить расчетным путем, для этого представленные на рисунке 3.3 экспериментальные точки необходимо переместить с учетом изменившегося **истинного водоцементного отношения ( $V/C_{ист}$ , %)** – отношения оставшейся в ЦТ воды после сорбции заполнителем к расходу цемента. Для осуществления данного расчета необходимо знать водопотребность заполнителя, которая определялась в соответствии с пунктом 2.1.2 диссертации и угловой коэффициент линейной зависимости предельной растяжимости от  $V/C$ , которой определен в пункте 3.1 диссертации и составляет 11,7.

По мере введения заполнителя в смесь снижается  $V/C_{ист}$ , на величину определяемую расчетным путем исходя из расхода и водопотребности заполнителя. Зная угловой коэффициент зависимости пластичности ЦТ от  $V/C$ , который равен 11,7, определяется величина падения предельной растяжимости за счет сорбции воды заполнителем. Посчитав для каждого состава эту величину и прибавив ее к экспериментальному значению получены точки, представленные на рисунке 3.5.

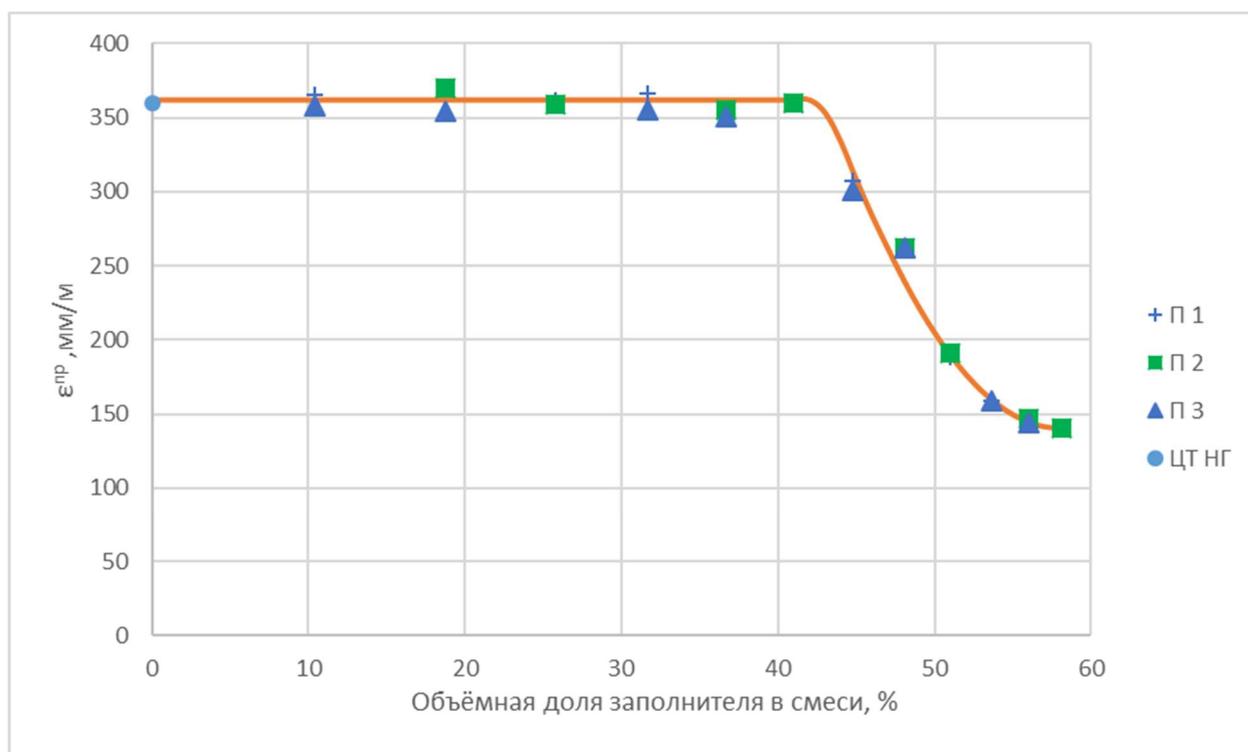


Рисунок 3.5 – Расчетные значения предельной растяжимости бетонной смеси при различной концентрации заполнителя и постоянном  $V/C_{ист}$  равным нормальной густоте цемента

Анализируя полученные значения, можно заключить, что при введении в смесь заполнителя и поддержании постоянного значения истинного водоцементного отношения пластичность смеси будет меняться только при достижении значения объемной концентрации заполнителя в 41 %. Есть два возможных объяснения этому явлению.

1) При концентрации ниже 41 %, заполнителя недостаточно, чтобы существенно отощить пластичный компонент (ЦТ), что не приводит к изменению предельной растяжимости бетонной смеси. А при увеличении концентрации свыше 41 % наблюдается устойчивое снижение предельной растяжимости бетонной смеси;

2) При превышении концентрации заполнителя 41 % большая часть цементного теста находится в непосредственном контакте с зернами заполнителя (в контактных зонах) и взаимодействует с ними, что приводит к образованию цементного теста и впоследствии цементного камня нового качества.

Следует отметить, что без поправки на изменение  $V/C_{ист}$  (рисунок 3.3) отклонение экспериментальных значений предельной растяжимости от аппроксимирующей линии достигает 10 %, в то время как отклонение значений предельной растяжимости полученных с поправкой на  $V/C_{ист}$  от аппроксимирующей линии составляет не более 2,5 %. Такое снижение отклонения, а также появления горизонтального участка зависимости на рисунке 3.4 говорят о необходимости учитывать водопотребность заполнителя через параметр  $V/C_{ист}$ .

Представленные данные не позволяют получить полного представления о влиянии заполнителя на пластические свойства бетонной смеси, так как составы, используемые на практике, находятся в зоне объемных концентрации заполнителя от 48 % и выше. В данную область попадает лишь 7 экспериментальных значений, а значит необходимо провести дополнительные эксперименты. Помимо этого, концентрация заполнителя в области

рациональных составов строго связана с концентрацией цементного теста, а поскольку именно ЦТ обеспечивает пластические свойства бетонной смеси, то выражать их следует именно через концентрацию ЦТ.

### 3.4 Влияние объемной доли цементного теста на пластичность бетонной смеси

Для уточнения зависимости предельной растяжимости бетонной смеси от объемной доли ЦТ в зоне рациональных составов были приготовлены и испытаны составы бетонной смеси с различным водоцементным отношением (В/Ц = 35 %; 40 %; 50 %). Полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.6 и на рисунке 3.6.

Таблица 3.6 – Предельная растяжимость бетонной смеси в зависимости от объемной доли цементного теста

| № состава б/с | Используемые материалы | Расход материалов на м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг |       |      | ε <sup>пр</sup> , мм/м |
|---------------|------------------------|--|-------|------|------------------------|
|               |                        | цемент   | песок | вода |                        |
| 3.21          | Ц 1<br>П 1             | 672  | 1343  | 235  | 193                    |
| 3.22          |                        | 570  | 1400  | 200  | 122                    |
| 3.23          |                        | 485  | 1454  | 170  | 70                     |
| 3.24          |                        | 430  | 1505  | 150  | 17                     |
| 3.25          |                        | 673  | 1346  | 269  | 238                    |
| 3.26          |                        | 573  | 1395  | 229  | 184                    |
| 3.27          |                        | 487  | 1462  | 195  | 117                    |
| 3.28          |                        | 433  | 1514  | 173  | 70                     |
| 3.29          |                        | 664  | 1329  | 332  | 373                    |
| 3.30          |                        | 574  | 1390  | 287  | 308                    |
| 3.31          |                        | 484  | 1453  | 242  | 238                    |
| 3.32          |                        | 431  | 1509  | 216  | 184                    |

Полученные данные позволяют сделать вывод, что независимо от водоцементного отношения с увеличением объемной доли цементного теста предельная растяжимость бетонной смеси возрастает по линейному закону с угловым коэффициентом  $\approx 28,1$ . Следует отметить, что при увеличении концентрации ЦТ в смеси с сохранением В/Ц постоянным, будет происходить

изменение  $V/C_{ист}$ , что связано с изменением расхода заполнителя. Как установлено ранее, именно  $V/C_{ист}$  оказывает влияние на пластичность цементного теста, а значит для определения влияния объемной доли ЦТ, необходимо привести все полученные экспериментальные значения к постоянному истинному водоцементному отношению. Для чего расчетным путем была произведена корректировка экспериментальных значений предельной растяжимости (рисунок 3.7).

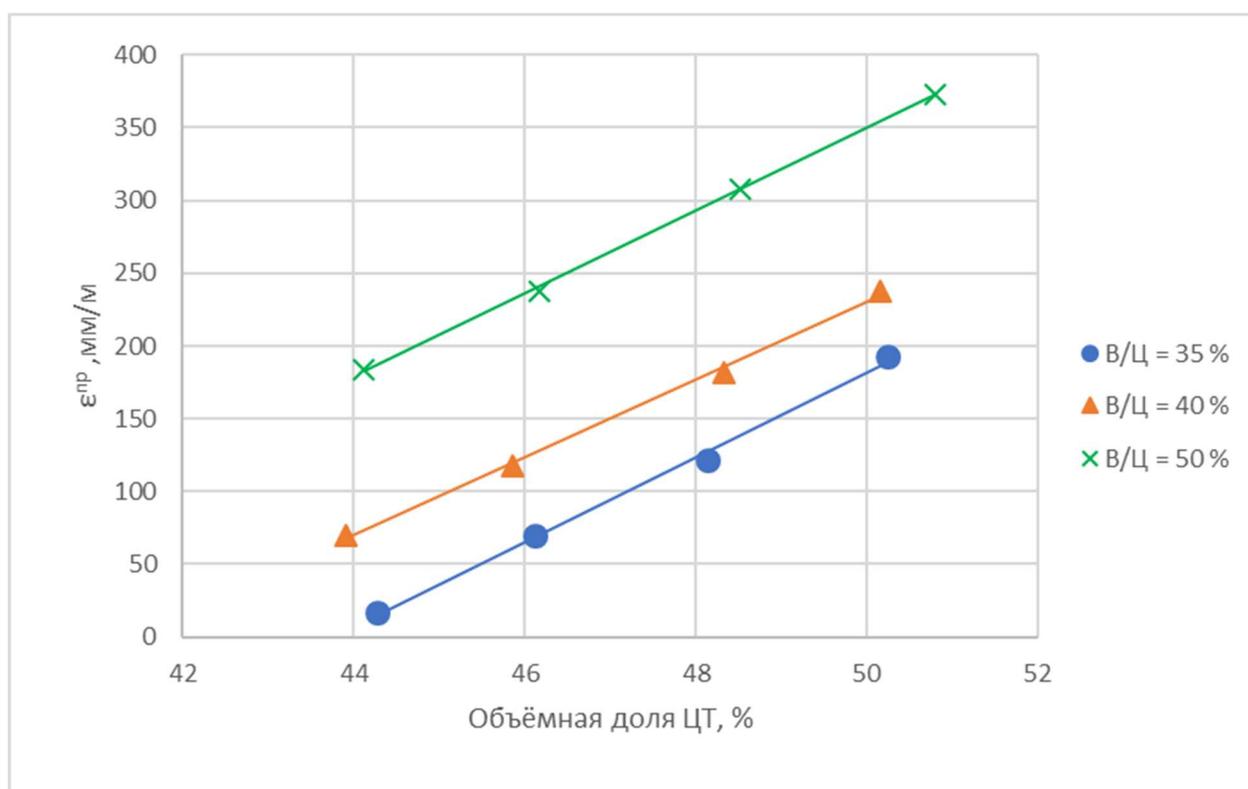


Рисунок 3.6 – Экспериментальные значения предельной растяжимости бетонной смеси при различной концентрации ЦТ в смеси и различном В/Ц

С учетом поправки на изменение  $V/C_{ист}$  предельная растяжимость бетонной смеси возрастает с увеличением объемной доли цементного теста нелинейно по зависимости, представленной уравнением 3.1.

$$\epsilon^{пр} = 0,032 \cdot (\varphi^{цт} - 37)^3 + 137 \quad (\text{при } V/C_{ист} - НГ = 0); \quad (3.1)$$

где:  $\varphi^{цт}$  – объемная доля цементного теста в смеси в %.

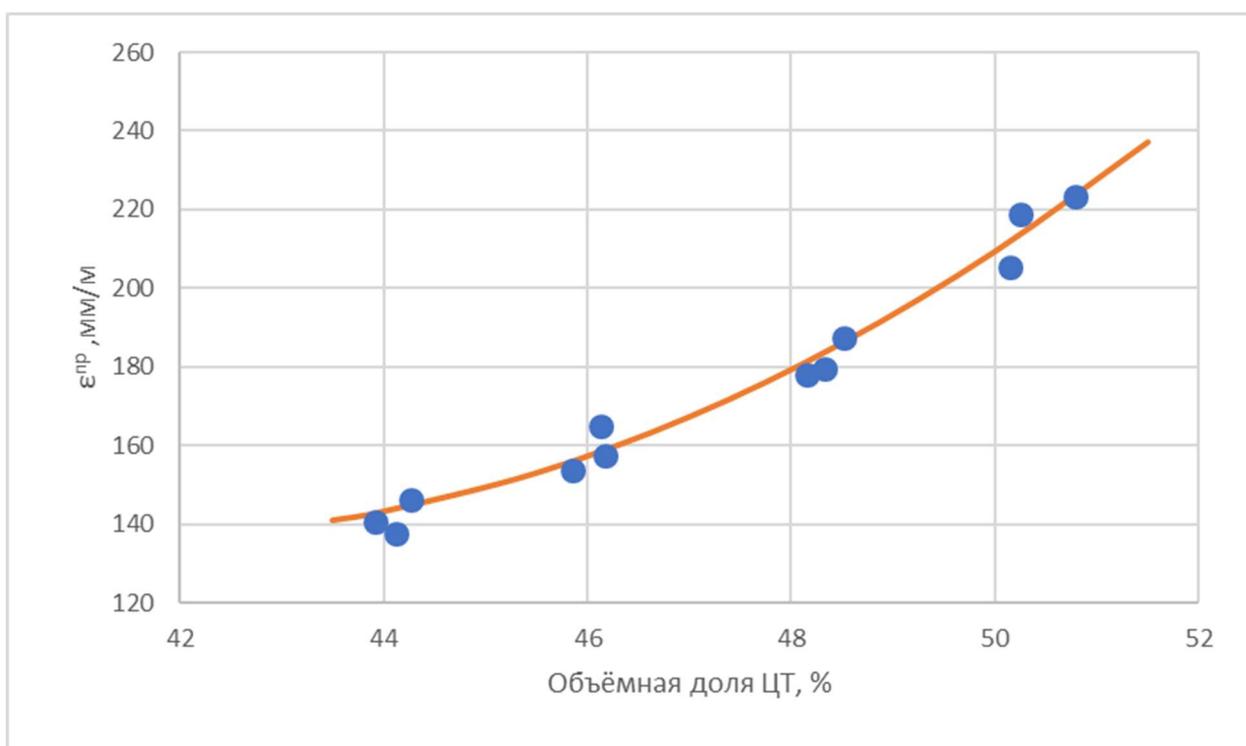


Рисунок 3.7 – Предельная растяжимость бетонной смеси в зависимости от объемной доли ЦТ при  $V/C_{ист} = НГ$

### 3.5 Влияние пластифицирующей добавки на пластичность бетонной смеси

Несмотря на то, что слово «пластификатор» содержит в себе корень «пласт», что отсылает к свойству пластичность, необходимо учитывать устоявшуюся терминологическую неточность. Слово пластификатор происходит от английского «*plasticizer*», и означает улучшающий *plasticity*, что в свою очередь имеет два варианта перевода: пластичность; подвижность. В начале прошлого столетия американский профессор *Duff A. Abrams* предложил оценивать удобоукладываемость бетонной смеси по осадке конуса (конус Абрамса) и назвал свойство бетонной смеси выявляемое таким испытанием – «*plasticity*» (пластичность), что является терминологической неточностью, так как сейчас уже хорошо известно, что осадка конуса зависит главным образом от вязкости смеси [28]. Сегодня на территории русскоязычных стран эта неточность устранена введением термина «подвижность», однако в англоязычных странах этого не произошло. Таким

образом слово «*plasticizer*» в технологии бетона корректно переводить как «добавка улучшающая подвижность». Влияние же пластификаторов на пластические свойства бетонных смесей ранее не изучалось. [52, 53, 56, 58, 60, 76, 84, 101, 108]

Для выявления степени и характера влияния пластификаторов на предельную растяжимость бетонной смеси был проведен следующий эксперимент. В контрольный состав (состав № 3.33) вводились различные пластификаторы доступные на рынке Санкт-Петербурга на основе поликарбоксилатэфиров (Пл 1, Пл 2, Пл 3) с расходом 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 % от массы цемента. Для каждого полученного состава определялась предельная растяжимость бетонной смеси, полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.7 и на рисунке 3.8.

Таблица 3.7 – Влияние пластификатора на предельную растяжимость бетонной смеси

| № состава б/с | Используемые материалы | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      |                 | ε <sup>пр</sup> , мм/м |
|---------------|------------------------|---|-------|------|-----------------|------------------------|
|               |                        | цемент                                      | песок | вода | добавка, % от Ц |                        |
| 3.33          | Ц 3; П 1               | 570   | 1400  | 200  | 0               | 131                    |
| 3.34          | Ц 3<br>П 1<br>Пл 1     | 570   | 1400  | 200  | 0,2             | 131                    |
| 3.35          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,4             | 149                    |
| 3.36          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,6             | 162                    |
| 3.37          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,8             | 175                    |
| 3.38          | Ц 3<br>П 1<br>Пл 2     | 570   | 1400  | 200  | 0,2             | 131                    |
| 3.39          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,4             | 161                    |
| 3.40          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,6             | 180                    |
| 3.41          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,8             | 211                    |
| 3.42          | Ц 3<br>П 1<br>Пл 3     | 570   | 1400  | 200  | 0,2             | 131                    |
| 3.43          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,4             | 166                    |
| 3.44          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,6             | 206                    |
| 3.45          |                        | 570   | 1400  | 200  | 0,8             | 229                    |

Полученные результаты позволяют говорить о следующем:

- 1) Минимальный расход добавки, при превышении которого наблюдается значимое изменение предельной растяжимости смеси, составляет 0,2 % от массы цемента;

2) С увеличением расхода пластификатора от 0,2 до 0,8 % от массы цемента наблюдается устойчивый рост предельной растяжимости бетонной смеси по линейному закону;

3) Степень влияния добавки на пластичность бетонной смеси не поддается точному математическому обобщению, угловой коэффициент линейной зависимости различается от 76 до 172 в зависимости от используемой добавки.

4) За счет введения добавки в смесь с расходом до 0,6 % от массы цемента (при большем расходе наблюдалось водоотделение) возможно увеличить предельную растяжимость на 20...55 %.

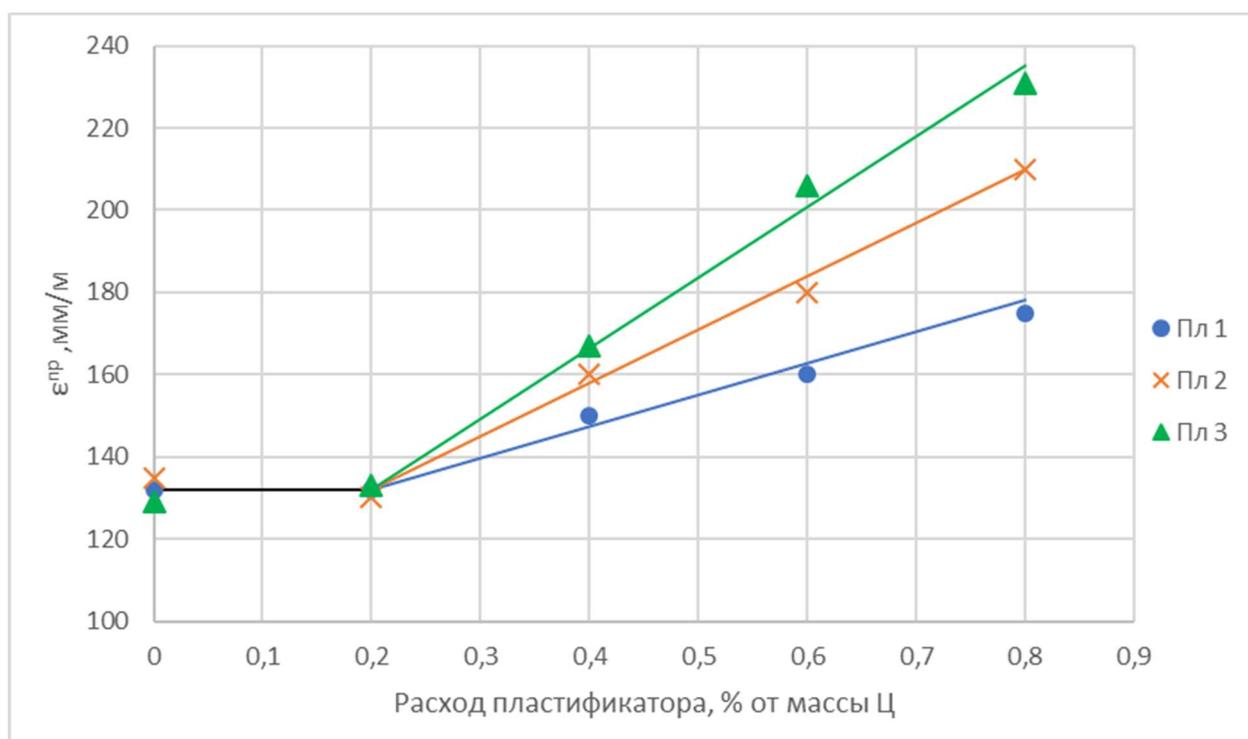


Рисунок 3.8 – Влияние расхода пластификатора на предельную растяжимость бетонной смеси

### 3.6 Математическая модель пластичности бетонной смеси

#### 3.6.1 Разработка математической модели

На основе полученных ранее выводов в пунктах 3.1 – 3.4 диссертации на предельную растяжимость бетонной смеси главным образом влияют

следующие факторы: истинное водоцементное отношение ( $V/C_{ист}$ , %), нормальная густота цемента (НГ, %); объемная доля цементного теста в смеси ( $\varphi^{шт}$ , %), расход пластифицирующей добавки. Помимо этого, установлено, что в отличие от влияния прочих факторов, влияние расхода пластифицирующей добавки на предельную растяжимость бетонной смеси не поддается точному математическому обобщению, что связано с многообразием химической природы существующих сегодня добавок и специфическим характером взаимодействия конкретной добавки с конкретным цементом. В связи с этим, влияние пластификатора на пластичность бетонной смеси не учитывается при разработке математической модели, а сама модель справедлива для бетонных смесей, состоящих из цементного теста (цемент и вода) и заполнителей. Также не учитываются данные, не входящие в область рациональных составов, так как они подчиняются уникальным закономерностям, которые не представляют практического интереса, но значительно усложняют математическое описание.

Таблица 3.8 – Дополнительные составы бетонной смеси для разработки математической модели

| № состава б/с | Используемые материалы | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      | $\varepsilon^{пр}$ , мм/м |
|---------------|------------------------|---|-------|------|---------------------------|
|               |                        | цемент                                      | песок | вода |                           |
| 3.46          | Ц 1<br>П 1             | 490   | 1659  | 172  | 78                        |
| 3.47          |                        | 450   | 1713  | 158  | 87                        |
| 3.48          |                        | 520   | 1540  | 260  | 274                       |
| 3.49          | Ц 2<br>П 2             | 550   | 1550  | 220  | 140                       |
| 3.50          |                        | 600   | 1450  | 270  | 238                       |
| 3.51          |                        | 570   | 1465  | 285  | 274                       |
| 3.52          | Ц 5<br>П 3             | 490   | 1610  | 221  | 70                        |
| 3.53          |                        | 650   | 1397  | 273  | 157                       |
| 3.54          |                        | 470   | 1615  | 235  | 105                       |
| 3.55          |                        | 520   | 1540  | 260  | 149                       |
| 3.56          | Ц 3<br>П 1             | 500   | 1620  | 200  | 113                       |
| 3.57          |                        | 510   | 1606  | 204  | 122                       |
| 3.58          |                        | 490   | 1595  | 235  | 211                       |
| 3.59          | Ц 4                    | 570   | 1454  | 296  | 256                       |
| 3.60          | П 2                    | 550   | 1561  | 209  | 61                        |

Для более точного математического обобщения полученных в исследовании закономерностей были разработаны и испытаны дополнительные составы бетонной смеси с использованием различных сырьевых компонентов. Полученные результаты представлены в таблице 3.8 и учитываются при разработке математической модели.

Для получения математической модели наиболее точно описывающей зависимость предельной растяжимости бетонной смеси от установленных ранее факторов следует рассмотреть и сравнить различные подходы к построению модели.

#### *Регрессионная модель (РМ)*

В ходе экспериментального исследования получено 36 значений предельной растяжимости различных составов бетонной смеси и выявлены наиболее значимые факторы ( $V/C_{ист}$ , НГ,  $\varphi^{шт}$ ) влияющие на ее пластические свойства. Все полученные данные можно подвергнуть регрессионному анализу в абсолютном выражении и получить уравнение регрессии (уравнение 3.2), которое не будет учитывать специфический характер влияния некоторых факторов, но позволит понять уровень их значимости.

$$\varepsilon^{пр} = 11,38 \cdot V/C_{ист} - 4,586 \cdot НГ + 12,185 \cdot \varphi^{шт} - 590; \quad (3.2)$$

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

Полученное уравнение регрессии является математической моделью пластичности бетонной смеси, позволяет понять уровень влияния каждого из установленных факторов и позволяет расчетным путем определить предельную растяжимость бетонной смеси зная ее состав и свойства компонентов. Однако, данная модель не учитывает специфический характер влияния некоторых факторов, в частности не учитывается нелинейный характер влияния объемной доли цементного теста и совместный характер влияния истинного водоцементного отношения и нормальной плотности цемента.

В соответствии с полученным уравнением наиболее значимыми являются истинное водоцементное отношение и объемная доля цементного теста, с увеличением которых возрастает и предельная растяжимость бетонной смеси, НГ влияет в меньшей степени.

#### *Усовершенствованная регрессионная модель (УРМ)*

Полученную ранее регрессионную модель следует усовершенствовать для учета специфического характера влияния некоторых факторов. В частности, необходимо учитывать нелинейное влияние доли цементного теста в смеси и совместное влияние истинного водоцементного отношения и нормальной плотности цемента (через их разницу). С учетом данных поправок получено усовершенствованное уравнение регрессии (уравнение 3.3).

$$\varepsilon^{пр} = 11,7 \cdot (В/Ц_{ист} - НГ) + 0,032(\varphi^{шт} - 37)^3 + 137; \quad (3.3)$$

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

Полученное уравнение более точно описывает зависимость предельной растяжимости бетонной смеси от установленных факторов, однако не позволяет наглядно продемонстрировать уровень их влияния. Более того, такое уравнение все равно остается уравнением регрессии, полученным с помощью статистического анализа, данная модель не отражает природу процессов, лежащих в основе формирования пластических свойств бетонной смеси.

#### *Качественно-количественная модель (ККМ)*

Так как пластические свойства бетонной смеси формируются за счет наличия таковых у цементного теста, а заполнитель выступает в роли отощающего компонента, следует рассмотреть модель, в которой предельная растяжимость бетонной смеси зависит от двух показателей: предельная растяжимость ЦТ в смеси (качественный), объемная доля ЦТ в смеси (количественный). В таком случае данную модель можно представить в виде уравнения 3.4

$$\varepsilon^{\text{пр}} = \varepsilon^{\text{ЦТ}} \cdot K^{\varphi}; \quad (3.4)$$

где:  $\varepsilon^{\text{пр}}$  – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м;  $\varepsilon^{\text{ЦТ}}$  – предельная растяжимость цементного теста в смеси, мм/м;  $K^{\varphi}$  – коэффициент, учитывающий объемную долю цементного теста в смеси.

Как установлено ранее, предельная растяжимость цементного теста в смеси зависит от разницы между истинным водоцементным отношением и нормальной плотностью, что описывается с большой точностью уравнением 3.5.

$$\varepsilon^{\text{ЦТ}} = 11,7 \cdot (V/C_{\text{ист}} - \text{НГ}) + 358,4; \quad (3.5)$$

где:  $\varepsilon^{\text{ЦТ}}$  – предельная растяжимость цементного теста в смеси, мм/м  $V/C_{\text{ист}}$  – истинное водоцементное отношение, %; НГ – нормальная плотность цемента, %.

Так же ранее установлены степень и характер влияния объемной доли цементного теста в смеси на предельную растяжимость бетонной смеси, что позволяет составить уравнение 3.6, которое связывает поправочный коэффициент  $K^{\varphi}$  и объемную долю ЦТ.

$$K^{\varphi} = (0,053 \cdot \varphi^{\text{ЦТ}} - 2,2)^2 + 0,38; \quad (3.6)$$

где:  $\varphi^{\text{ЦТ}}$  – объемная доля цементного теста в бетонной смеси, %.

Полученная математическая модель отражает принцип формирования пластичности бетонной смеси, который заключается в наличии пластических свойств у цементного теста, и отсутствии таковых у заполнителя. Заполнитель выступает отошчающим компонентом, который снижает объемную концентрацию цементного теста в смеси и таким образом понижает ее способность к бездефектному деформирования. Предельная растяжимость цементного теста в свою очередь зависит не только от нормальной плотности и водоцементного отношения, но и от водопотребности заполнителя, который, сорбируя воду из ЦТ, снижает его растяжимость.

Таким образом, при рассмотрении различных подходов, в результате получено три математические модели пластичности бетонной смеси, которые необходимо проверить и сравнить.

### 3.6.2 Статистический анализ и сравнение математических моделей

При разработке математических моделей учитывались экспериментальные значения предельной растяжимости бетонной смеси 36 составов, для более объективной и достоверной проверки полученного результата были разработаны и испытаны дополнительные составы бетонной смеси с использованием различных сырьевых компонентов. Полученные результаты представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Дополнительные составы бетонной смеси для проверки математических моделей

| № состава<br>б/с | Используемые<br>материалы | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      | $\varepsilon^{пр}$ , мм/м |
|------------------|---------------------------|---|-------|------|---------------------------|
|                  |                           | цемент                                      | песок | вода |                           |
| 3.61             | Ц 1; П 3                  | 551   | 1560  | 209  | 78                        |
| 3.62             | Ц 3; П 3                  | 552   | 1575  | 193  | 9                         |
| 3.63             | Ц 5; П 3                  | 553   | 1546  | 221  | 35                        |
| 3.64             | Ц 1; П 2                  | 554   | 1517  | 249  | 184                       |
| 3.65             | Ц 3; П 2                  | 555   | 1504  | 261  | 184                       |
| 3.66             | Ц 5; П 2                  | 556   | 1486  | 278  | 202                       |
| 3.67             | Ц 1; П 1                  | 557   | 1568  | 195  | 105                       |
| 3.68             | Ц 2; П 1                  | 558   | 1483  | 279  | 256                       |
| 3.69             | Ц 5; П 1                  | 559   | 1537  | 224  | 113                       |
| 3.70             | Ц 4; П 1                  | 560   | 1525  | 235  | 140                       |
| 3.71             | Ц 4; П 2                  | 561   | 1507  | 252  | 131                       |
| 3.72             | Ц 4; П 3                  | 562   | 1494  | 264  | 175                       |
| 3.73             | Ц 4; П 1                  | 563   | 1560  | 197  | 52                        |
| 3.74             | Ц 4; П 2                  | 564   | 1530  | 226  | 70                        |

Итого в статистическом анализе участвует 50 составов бетонной смеси с известными значениями предельной растяжимости, полученными экспериментальным путем. Для каждого из составов по трем математическим моделям (регрессионная модель (РМ), усовершенствованная регрессионная модель (УРМ), качественно-количественная модель (ККМ)) расчетным путем было определено значение предельной растяжимости. Полученные

экспериментальные и расчетные значения предельной растяжимости представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Экспериментальные и расчетные значения предельной растяжимости бетонных смесей

| № состава б/с | Экспериментальное значение $\varepsilon^{пр}$ , мм/м | Значение $\varepsilon^{пр}$ в мм/м, рассчитанное по: |     |     |
|---------------|--|--|-----|-----|
|               |  | РМ   | УРМ | ККМ |
| 3.5           | 234  | 194  | 275 | 277 |
| 3.6           | 96   | 97   | 111 | 151 |
| 3.7           | 52   | 47   | 57  | 114 |
| 3.12          | 152  | 124  | 165 | 191 |
| 3.13          | 67   | 68   | 82  | 134 |
| 3.18          | 193  | 162  | 242 | 245 |
| 3.19          | 140  | 113  | 154 | 182 |
| 3.20          | 9  | 1  | 10  | 93  |
| 3.21          | 193  | 170  | 188 | 198 |
| 3.22          | 122  | 114  | 124 | 152 |
| 3.23          | 70   | 52   | 64  | 116 |
| 3.24          | 17   | -4   | 15  | 92  |
| 3.25          | 238  | 226  | 245 | 231 |
| 3.26          | 184  | 174  | 186 | 184 |
| 3.27          | 117  | 106  | 120 | 140 |
| 3.28          | 70   | 49   | 72  | 114 |
| 3.29          | 373  | 347  | 373 | 316 |
| 3.30          | 308  | 291  | 307 | 248 |
| 3.31          | 238  | 224  | 240 | 194 |
| 3.32          | 184  | 165  | 190 | 162 |
| 3.45          | 129  | 142  | 135 | 157 |
| 3.46          | 78   | -11  | 80  | 118 |
| 3.47          | 87   | -57  | 73  | 121 |
| 3.48          | 274  | 234  | 271 | 189 |
| 3.49          | 140  | 111  | 130 | 134 |
| 3.50          | 238  | 234  | 232 | 191 |
| 3.51          | 274  | 276  | 277 | 207 |
| 3.52          | 70   | 34   | 64  | 109 |
| 3.53          | 157  | 179  | 160 | 170 |
| 3.54          | 105  | 77   | 111 | 127 |
| 3.55          | 149  | 146  | 148 | 142 |
| 3.56          | 113  | 58   | 109 | 127 |
| 3.57          | 122  | 69   | 113 | 127 |
| 3.58          | 211  | 160  | 200 | 160 |
| 3.59          | 256  | 265  | 264 | 204 |

|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 3.60 | 61  | 37  | 59  | 107 |
| 3.61 | 78  | 31  | 70  | 111 |
| 3.62 | 9   | -23 | 1   | 85  |
| 3.63 | 35  | 42  | 43  | 101 |
| 3.64 | 184 | 156 | 183 | 158 |
| 3.65 | 184 | 174 | 180 | 158 |
| 3.66 | 202 | 210 | 198 | 169 |
| 3.67 | 105 | 58  | 101 | 123 |
| 3.68 | 256 | 264 | 267 | 198 |
| 3.69 | 113 | 111 | 112 | 128 |
| 3.70 | 140 | 141 | 138 | 139 |
| 3.71 | 131 | 143 | 134 | 140 |
| 3.72 | 175 | 182 | 172 | 156 |
| 3.73 | 52  | 43  | 50  | 103 |
| 3.74 | 70  | 73  | 70  | 112 |

Для полученного массива значений был произведен статистический анализ, а именно были рассчитаны следующие показатели для значений полученных с использованием каждой математической модели: коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными значениями, средняя ошибка аппроксимации, среднее абсолютное отклонение, максимальная ошибка аппроксимации, максимальное абсолютное отклонение, количество отклонений аппроксимации превышающих 10 %, количество абсолютных отклонений превышающих 10 мм/м. Полученные статистические показатели представлены в таблице 3.11.

Анализ полученных результатов показывает, что несмотря на высокий коэффициент корреляции у всех математических моделей, качественно-количественная модель демонстрирует недопустимо высокую среднюю ошибку аппроксимации в 59 %, что превышает допустимое значение в 20 %, более того, максимальная ошибка аппроксимации достигает 932 %, а число отклонений, превышающих 10 %, составляет 40 из 50. Такие статистические показатели говорят о непригодности данной модели для определения предельной растяжимости бетонной смеси расчетным путем.

Таблица 3.11 – Статистические показатели математических моделей

| Статистический показатель                            | Значение показателя для: |         |          |
|--|--------------------------|---------|----------|
|  | PM                       | УPM     | ККМ      |
| Коэффициент корреляции                               | 0,95                     | 0,99    | 0,9      |
| Средняя ошибка аппроксимации, %                      | 17                       | 6       | 59       |
| Среднее абсолютное отклонение, мм/м                  | 18,8                     | 6,82    | 37,49    |
| Максимальная ошибка аппроксимации, %                 | 86                       | 25      | 932      |
| Максимальное абсолютное отклонение, мм/м             | 54,73                    | 48,98   | 84,78    |
| Количество отклонений аппроксимации больше 10 %, шт. | 23 из 50                 | 9 из 50 | 40 из 50 |
| Количество абсолютных отклонений больше 10 мм/м, шт. | 24 из 50                 | 9 из 50 | 42 из 50 |

Регрессионная модель демонстрирует высокий коэффициент корреляции равный 0,95 и невысокую среднюю ошибку аппроксимации равную 18,8 %, что соответствует удовлетворительно составленной математической модели (средняя ошибка аппроксимации от 10 до 20 %). Однако, число относительных и абсолютных отклонений превышающих заданные значения составляет примерно половину из всего массива данных, а среднее абсолютное отклонение превышает погрешность измерения предельной растяжимости примерно в три раза, что делает данную модель не пригодной к практическому использованию.

Усовершенствованная регрессионная модель демонстрирует не только лучшие статистические показатели из полученных, но и полностью удовлетворяет требованиям качественно составленной математической модели. Помимо высоко коэффициента корреляции равного 0,99, средняя ошибка аппроксимации составляет 6 %, что не превышает максимально допустимое значение для хорошо составленных математических моделей в 10%. Среднее абсолютное отклонение равное 6,82 мм/м примерно равно погрешности измерения предельной растяжимости бетонной смеси, а число относительных и абсолютных отклонений превышающих заданные значения составляет 9 из 50. Такие статистические показатели говорят о качественно

подобранной математической модели, которую можно использовать для определения предельной растяжимости бетонной смеси расчетным путем.

Следует отметить, что, несмотря на хорошие статистические показатели усовершенствованной регрессионной модели, максимальное относительное отклонение составило 25 %, а максимальное абсолютное отклонение – 48,98 мм/м. Такие показатели являются немногочисленными, однако оснований идентифицировать их в качестве ошибок нет. В связи с этим можно заключить, что требуется проводить дальнейшие исследования в данной области, для разработки более точной математической модели на основе более значимых и масштабных данных.

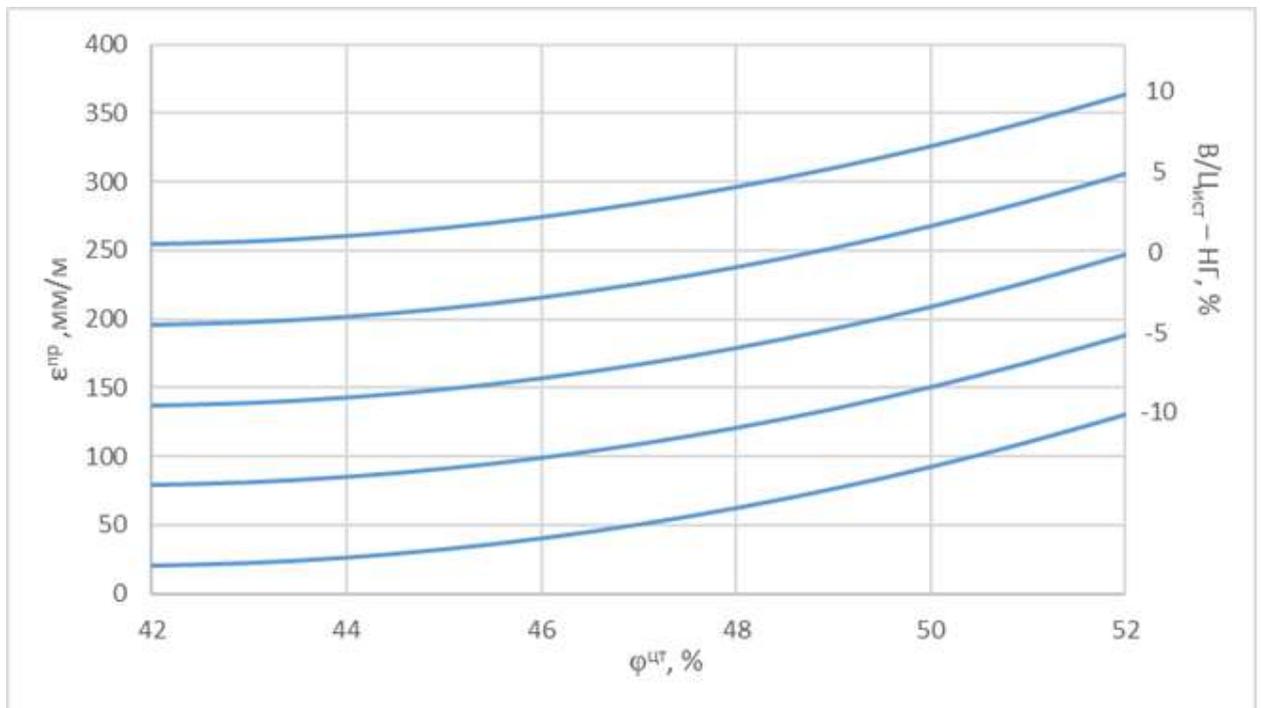


Рисунок 3.9 – Модель пластичности бетонной смеси в виде номограммы

По результатам математического моделирования выбрана усовершенствованная регрессионная модель (уравнение 3.3), как наиболее точно описывающая зависимость пластических свойств бетонной смеси от основных факторов. Помимо этого, полученное уравнение включает три переменные, которые оказывают существенное влияние, в связи с чем целесообразно представить данную модель в виде номограммы (рисунок 3.9),

что позволит наглядно продемонстрировать установленные зависимости и их значимость.

### 3.6.3 Определение предельной растяжимости бетонной смеси по математической модели пластичности

Полученная математическая модель может быть использована для расчета предельной растяжимости бетонной смеси известного состава. Однако, для определения входящих в нее переменных недостаточно знать состав бетонной смеси и свойства сырьевых компонентов, необходимо также корректно рассчитать истинное водоцементное отношение и объемную долю цементного теста. Рекомендуемый способ расчета разберем на конкретном примере.

#### Пример

Задание: рассчитать предельную растяжимость мелкозернистой бетонной смеси известного фактического состава № 3.75 (таблица 3.12)

Таблица 3.12 – Фактический состав бетонной смеси № 3.75

| Компонент | Расход на м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг |
|-----------|---|
| Цемент    | 600   |
| Песок     | 1400  |
| Вода      | 160   |

Для расчета потребуются следующие величины: нормальная плотность цемента ( $\rho_{\text{н}}$ , %), истинное водоцементное отношение ( $V/C_{\text{ист}}$ , %), объемная доля цементного теста в смеси ( $\phi^{\text{тт}}$ , %).

Нормальную плотность цемента можно определить по [8] или применить указанную в документе о качестве на используемый цемент. Для данной задачи примем нормальную плотность цемента равную 27,1 %.

Истинное водоцементное отношение – это отношение оставшейся в ЦТ воды после сорбции заполнителем к расходу цемента. Для его определения следует учитывать водопотребность всех используемых сухих компонентов за

исключением вяжущего. В данном примере необходимо учитывать водопотребность песка, а  $V/C_{\text{ист}}$ , %, следует определять по формуле 3.7.

$$V/C_{\text{ист}} = \frac{V - V_{\text{п}} \cdot \Pi}{C} \cdot 100\%; \quad (3.7)$$

где:  $V$  – расход воды на  $\text{м}^3$  бетонной смеси, кг;  $\Pi$  – расход песка на  $\text{м}^3$  бетонной смеси, кг;  $C$  – расход цемента на  $\text{м}^3$  бетонной смеси, кг;  $V_{\text{п}}$  – водопотребность песка в долях.

Для определения водопотребности заполнителя существует множество различных способов, для песка, например водопотребность можно определить по методике, предложенной Ю. М. Баженовым и Б. Г. Скрамтаевым [55]. Для данной задачи примем водопотребность песка равную 0,065.

Подставив принятое значение водопотребности песка в уравнение 3.7, получаем истинное водоцементное отношение равное 26,5 %.

Объемная доля цементного теста в смеси – это величина, точный численный расчет которой затруднен по ряду причин. Во-первых, плотность цементного теста сильно зависит от истинного водоцементного отношения, и от интенсивности перемешивания смеси, в связи с чем точно рассчитать ее долю через расход цемента и воды достаточно сложно. Во-вторых, объемная доля заполнителя, рассчитать которую возможно с большой точностью, не всегда строго связана с долей цементного теста, что может быть вызвано заниженным расходом цемента, не подходящей гранулометрией заполнителя и т.д. Однако, для технологий непрерывного безопалубочного формования характерны смеси с высоким расходом цемента, что позволяет рассчитать долю ЦТ в смеси с большой точностью через долю заполнителя по формулам 3.8 и 3.9.

$$\varphi^{\text{ЦТ}} = 100\% - \varphi^{\text{п}}; \quad (3.8)$$

$$\varphi^{\text{п}} = \frac{\Pi}{\rho^{\text{п}}} \cdot 100\%; \quad (3.9)$$

где:  $\varphi^{\text{ЦТ}}$  – объемная доля ЦТ в смеси, %;  $\varphi^{\text{п}}$  – объемная доля песка в смеси, %;  $\Pi$  – расход песка на  $\text{м}^3$  бетонной смеси, кг;  $\rho^{\text{п}}$  – плотность зерен песка,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Плотность зерен песка следует определять по [14]. Для данного примера примем плотность зерен песка равную 2620 кг/м<sup>3</sup>, таким образом объемная доля заполнителя равняется 53,4 %, а объемная доля ЦТ составляет 46,6 %.

Полученные значения истинного водоцементного отношения, нормальной густоты цемента и объемной доли цементного теста в смеси подставляем в формулу 3.10, рассчитываем предельную растяжимость бетонной смеси и округляем до целых значений.

$$\begin{aligned} \varepsilon^{пр} &= 11,7 \cdot (В/Ц_{ист} - НГ) + (\varphi^{шт} - 41,5)^2 + 137 = \\ &= 11,7 \cdot (26,5 - 27,1) + 0,032 \cdot (46,6 - 37)^3 + 137 = 158 \text{ мм/м}; \end{aligned} \quad (3.10)$$

Таким образом получено расчетное значение предельной растяжимости мелкозернистой бетонной смеси равное 158 мм/м.

Помимо этого, можно воспользоваться математической моделью в виде номограммы (рисунок 3.10). Для этого необходимо:

- 1) Провести кривую, соответствующую фактической разнице между  $В/Ц_{ист}$  и НГ, в данном примере эта разница составляет – 0,6 %;
- 2) От оси абсцисс проложить перпендикуляр через вычисленное значение объемной доли цементного теста, и образовать точку пересечения с кривой, построенной в пункте 1;
- 3) Найти перпендикуляр от оси ординат, проходящий через полученную в пункте 2 точку пресечения, и определить значение на оси ординат соответствующее данному перпендикуляру.

Полученное значение и есть искомая предельная растяжимость мелкозернистой бетонной смеси.

Рекомендуемый способ расчета предельной растяжимости, основанный на общих представлениях о структуре бетонной смеси и на разработанной математической модели, позволяет оценить предельную растяжимость мелкозернистой бетонной смеси, не прибегая к испытанию.

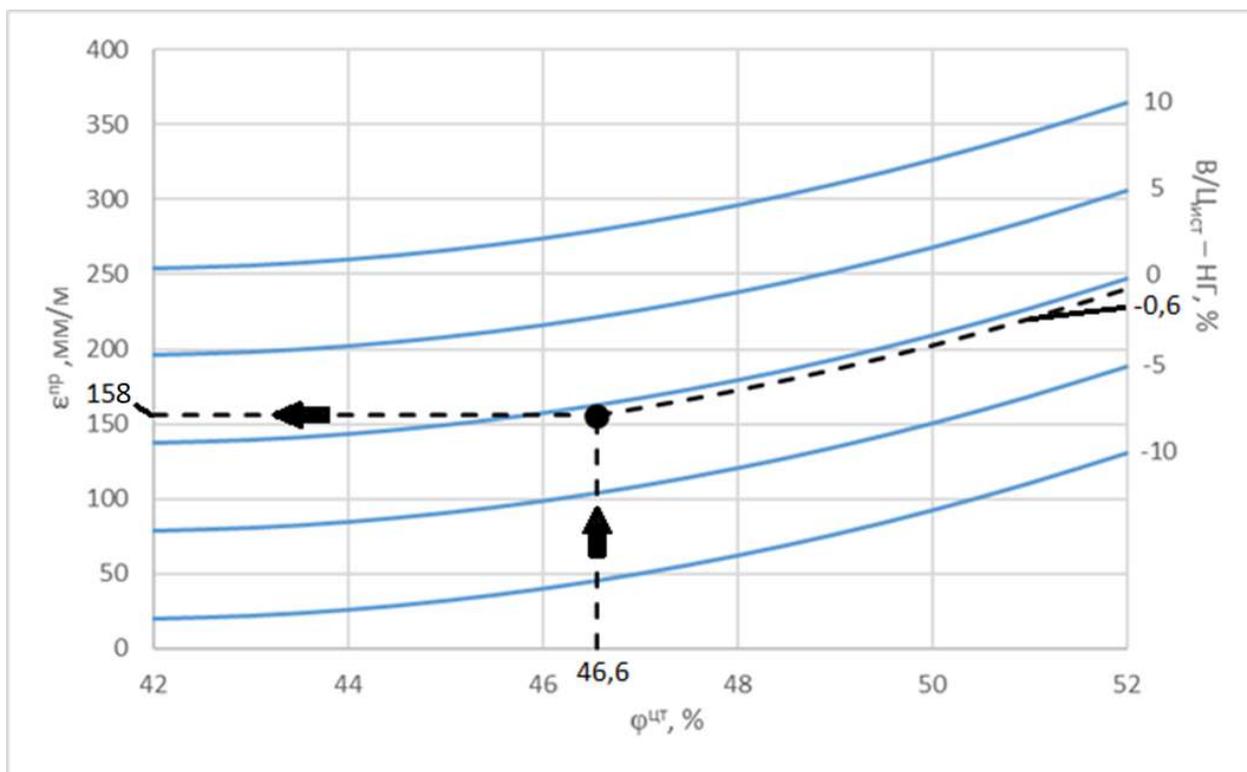


Рисунок 3.10 – пример использование номограммы для определения предельной растяжимости бетонной смеси

### Выводы по третьей главе

- 1) Предельная растяжимость цементного теста нормальной густоты составляет  $360 \text{ мм/м} \pm 3 \%$  вне зависимости от тонкости помола цемента, его минерального состава и прочих факторов;
- 2) Пластичность цементного теста главным образом зависит от разницы водоцементного отношения и нормальной густоты цемента, при этом с увеличением этой разницы предельная растяжимость возрастает по линейному закону;
- 3) Заполнитель снижает пластические свойства бетонной смеси за счет двух механизмов: сорбции воды из цементного теста, что снижает истинное водоцементное отношение, предельную растяжимость цементного теста и соответственно бетонной смеси; отощения смеси за счет сокращения объемной концентрации цементного теста (пластичного компонента);

4) Введение пластифицирующей добавки с рациональным расходом может привести к росту предельной растяжимости бетонной смеси на 20...55 %, точная величина прироста зависит от изначального значения предельной растяжимости и специфики взаимодействия конкретного пластификатора с конкретным цементом;

5) Определяющими пластические свойства бетонной смеси факторами являются: истинное водоцементное отношение; нормальная плотность цемента; объемная доля цементного теста в смеси; действие пластифицирующей добавки;

6) Влияние всех определяющих пластические свойства бетонной смеси факторов за исключением действия пластификаторов поддается точному математическому обобщению, для чего разработана и успешно проверена математическая модель пластичности бетонной смеси.

## 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

### 4.1 Расчет состава бетона с обеспечением заданной пластичности бетонной смеси

#### 4.1.1 Расчет состава тяжелого бетона

Как уже говорилось ранее, сегодня существует большое число методик по расчету состава бетона, базирующихся как на обобщенных зависимостях, так и на единичных, полученных на конкретном сырье. Так или иначе, все методики по своей сути сводятся к решению системы уравнений, которые, во-первых, обязательно связывают между собой расходы компонентов и их свойства с заданными характеристиками бетонной смеси и бетона, во-вторых, могут быть представлены не только в алгебраическом виде, но и в графическом (номограммы, графики и пр.). Например, один из самых известных на сегодня методов расчета состава бетона – метод абсолютных объемов – заключается в решении системы уравнений 4.1...4.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_B = R_C \cdot A \cdot \left( \frac{Ц}{В} \pm 0,5 \right) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{В}{\rho_B} + \frac{Ц}{\rho_C} + \frac{П}{\rho_P} + \frac{Щ}{\rho_{Щ}} = 1 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} ОК = f(В) \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Щ = \frac{1000}{\frac{\alpha П_{Щ}}{\rho_{Щ}^H} + \frac{1}{\rho_{Щ}}} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

где:  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $R_C$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей;  $Ц$ ,  $В$ ,  $П$ ,  $Щ$  – расход цемента воды, песка, щебня на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_C$ ,  $\rho_P$ ,  $\rho_{Щ}$  – плотность зерен цемента, песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>; ОК – осадка конуса, см;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен;  $П_{Щ}$  – пустотность щебня;  $\rho_{Щ}^H$  – насыпная плотность щебня; уравнение 4.1 – основной закон прочности бетона;

уравнение 4.2 – уравнение абсолютных объемов; уравнение 4.3 – зависимость осадки конуса от расхода воды, представляется в виде номограммы; уравнение 4.4 – зависимость расхода щебня от зернового состава заполнителей, выраженного коэффициентом раздвижки зерен и пустотностью щебня.

Расчет состава бетона методом абсолютных объемов производится по алгоритму, позволяющему аналитически решить представленную систему уравнений путем выражения одних неизвестных через другие. Расходы основных компонентов – Ц, П, Щ, В – являются неизвестными, поскольку их 4, то и уравнений в системе тоже 4.

Для расчета состава бетона с обеспечением заданной пластичности бетонной смеси необходимо составить аналогичную систему, которая будет включать в себя уравнение, связывающее расходы компонентов и их свойства с заданным значением предельной растяжимости смеси.

Для этого, математическую модель пластичности (уравнение 3.3) необходимо преобразовать, а именно выразить  $V/C_{ист}$  в % и  $\varphi^{ЦТ}$  в % через расходы и свойства основных компонентов. При этом,  $\varphi^{ЦТ}$  следует выразить через расходы заполнителей, что для сплошных бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании, более точно.

$$\varphi^{ЦТ} = \frac{1\text{м}^3 - \frac{П}{\rho_{П}} - \frac{Щ}{\rho_{Щ}}}{1\text{м}^3} \cdot 100 = \left( 1 - \frac{П}{\rho_{П}} - \frac{Щ}{\rho_{Щ}} \right) \cdot 100; \quad (4.5)$$

$$\frac{В}{Ц}_{ист} = \frac{В - П \cdot V_{П} - Щ \cdot V_{Щ}}{Ц} \cdot 100 = \left( \frac{В}{Ц} - \frac{П \cdot V_{П} + Щ \cdot V_{Щ}}{Ц} \right) \cdot 100; \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^{пр} = & 11,7 \cdot \left( \left( \frac{В}{Ц} - \frac{П \cdot V_{П} + Щ \cdot V_{Щ}}{Ц} \right) \cdot 100 - НГ \right) + \\ & + 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{П}{\rho_{П}} - \frac{Щ}{\rho_{Щ}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137; \end{aligned} \quad (4.7)$$

где:  $\varepsilon^{пр}$  – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; Ц, П, Щ, В – расход цемента, песка, щебня, воды на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $\rho_{П}$ ,  $\rho_{Щ}$  – плотность зерен песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{П}$ ,  $V_{Щ}$  – водопотребность песка, щебня, в долях,  $\varepsilon^{пр}$  – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; НГ – нормальная густота цемента, %.

Существенной проблемой при подборе состава бетона с обеспечением заданной пластичности является существующая корреляция между подвижностью или жесткостью смеси и ее предельной растяжимостью для бездобавочных бетонных смесей. При решении системы уравнений, которая включает и предельную растяжимость, и подвижность (жесткость) в большинстве случаев возникает математический конфликт, решить который можно только при получении расходов компонентов в виде комплексных чисел. Поскольку расходы компонентов могут быть представлены только в виде натуральных чисел, из системы уравнений следует исключить величины, отражающие подвижность или жесткость бетонной смеси.

Уравнение 4.4 составлено таким образом, чтобы получить расход щебня, при котором упаковка зерен заполнителей будет самой плотной, с учетом возможной раздвижки. Наиболее плотная упаковка зерен необходима для получения высоких характеристик прочности и долговечности бетона, но не всегда позволяет добиться заданной реологии, а тем более высокой пластичности. В связи с этим, уравнение 4.4 следует заменить на уравнение 4.11, которое позволяет регулировать соотношение расхода заполнителей.

В результате описанных преобразований получена система уравнений 4.8...4.11.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_B = R_{Ц} \cdot A \cdot \left( \frac{Ц}{B} \pm 0,5 \right) \quad (4.8) \\ \frac{B}{\rho_B} + \frac{Ц}{\rho_{Ц}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Psi}{\rho_{\Psi}} = 1 \quad (4.9) \\ \varepsilon^{np} = 11,7 \cdot \left( \left( \frac{B}{Ц} - \frac{\Pi \cdot B_{\Pi} + \Psi \cdot B_{\Psi}}{Ц} \right) \cdot 100 - \text{НГ} \right) + \\ + 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} - \frac{\Psi}{\rho_{\Psi}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 \quad (4.10) \\ r = \frac{\Pi}{\Psi} \quad (4.11) \end{array} \right.$$

где:  $r$  – 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 полученной системы уравнений является очень трудоемким. Определив В/Ц по уравнению 4.8, выразив Ц через В/Ц, П и Щ по уравнению 4.9, выразив П через Щ по уравнению 4.11 и подставив полученные результаты в уравнение 4.10, получается равенство, преобразовать которое можно до вида уравнения 4.12 с одной неизвестной (Щ).

$$a \cdot \text{Щ}^4 + b \cdot \text{Щ}^3 + c \cdot \text{Щ}^2 + d \cdot \text{Щ} + m = 0 \quad (4.12)$$

где:

$$a = -0,032 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} + \frac{r}{\rho_{\text{щ}}} \right) \cdot \left( 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right)^3;$$

$$b = 0,032 \cdot \left( 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right)^3 + \left( 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right)^2 \cdot 63 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} + \frac{r}{\rho_{\text{щ}}} \right);$$

$$c = 11907 \cdot 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) - 63 \cdot \left( 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right)^3$$

$$d = \left( \varepsilon^{\text{пр}} - 1170 \cdot \frac{\text{В}}{\text{Ц}} + 11,7 \cdot \text{НГ} + 7864,5 \right) \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} + \frac{r}{\rho_{\text{щ}}} \right) +$$

$$+ 11907 \cdot 100 \cdot \left( \frac{r}{\rho_{\text{п}}} - \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) - 1170 \cdot \left( \frac{\text{В}}{\text{Ц} \cdot \rho_{\text{в}}} + \frac{1}{\rho_{\text{ц}}} \right) \cdot (r \cdot \text{В}_{\text{п}} - \text{В}_{\text{щ}});$$

$$m = 1170 \cdot \frac{\text{В}}{\text{Ц}} - 11,7 \cdot \text{НГ} - \varepsilon^{\text{пр}} - 7864,5.$$

Решать полученное уравнение 4.12 для определения расхода щебня, а затем и других компонентов смеси, при подборе состава бетона в строительной или заводской лаборатории нецелесообразно, из-за очевидной трудоемкости и высокой вероятности ошибок. Более того, при некоторых значениях характеристик сырья, смеси и бетона, данное уравнение будет иметь несколько решений, в том числе в области отрицательных чисел. Однако современный уровень развития техники и технологий позволяет

решать не только такие уравнения, но и системы уравнений, при помощи электронно-вычислительных машин, доступных в том числе и сотрудникам лабораторий.

Для решения системы уравнений 4.8...4.11 была разработана программа для ЭВМ (Приложение Ж) на базе программы *MS Excel (MS Office)* представленная на рисунке 4.1.

| 1   |  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6                                  | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12                                       | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18  | 19 | 20   | 21 | 22 |  |                                    |  |      |  |
|---|--|---|---|---|---|------------------------------------|---|---|---|----|----|--|----|----|----|----|----|---|----|------|----|----|--|------------------------------------|--|------|--|
| <b>Свойства сырьевых материалов</b>                   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| Вяжущее   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | Заполнители                              |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| <b>Цемент</b>   |  |   |   |   |   | <b>Песок</b>                       |   |   |   |    |    | <b>Щебень (Гравий)</b>                   |    |    |    |    |    | $r = \frac{П}{Щ(Г)^*}$                      |    | 0,8  |    |    |  |                                    |  |      |  |
| нормальная густота, %                                 |  |   |   |   |   | плотность зёрен, кг/м <sup>3</sup> |   |   |   |    |    | плотность зёрен, кг/м <sup>3</sup>       |    |    |    |    |    | r = 0,55...0,8 для щебня (гравия) фр. 5-20; |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| 3100  |  |   |   |   |   | 2650                               |   |   |   |    |    | 2690                                     |    |    |    |    |    | r = 0,65...1,5 для щебня (гравия) фр. 5-10  |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| активность, МПа                                       |  |   |   |   |   | водопотребность, %                 |   |   |   |    |    | водопотребность, %                       |    |    |    |    |    | A**   |    | 0,55 |    |    |  |                                    |  |      |  |
| 50  |  |   |   |   |   | 6,5                                |   |   |   |    |    | 3,5                                      |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| * - отношение расхода песка к расходу щебня (гравия): |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | A = 0,65 - заполнители высокого качества |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | A = 0,60 - заполнители рядовые           |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| ** - коэффициент, учитывающий качество заполнителя:   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | A = 0,55 - заполнители низкого качества  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| <b>Техническое задание</b>                            |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | <b>Ответ</b>                             |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| выберите тип бетона                                   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    | тяжелый                                  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  |                                    |  |      |  |
| Рсж, МПа  |  |   |   |   |   | 50                                 |   |   |   |    |    | <b>расход на 1 м<sup>3</sup></b>         |    |    |    |    |    | Цемент                                      |    | 541  |    |    |  |                                    |  |      |  |
| предельная  |  |   |   |   |   | растяжимость, мм/м                 |   |   |   |    |    | 150                                      |    |    |    |    |    | Песок                                       |    | 703  |    |    |  |                                    |  |      |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    | Щебень (Гравий)                             |    | 879  |    |    |  |                                    |  |      |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    | Вода  |    | 233  |    |    |  |                                    |  |      |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  | плотность смеси, кг/м <sup>3</sup> |  | 2356 |  |
|   |  |   |   |   |   |                                    |   |   |   |    |    |  |    |    |    |    |    |   |    |      |    |    |  | В/Ц                                |  | 0,43 |  |

Рисунок 4.1 – пример расчета состава тяжелого бетона при помощи разработанной программы для ЭВМ.

Программа содержит три поля:

- 1) «Свойства сырьевых материалов» – для ввода свойств сырьевых материалов и назначения соотношения мелкого и крупного заполнителя;
- 2) «Техническое задание» – для ввода требуемой прочности бетона, требуемой предельной растяжимости бетонной смеси и выбора типа бетона (тяжелый, мелкозернистый);

3) «Ответ» – содержит результат расчета состава бетона, с указанием расхода сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона, плотности смеси и водоцементного отношения.

Полученная программа позволяет осуществлять расчет состава бетона не только при использовании в качестве крупного заполнителя щебня, но и гравия, за счет учета водопотребности крупного заполнителя. Помимо этого, она позволяют рассчитывать состав мелкозернистого бетона.

#### 4.1.2 Расчет состава мелкозернистого бетона

Сегодня при непрерывном безопалубочном формовании широко используются не только тяжелые бетоны, но и мелкозернистые, в том числе по причине их повышенной пластичности, ввиду меньшей концентраций заполнителя в смеси. В связи с этим задача подбора состава мелкозернистого бетона является актуальной.

Для осуществления расчетной части подбора состава мелкозернистого бетона необходимо составить систему уравнений по аналогии с пунктом 4.2.1 диссертации. Для этого выразим  $V/C_{ист}$  и  $\phi^{ЦГ}$  через расходы и свойства основных компонентов мелкозернистого бетона (уравнения 4.13 и 4.14), подставим полученные результаты в математическую модель пластичности и получим уравнение 4.15.

$$\phi^{ЦГ} = \frac{1\text{ м}^3 - \frac{П}{\rho_{П}}}{1\text{ м}^3} \cdot 100 = \left(1 - \frac{П}{\rho_{П}}\right) \cdot 100; \quad (4.13)$$

$$\frac{В}{C}_{ист} = \frac{В - П \cdot V_{П}}{C} \cdot 100 = \left(\frac{В}{C} - \frac{П \cdot V_{П}}{C}\right) \cdot 100; \quad (4.14)$$

$$\varepsilon^{пр} = 11,7 \cdot \left( \left( \frac{В}{C} - \frac{П \cdot V_{П}}{C} \right) \cdot 100 - НГ \right) + 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{П}{\rho_{П}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137; \quad (4.15)$$



Аналитическое решение данной системы, как и системы для расчета состава тяжелого бетона, отличается высокой трудоемкостью. В результате алгебраических перестановок и выведений получается уравнение 4-ой степени по типу уравнения 4.12. По аналогии с расчетом состава тяжелого бетона целесообразнее решать данную систему с помощью разработанной программы для ЭВМ, пример использования которой приведен на рисунке 4.2.

## **4.2 Разработка рекомендаций по корректировке состава бетона**

### **4.2.1 Разработка способов регулирования пластичности бетонной смеси**

Помимо пластичности, при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций непрерывными безопалубочными способами, к используемым бетонным смесям и бетонам может предъявляться широкий набор общих и специальных требований, таких как подвижность или жесткость смеси, сроки схватывания, прочность в раннем возрасте, прочность в проектном возрасте и многие другие. Полученные в третьей главе диссертации выводы могут быть использованы для целенаправленного изменения предельной растяжимости бетонной смеси, однако при этом неизбежно будет происходить изменение подвижности или жесткости бетонной смеси, прочности бетона и, возможно, других показателей качества продукции. Помимо этого, избыточная предельная растяжимость при непрерывном безопалубочном формовании не является проблемой, для получения бездефектной продукции в конкретных производственных условиях достаточно задать и соблюдать лишь ее минимальное допустимое значение. С практической точки зрения задачи по понижению пластических свойств бетонных смесей не стоит. Из вышеизложенного следует, что сегодня при производстве непрерывными безопалубочными способами существует задача по улучшению пластичности бетонных смесей без ущерба основным показателям качества, таким как подвижность или жесткость смеси и

прочность бетона, чего не всегда возможно добиться за счет изменения соотношения расходов основных компонентов, а значит для осуществления этого требуется разработка специальных способов.

Полученные ранее данные говорят о корреляции между статической вязкостью бетонных смесей и их предельной растяжимостью. Основные факторы, которые повышают предельную растяжимость смеси: увеличение объемной доли цементного теста; увеличение истинного водоцементного отношения; снижение нормальной густоты цемента, оказывают схожее влияния и на статическую вязкость, понижая ее, что приводит к увеличению подвижности или снижению жесткости. Нарушить такую корреляцию возможно как минимум в двух случаях, при введении в бетонную смесь пластифицирующей добавки, и при введении дисперсной арматуры, что и лежит в основе двух способов повышения предельной растяжимости бетонной смеси не влекущих ухудшения удобоукладываемости смеси и прочности бетона.

#### **4.2.1.1 Улучшение пластичности бетонной смеси с помощью пластифицирующей добавки**

Как установлено ранее, введение пластификатора в рациональной дозировке позволяет повысить предельную растяжимость бетонной смеси на 20...55 % в зависимости от изначального ее значения и от специфики работы конкретной добавки с конкретным цементом. Помимо этого, введение пластификатора неизбежно приводит к существенному снижению статической вязкости, что недопустимо при непрерывном безопалубочном формовании, так как приводит к оседанию свежееотформованного изделия. В связи с этим, потерю вязкости необходимо компенсировать, что на практике достигается следующими возможными путями: снижение В/Ц; снижение расхода цемента; снижение и В/Ц и расхода цемента. Данные пути компенсации потери вязкости по установленным зависимостям вновь

приводят к снижению пластичности, но не обязательно соразмерному изменению вязкости.

Для проверки данной гипотезы были разработаны две группы составов равноподвижных мелкозернистых бетонных смесей с использованием различных пластификаторов. Подвижность определялась по погружению конуса СтройЦНИЛа (ПК, мм) и составляла 50...55 мм. Первая группа составов обладает одинаковым расходом цемента, при повышении расхода пластифицирующей добавки производилось снижение В/Ц для получения заданного значения ПК. Вторая группа составов отличается постоянным значением В/Ц, для получения равноподвижных смесей осуществлялось снижение расхода цемента. Для каждого состава определялась предельная растяжимость. Полученные данные представлены в таблице 4.1 и на рисунках 4.3 и 4.4.

Таблица 4.1 – Предельная растяжимость равноподвижных составов бетонных смесей при различном расходе пластификатора

| Группа составов | № состава б/с | Используемые материалы | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      |                 | В/Ц, % | ПК, мм | ε <sup>пр</sup> , мм/м |
|-----------------|---------------|------------------------|---|-------|------|-----------------|--------|--------|------------------------|
|                 |               |                        | цемент                                      | песок | вода | добавка, % от Ц |        |        |                        |
| контр.          | 4.1           | Ц 3; П 2               | 651   | 1403  | 261  | 0               | 40     | 52     | 175                    |
| 1               | 4.2           | Ц 3                    | 649   | 1401  | 260  | 0,2             | 40     | 51     | 175                    |
|                 | 4.3           | П 2                    | 648   | 1399  | 240  | 0,4             | 37     | 53     | 149                    |
|                 | 4.4           | Пл 1                   | 652   | 1402  | 225  | 0,6             | 35     | 50     | 131                    |
|                 | 4.5           | Ц 3                    | 651   | 1401  | 260  | 0,2             | 40     | 50     | 175                    |
|                 | 4.6           | П 2                    | 650   | 1406  | 237  | 0,4             | 36     | 52     | 157                    |
|                 | 4.7           | Пл 2                   | 653   | 1402  | 225  | 0,6             | 35     | 55     | 149                    |
|                 | 4.8           | Ц 3                    | 651   | 1401  | 260  | 0,2             | 40     | 52     | 175                    |
|                 | 4.9           | П 2                    | 651   | 1404  | 237  | 0,4             | 36     | 52     | 166                    |
|                 | 4.10          | Пл 3                   | 648   | 1400  | 223  | 0,6             | 34     | 51     | 166                    |
|                 | 2             | 4.11                   | Ц 3   | 651   | 1398 | 260             | 0,2    | 40     | 51                     |
| 4.12            |               | П 2                    | 629   | 1429  | 252  | 0,4             | 40     | 53     | 175                    |
| 4.13            |               | Пл 1                   | 621   | 1452  | 248  | 0,6             | 40     | 52     | 175                    |
| 4.14            |               | Ц 3                    | 649   | 1403  | 260  | 0,2             | 40     | 54     | 175                    |
| 4.15            |               | П 2                    | 632   | 1431  | 252  | 0,4             | 40     | 52     | 184                    |
| 4.16            |               | Пл 2                   | 620   | 1450  | 248  | 0,6             | 40     | 54     | 193                    |
| 4.17            |               | Ц 3                    | 650   | 1402  | 260  | 0,2             | 40     | 54     | 175                    |
| 4.18            |               | П 2                    | 630   | 1430  | 252  | 0,4             | 40     | 52     | 193                    |
| 4.19            |               | Пл 3                   | 611   | 1458  | 244  | 0,6             | 40     | 53     | 202                    |

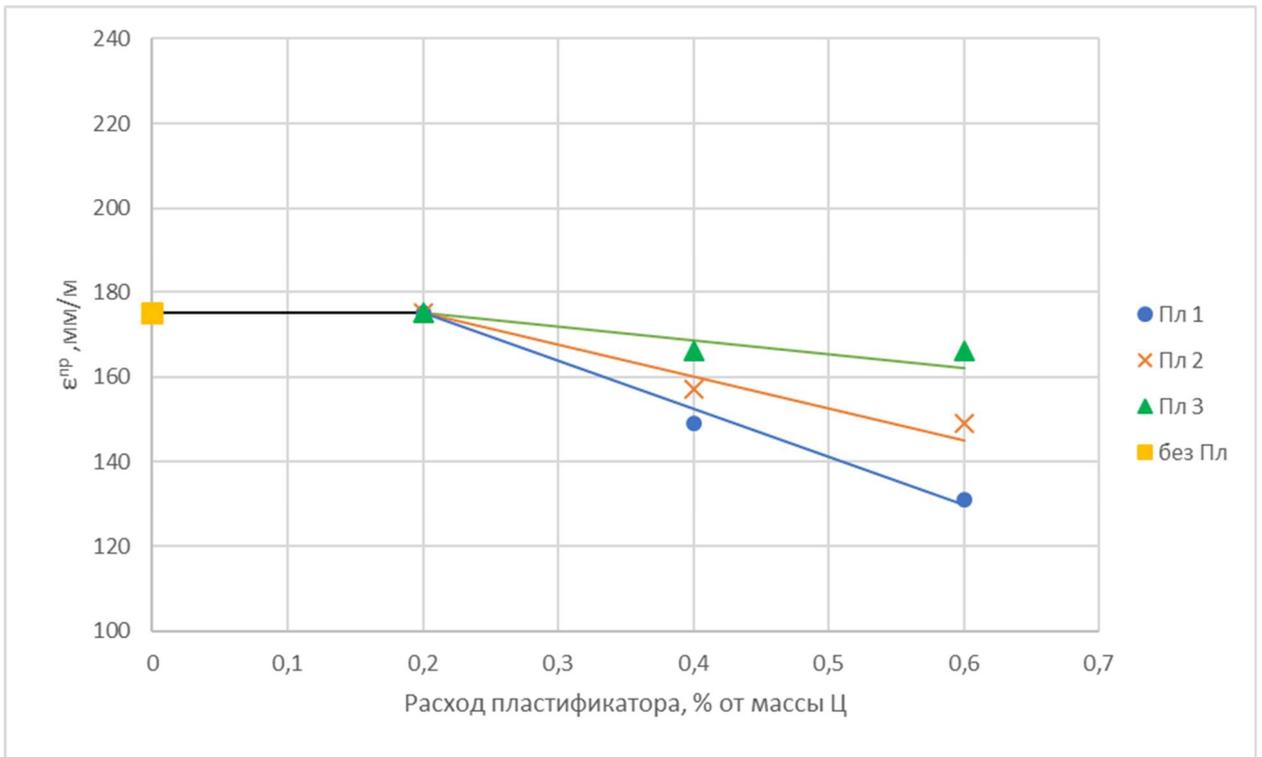


Рисунок 4.3 – Изменение предельной растяжимости бетонной смеси при введении пластификатора и соразмерном снижении В/Ц

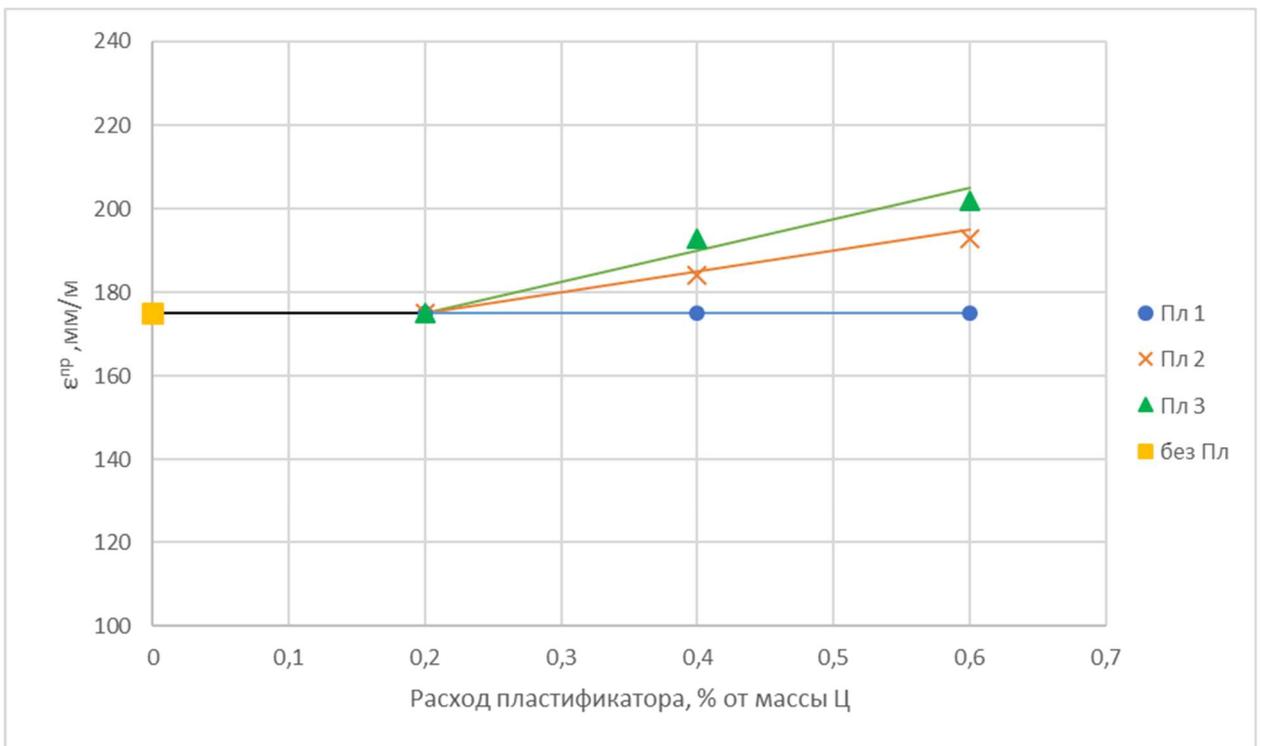


Рисунок 4.4 – Изменение предельной растяжимости бетонной смеси при введении пластификатора и соразмерном снижении расхода цемента

Анализируя результаты, полученные при испытании первой группы составов, можно заключить:

1) Необходимость компенсировать изменение подвижности появляется только при увеличении расхода пластификатора свыше 0,2 %, при этом предельная растяжимость тоже остается неизменной при малых расходах добавки;

2) С увеличением расхода пластификатора и соразмерном снижении В/Ц наблюдается устойчивое снижение предельной растяжимости бетонной смеси по линейному закону;

3) Степень снижения предельной растяжимости бетонной смеси отличается в зависимости от используемого пластификатора и находится в интервале 5...15 %.

Полученные выводы можно объяснить следующим механизмом. Пластифицирующая добавка обладает водоредуцирующей способностью, в зависимости от которой меняется и требуемое для получения заданной подвижности В/Ц. При введении добавки в смесь повышается ее предельная растяжимость и подвижность и появляется необходимость снизить В/Ц. При снижении В/Ц на требуемую величину в зависимости от водоредуцирующей способности пластификатора, подвижность смеси приводится к заданному значению, а предельная растяжимость падает. Величина падения предельной растяжимости зависит от водоредуцирующей способностей добавки, но как правило превышает прирост от пластифицирующей способности добавки.

Другими словами, можно заключить, что снижение предельной растяжимости от снижения В/Ц как правило больше, чем прирост предельной растяжимости от введения добавки, при условии сравнения равноподвижных смесей.

Анализируя результаты, полученные при испытании составов второй группы, можно наблюдать обратную картину. Введение пластификатора так же увеличивает предельную растяжимость и подвижность смеси. Однако, если компенсировать изменение подвижности не снижением В/Ц, а снижением

расхода цемента при постоянном В/Ц, в итоге будет наблюдаться прирост предельной растяжимости до 20 %. Очевидно, что при снижении расхода цемента снижается объемная доля цементного теста в смеси, однако степень влияния данного фактора на предельную растяжимость бетонной смеси оказалась ниже, чем степень влияния пластифицирующей добавки.

Известно, что при введении добавки и соразмерном снижении расхода цемента при постоянном В/Ц не будет происходить потери прочности бетона, а подвижность или жесткость смеси останутся приемлемыми [55]. В связи с чем можно сформулировать следующий способ повышения предельной растяжимости бетонной смеси без ухудшения других показателей качества: введение пластификатора и соразмерное снижение расхода цемента при постоянном В/Ц позволяют повысить предельную растяжимость бетонной смеси до 20 %, без потери прочности бетона и удобоукладываемости бетонной смеси.

#### **4.2.1.2 Улучшение пластичности бетонной смеси с помощью фибры**

В настоящее время все большее применение находят дисперсно армированные бетоны [96, 97], активные исследования свойств которых проводятся уже более пятидесяти лет. Сейчас принято считать, что дисперсное армирование оказывает огромное влияние на свойства бетона, а именно на прочность, трещиностойкость, истираемость, ударную вязкость, водонепроницаемость, морозостойкость и многие другие [95, 96, 97, 107]. Значимое улучшение эксплуатационных свойств бетона за счет введения различного рода волокон безусловно представляет научный интерес, однако, регулирование свойств бетонных смесей с помощью фибры как правило остается без внимания исследователей. Связанно это с выраженной сложностью описания и обобщения зависимости реологических свойств фибробетонной смеси от расхода и свойств волокон.

Сегодня известно [68], что при введении в бетонную смесь волокон меняется главным образом ее статическая вязкость, что выражается существенным снижением подвижности, при этом смесь приобретает большую тиксотропность, что в конечном итоге позволяет ее укладывать и уплотнять в схожих с неармированными смесями условиях.

Увеличение статической вязкости с точки зрения технологий непрерывного безопалубочного формования не представляется проблемой, а наоборот, позволяет свежееотформованному изделию лучше сопротивляться деформированию под собственным весом. Однако избыток вязкости позволяет добавить в бетонную смесь пластификатор, воду или другой разжижающий компонент, с введением которых, как установлено ранее, повышается предельная растяжимость.

Для проверки данного предположения были разработаны и испытаны равноподвижные составы бетонных смесей с использованием широкого набора армирующих волокон (таблица 4.2, рисунок 4.5) при их различном расходе. Выбор волокон осуществлялся исходя из доступности на рынке РФ и необходимости рассмотреть волокна различной химической природы, модуля упругости, размера и формы. Компенсация потери подвижности, относительно контрольного состава, производилась при помощи добавления воды. Для каждого состава определялась предельная растяжимость и погружение конуса СтройЦНИЛа (ПК, мм). Полученные данные представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.6.

Как видно из результатов, гипотеза подтверждается экспериментальными данными лишь частично. В некоторых случаях наблюдается снижение предельной растяжимости (составы №№ 4.21, 4.23, 4.29), а в некоторых степень изменения не зависит от процента армирования (составы №№ 4.27, 4.28). Вызвано это может быть следующими причинами: сложность определения подвижности фибробетонной смеси по погружению конуса СтройЦНИЛа, размер волокон может превышать глубину погружения или диаметр стандартного конуса; специфичный характер влияния некоторых

видов волокон на реологию смеси. Такие результаты позволяют говорить о необходимости проведения более глубоких исследования реологических свойств фибробетонных смесей, совершенствовать методологию их изучения, развивать представления о влиянии природы волокон, их формы, поверхности, размера и других факторов на свойства бетонной смеси.

Таблица 4.2 – используемая в исследованиях фибра

| Наименование волокон                   | Длина /условный диаметр, мм | Химическая природа | Структурный уровень | Форма    | Поверхность |
|--|-----------------------------|--------------------|---------------------|----------|-------------|
| Рубленная проволока                    | 45/0,8                      | сталь              | макро               | прямая   | гладкая     |
| Фибра «Беларусь»                       | 20/0,2                      | сталь              | макро               | волновая | гладкая     |
| <i>Durus S500</i>                      | 48/0,7                      | полипропилен       | макро               | прямая   | шероховатая |
| <i>Fibrin XT</i>                       | 12...20/0,022               | полипропилен       | микро               | прямая   | гладкая     |
| Волновая рубленная синтетическая фибра | 40/0,8                      | полиэтилен         | микро               | волновая |             |



Рисунок 4.5 – используемые в исследовании армирующие волокна: 1 – волновая рубленная синтетическая фибра; 2 – *Fibrin XT*; 3 – фибра «Беларусь»; 4 – *Durus S500*; 5 – рубленная проволока.

Таблица 4.3 – Предельная растяжимость равноподвижных составов фибробетонных смесей

| № состава б/с | Используемые волокна                   | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      |                   | В/Ц, % | ПК, мм | ε <sup>пр</sup> , мм/м |
|---------------|--|---|-------|------|-------------------|--------|--------|------------------------|
|               |  | цемент                                      | песок | вода | процент ар-ния, % |        |        |                        |
| 4.20          | без фибры                              | 551   | 1376  | 223  | 0                 | 40     | 44     | 193                    |
| 4.21          | Fibrin XT                              | 556   | 1389  | 255  | 0,2               | 46     | 42     | 184                    |
| 4.22          |  | 539   | 1349  | 280  | 0,4               | 52     | 44     | 265                    |
| 4.23          | Durus S500                             | 551   | 1378  | 240  | 0,6               | 44     | 45     | 184                    |
| 4.24          |  | 547   | 1366  | 252  | 1,2               | 46     | 41     | 211                    |
| 4.25          | волновая рубленная синтетическая фибра | 555   | 1387  | 233  | 0,6               | 42     | 42     | 247                    |
| 4.26          |  | 553   | 1381  | 246  | 1,2               | 44     | 43     | 202                    |
| 4.27          | стальная волновая фибра «Беларусь»     | 558   | 1396  | 238  | 0,6               | 43     | 45     | 211                    |
| 4.28          |  | 541   | 1352  | 264  | 1,2               | 49     | 44     | 211                    |
| 4.29          | рубленная проволока                    | 555   | 1388  | 235  | 0,6               | 42     | 41     | 184                    |
| 4.30          |  | 537   | 1342  | 250  | 1,2               | 47     | 41     | 238                    |

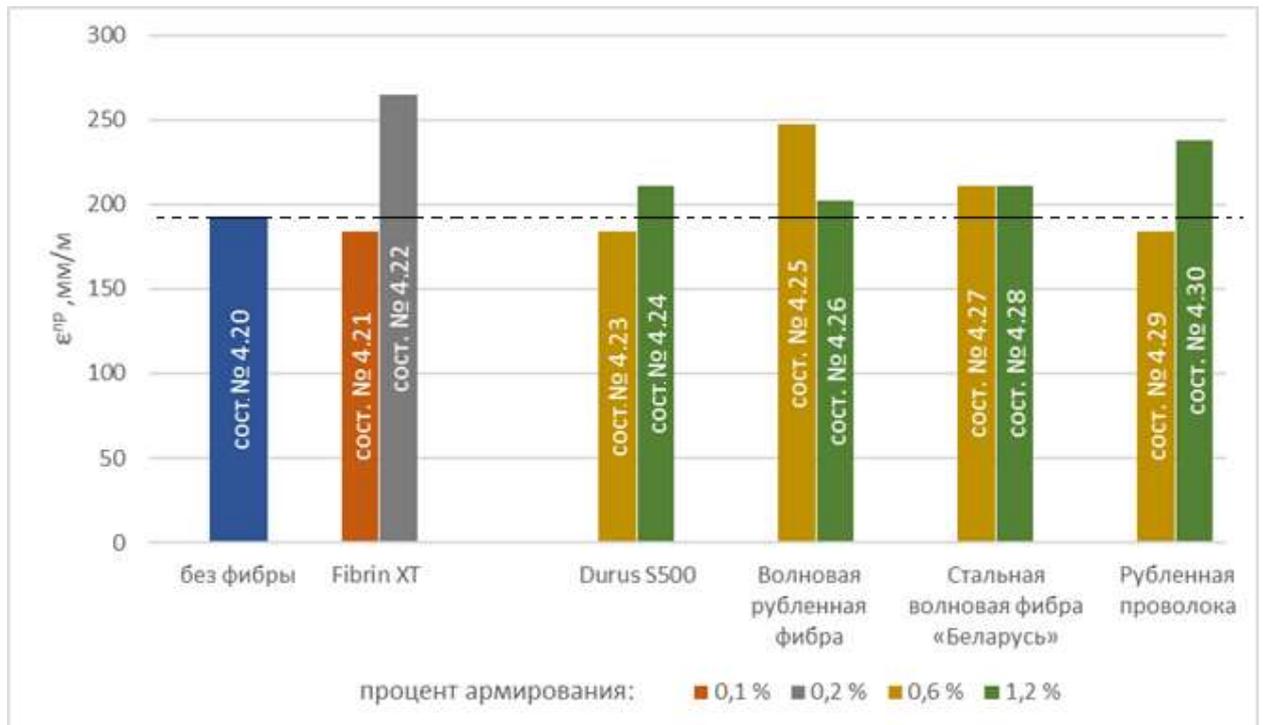


Рисунок 4.6 – предельная растяжимость в б/с в зависимости от типа и расхода армирующих волокон

Тем не менее, можно с уверенностью утверждать, что при введении в смесь волокон и, как следствие, повышения статической вязкости, возможно

улучшить ее пластичность введя разжижающий компонент, такой как воду. При этом повышения предельной растяжимости оказывается значимым, на примере составов №№ 4.22, 4.25, 4.30 она возрастает на 23...38 % по отношению к контрольному. Безусловно, введение дополнительной воды может негативно сказаться на прочностных характеристиках, поэтому подбирать разжижающий компонент необходимо для каждого вида волокон индивидуально, что не целесообразно в данном исследовании. Однако, уместно рассмотреть данный способ повышения пластичности на одном виде волокон более подробно.

Так как наилучшую пластичность удалось достичь при армировании смеси волокнами *Fibrin XT*, они и используются для более подробной проверки способа повышения пластичности без ущерба подвижности бетонной смеси и прочности бетона. Для этого были разработаны равноподвижные составы смесей с использованием данных волокон. При этом было выбрано два пути компенсации потери подвижности относительно контрольного состава. Первая группа составов отличается постоянным расходом воды, в качестве разжижающего компонента выступает пластифицирующая добавка ПЛ 2. Во второй группе составов напротив, производилось разжижение с помощью дополнительной воды. Для всех полученных составов определены: глубина погружения конуса (ПК, мм); предельная растяжимость, предел прочности на растяжение при изгибе по [9] ( $R_{изг}$ , МПа); предел прочности при сжатии по [9] ( $R_{сж}$ , МПа). Полученные данные представлены в таблице 4.4 и на рисунках 4.7 – 4.9.

Как видно из результатов, при введении волокон в смесь и увеличении их расхода, устойчивый прирост предельной растяжимости по линейному закону наблюдается как при компенсации потери подвижности водой, так и пластификатором. Однако, эффективность воды, как разжижающего компонента с точки зрения пластичности выше, угловой коэффициент составляет 251 против 80 при использовании в качестве компенсатора потери подвижности пластификатора. Несмотря на то, что наибольшее увеличение

предельной растяжимости составило 57 %, превышение расхода волокон отметки 0,2 % по объему сопровождалось нарушением однородности смеси и трудностями при определении ее подвижности. С точки зрения однородности бетонной смеси лучшим процентом армирования следует считать 0,2 %.

Таблица 4.4 – Предельная растяжимость равноподвижных фибробетонных смесей с использованием волокон *Fibrin XT*

| № состава | Разжижающий компонент | Расход материалов на м <sup>3</sup> б/с, кг |       |      |                   |            | ПК, мм | ε <sup>пр</sup> , мм/м | R <sub>изг</sub> , МПа | R <sub>сж</sub> , МПа |
|-----------|-----------------------|---|-------|------|-------------------|------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|
|           |                       | цемент                                      | песок | вода | процент ар-ния, % | Пл, % от Ц |        |                        |                        |                       |
| 4.31      | –                     | 495   | 1485  | 234  | 0                 | 0,3        | 55     | 180                    | 6                      | 41,8                  |
| 4.32      | Пл 2                  | 483   | 1448  | 228  | 0,1               | 0,4        | 52     | 193                    | 6,1                    | 44,7                  |
| 4.33      |                       | 482   | 1446  | 228  | 0,2               | 0,5        | 56     | 211                    | 6,5                    | 45,2                  |
| 4.34      |                       | 483   | 1449  | 228  | 0,3               | 0,65       | 53     | 211                    | 6,6                    | 45                    |
| 4.35      |                       | 458   | 1375  | 217  | 0,4               | 0,8        | 54     | 211                    | 6,5                    | 44,8                  |
| 4.36      | вода                  | 476   | 1429  | 240  | 0,1               | 0,3        | 55     | 220                    | 5,8                    | 40,7                  |
| 4.37      |                       | 468   | 1405  | 271  | 0,2               | 0,3        | 52     | 247                    | 5,2                    | 35,1                  |
| 4.38      |                       | 462   | 1386  | 282  | 0,3               | 0,3        | 55     | 265                    | 5,3                    | 34,2                  |
| 4.39      |                       | 452   | 1355  | 298  | 0,4               | 0,3        | 56     | 283                    | 5,2                    | 27,2                  |

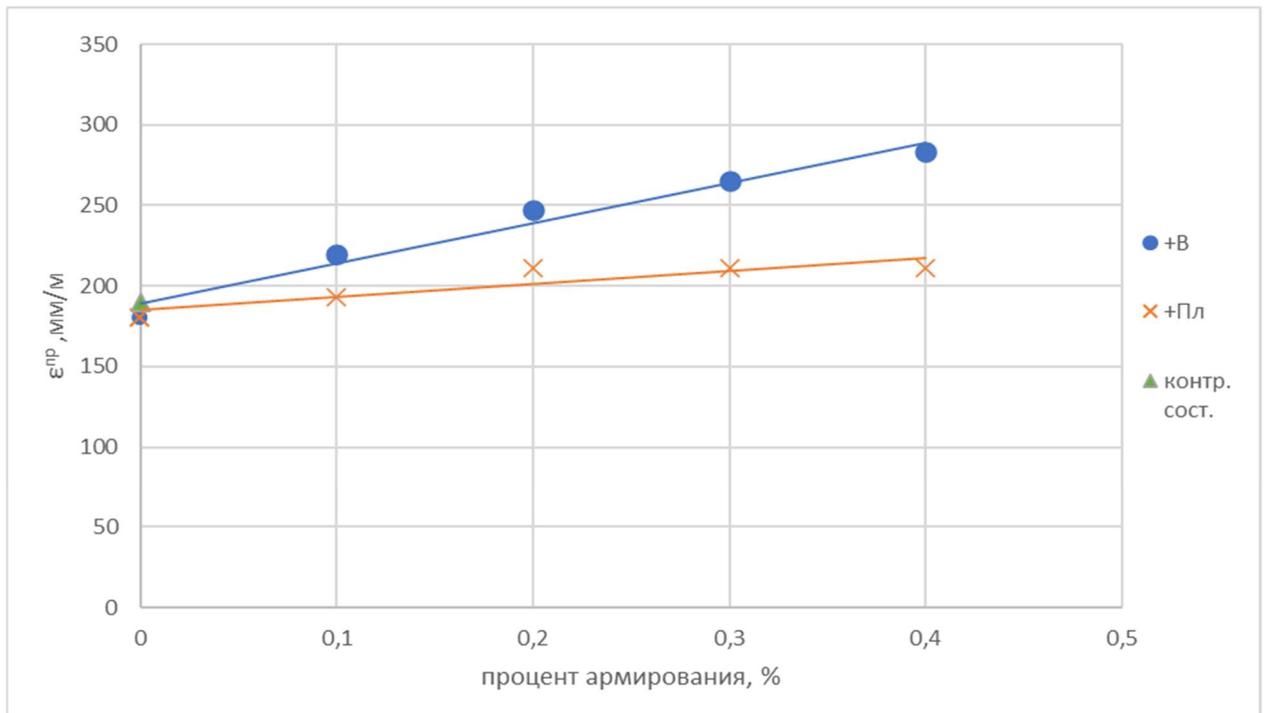


Рисунок 4.7 – Зависимость предельной растяжимости смеси от расхода фибры

Как и следовало ожидать, с увеличением расхода волокон, сопровождающегося введением дополнительной воды, наблюдается стабильное снижение прочностных характеристик композита. Предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе снижается по линейному закону с угловыми коэффициентами  $-35,7$  и  $-2,1$  соответственно, что без сомнений связано с введением дополнительной воды затворения.

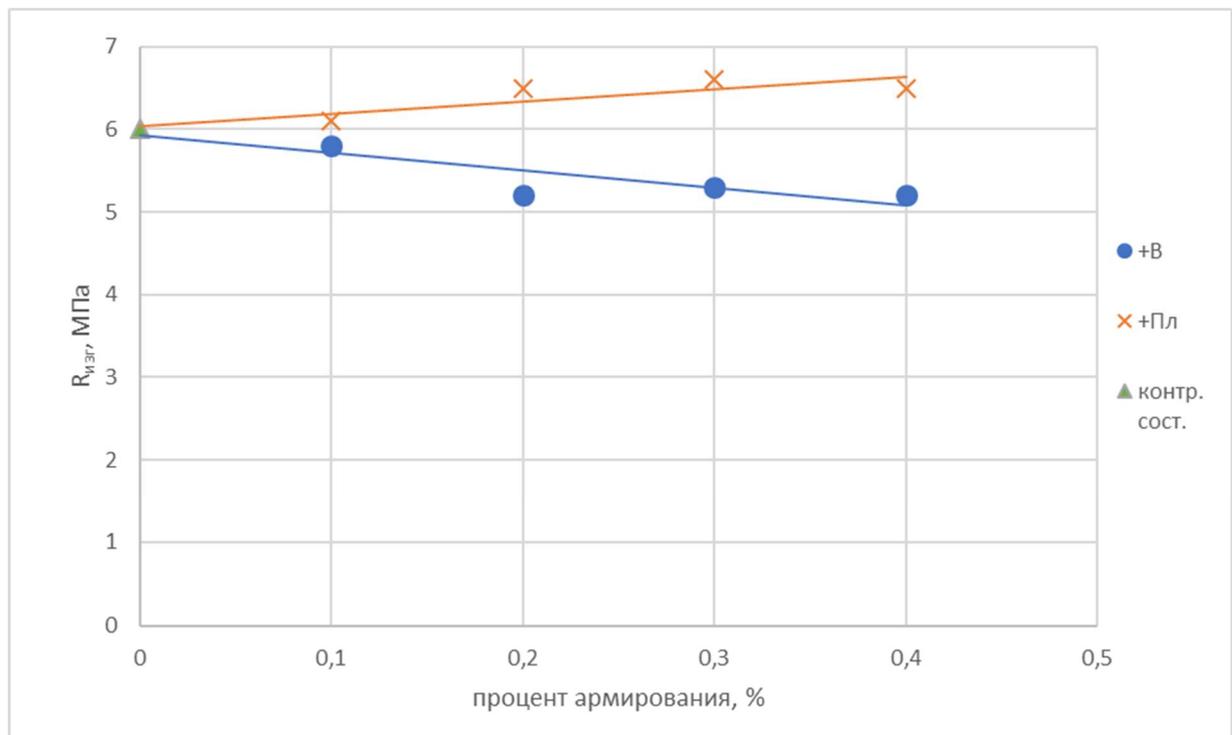


Рисунок 4.8 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от расхода армирующих волокон

В тоже время, при увеличении расхода волокон, сопровождающегося введением дополнительного пластификатора наблюдается стабильный линейный рост предела прочности при сжатии и предела прочности на растяжение при изгибе с угловыми коэффициентами  $6,3$  и  $1,5$  соответственно. Как известно, низко модульные волокна, в том числе синтетические, не должны приводить к упрочнению композита, однако, современные исследования [66, 71] показали, что высокая степень дисперсности таких

волокон создает дополнительную площадь контактных зон, которые как известно отличаются повышенной плотностью и прочностью, что и приводит к незначительному росту физико-механических характеристик.

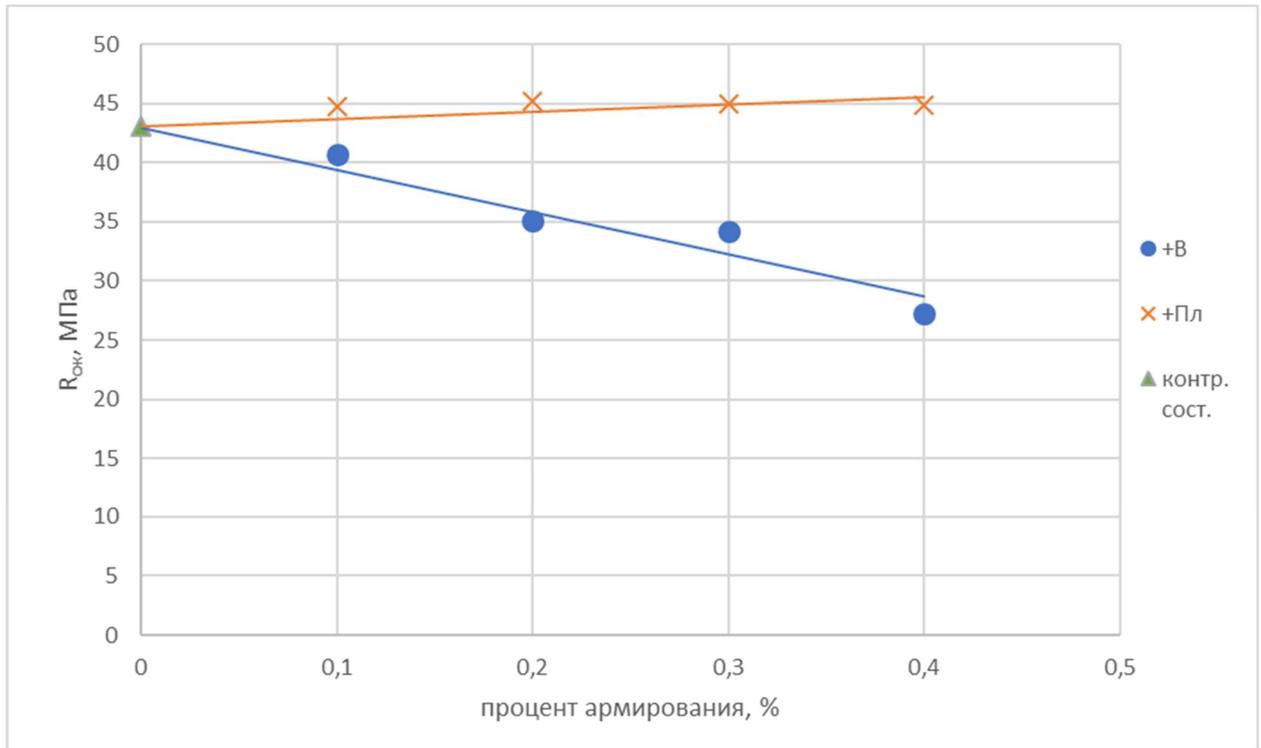


Рисунок 4.9 – Зависимость предела прочности при сжатии от расхода армирующих волокон

Резюмируя вышеизложенное, совершенно очевидно, что с точки зрения пластических свойств в качестве разжижителя эффективнее использовать воду, нежели пластификатор, однако вода существенно снижает прочность, в то время как с введением пластификатора напротив, прочность возрастает. Это означает, что есть оптимальная зона, при которой прочность будет оставаться неизменной относительно контрольного состава, а пластичность будет возрастать сильнее чем при использовании пластификатора, но слабее чем при использовании воды. Другими словами, для достижения наилучшего результата, в качестве разжижающего компонента следует использовать и воду, и пластификатор в соотношении, которое позволит сохранить прочностные характеристики на заданном уровне, для чего была произведена оптимизация состава путем подбора наилучшей пропорции между

дополнительной водой и пластификатором при объеме армирования 0,2 %. Результаты оптимизации представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнение контрольного и оптимизированного составов

| Показатель                                  |   | Состав № 4.31<br>(контрольный) | Состав № 4.40<br>(оптимизированный) |
|---|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| расход<br>компонентов                       | цемент, кг на м <sup>3</sup> б/с                      | 495                            | 480                                 |
|   | песок, кг на м <sup>3</sup> б/с                       | 1485                           | 1430                                |
|   | вода, кг на м <sup>3</sup> б/с                        | 234                            | 245                                 |
|   | Пластификатор (Макромер П-163),<br>% от массы цемента | 0,3                            | 0,45                                |
|   | фибра, % от объема смеси                              | 0                              | 0,2                                 |
| плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> |   | 2215                           | 2157                                |
| плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>         |   | 2202                           | 2145                                |
| ПК, мм                                      |   | 55                             | 54                                  |
| $\varepsilon^{\text{пр}}$ , мм/м            |   | 180                            | 225                                 |
| $R_{\text{изг}}$ , МПа                      |   | 6                              | 6,1                                 |
| $R_{\text{сж}}$ , МПа                       |   | 41,8                           | 41,7                                |

В результате оптимизации за счет введение как дополнительной воды (В/Ц увеличено с 47,2 % до 51 %), так и пластификатора (расход пластификатора увеличен с 0,3 % до 0,45 %), удалось сохранить заданную подвижность смеси и заданные прочностные показатели и значительно улучшить пластические свойства смеси, увеличив ее предельную растяжимость на 44 мм/м (на 25 %). Несмотря на введение дополнительных дорогостоящих компонентов, таких как фибра и пластификатор, наблюдается снижение расхода заполнителя и цемента, что вызвано понижением плотности бетонной смеси и увеличение ее коэффициента выхода. Простая экономическая оценка по усредненным ценовым показателям говорит об увеличении стоимости кубического метра смеси на 278 рублей (с 3121 руб. до 3399 руб.). Другими словами, при увеличении стоимости на 9 %, удалось добиться повышения предельной растяжимости на 25 %. Но следует отметить, что главный экономический эффект при использовании смесей повышенной пластичности заключается не в изменении себестоимости самой смеси, а снижении количества дефектов и снижении процента бракованной продукции,

что сложно оценить, не прибегая к длительному наблюдению на действующем производстве.

#### 4.2.2 Рекомендации по корректировке состава бетона

Помимо расчетной части, подбор состава бетона обязательно включает экспериментальную, в которую входит испытание расчетного состава и при необходимости его корректировка. Поскольку методы корректировки состава для получения заданной прочности хорошо известны [55], рассмотрим те случаи, где расчетный состав позволил ее обеспечить.

При условии обеспечения заданной прочности, результаты экспериментальной проверки расчетных составов могут быть следующими:

1) Предельная растяжимость бетонной смеси не меньше заданной, подвижность или жесткость удовлетворяют требованиям технологической линии. Корректировка состава не требуется;

2) Предельная растяжимость бетонной смеси меньше заданной, подвижность или жесткость удовлетворяют требованиям технологической линии. Требуется корректировка состава в сторону улучшения пластичности, но сохранения удобоукладываемости;

3) Предельная растяжимость бетонной смеси ниже заданной, подвижность ниже заданной (жесткость выше). Требуется корректировка состава в сторону улучшения пластичности и удобоукладываемости;

4) Предельная растяжимость бетонной смеси не меньше заданной, подвижность ниже заданной (жесткость выше). Требуется корректировка состава в сторону улучшения удобоукладываемости;

5) Предельная растяжимость меньше заданной, подвижность больше заданной (жесткость меньше). Требуется корректировка в сторону снижения подвижности (повышения жесткости) и увеличения пластичности.

Единственный эффективный инструмент корректировки реологии смеси с сохранением заданной прочности бетона, без использования добавок и

введения новых компонентов заключатся в регулировании  $\varphi^{ЦТ}$  при постоянном В/Ц. Главная проблема применения данного инструмента заключается в том, что с увеличением  $\varphi^{ЦТ}$  возрастает и  $\varepsilon^{пр}$ , и ОК (или снижается жесткость), что может быть полезно только в ограниченном ряде случаев (3 и 4 из перечисленных выше). В случаях, когда нельзя снижать  $\varepsilon^{пр}$  за счет снижения  $\varphi^{ЦТ}$ , или требуется снизить ОК и одновременно повысить  $\varepsilon^{пр}$ , такой рецептурный инструмент не применить, требуется введение добавок или новых компонентов, как например в пункте 4.1 диссертации.

Рекомендации по корректировке состава при условии обеспечения заданной прочности представлены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Рекомендации по корректировке состава бетона при условии обеспечения заданной прочности

|                    |                         | Подвижность (жесткость)                   |  |   |
|--------------------|-------------------------|---|--|---|
|                    |                         | ниже (выше) требуемой                     | соответствует требуемой                          | выше (ниже) требуемой                   |
| $\varepsilon^{пр}$ | выше требуемой          | Увеличить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const | Корректировка не требуется                       | Снизить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const |
|                    | соответствует требуемой | Увеличить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const | Корректировка не требуется                       | Снизить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const |
|                    | ниже требуемой          | Увеличить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const | улучшить пластичность по пункт 4.2.1 диссертации | Снизить $\varphi^{ЦТ}$ ,<br>В/Ц = const |

Важно отметить, что после корректировки состава по таблице 4.6 обязательно произвести очередную экспериментальную проверку, и в ряде случаев обязательно повторно воспользоваться рекомендациями.

Например, если подвижность расчетного состава выше требуемой, а пластичность соответствует заданной, то по таблице 4.5 необходимо снизить  $\varphi^{ЦТ}$ , после чего откорректированный состав будет соответствовать заданной подвижности, но не будет достаточно пластичным. По этому необходимо повторно воспользоваться таблицей 4.5, по которой теперь будет необходимо применить один из двух способов улучшения пластичности с сохранением заданной удобоукладываемости и прочности, описанных в пункте 4.1 диссертации. Только после повторного применения рекомендаций, возможно будет обеспечить и пластичность, и подвижность смеси.

В случае, если при корректировке состава тяжелого бетона не удастся в достаточной степени повысить предельную растяжимость, рекомендуется использовать мелкозернистый бетон.

### **4.3 Общий алгоритм проектирования состава бетона с обеспечением заданной прочности, удобоукладываемости и пластичности, и пример его использования**

*Алгоритм проектирования состава бетона:*

1) Формирование технического задания, включающего в том числе минимальную прочность бетона, требуемую подвижность или жесткость и минимальное допустимое значение предельной растяжимости бетонной смеси, назначается которая исходя из условий формования, а именно ожидаемой величины относительных деформаций смеси;

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

3) Расчет состава по системе уравнений 4.8...4.11 для тяжелого бетона или 4.16...4.18 для мелкозернистого, например при помощи разработанной программы для ЭВМ (Приложение Ж) с получением расхода основных компонентов в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона;

4) Лабораторная проверка полученного состава и при необходимости его корректировка: при недостаточной прочности по [55]; при неудовлетворительной реологии по таблице 4.5;

5) Производственная проверка полученного состава бетонной смеси, его корректировка при необходимости по пункту 4 алгоритма и уточнение расходов основных компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси.

*Пример подбора состава бетона по описанному алгоритму:*

1) Задание: подобрать состав бетона с обеспечением следующих характеристик:

- прочность на сжатие в возрасте 28 суток ( $R_B$ , МПа) не ниже 50;
  - $\varepsilon^{np}$  не менее 150 мм/м;
  - подвижность смеси П1 (ОК = 1...3 см)
- 2) Использовать материалы, указанные в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – материалы для подбора состава бетона

| Показатель                          | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 N   |          |
| $R_{ц}$ , МПа                       | 52       |
| Нормальная густота, %               | 28,5     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>        | 3111     |
| Песок нормального зернового состава |          |
| Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>  | 2655     |
| Модуль крупности                    | 2,4      |
| Водопотребность, %                  | 6,4      |
| Щебень фракции 5-20                 |          |
| Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>  | 2698     |
| Водопотребность, %                  | 3,1      |

3) Осуществим расчет при помощи разработанной программы для ЭВМ, при этом зададимся  $r = 0,65$ , примем заполнители рядового качества ( $A = 0,6$ ) и получим следующий результат: Ц = 433 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона; П = 692; Щ = 1065; В = 206; плотность смеси 2396 кг/м<sup>3</sup>; В/Ц = 0,48.;

4) Осуществим экспериментальную проверку расчетного состава и его корректировку (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – экспериментальный этап подбора состава бетона

|  | Расчетный состав | Корректировка № 1 | Корректировка № 2 |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| Ц, кг                                    | 433              | 410               | 380               |
| П, кг                                    | 692              | 711               | 707               |
| Щ, кг                                    | 1065             | 1094              | 1088              |
| В, кг                                    | 206              | 195               | 182               |
| В/Ц                                      | 0,48             | 0,48              | 0,48              |
| Пластификатор, % от Ц                    | 0                | 0                 | 0,4               |
| Расчетная плотность, кг/м <sup>3</sup>   | 2396             | 2410              | 2358              |
| Фактическая плотность, кг/м <sup>3</sup> | 2355             | 2368              | 2371              |
| $R_B$ , МПа                              | 53,3             | 54,1              | 53,8              |
| $\varepsilon^{np}$ , мм/м                | 157              | 131               | 157               |
| ОК, см                                   | 10               | 3                 | 2                 |

Расчетный состав не позволил обеспечить заданную подвижность, в связи с чем была произведена первая корректировка по таблице 4.5, а именно снижена доля цементного теста в смеси с сохранением В/Ц. Полученный состав позволил обеспечить заданную подвижность но обладает недостаточной пластичностью, а значит по таблице 4.5 требуется применение одного из двух способов улучшения пластичности, а именно введение пластификатора (в данном примере Макромер П-163) и понижение расхода цемента при постоянном В/Ц. После второй корректировки удалось выполнить техническое задание.

5) Производственная проверка лабораторного состава подробно описана в пятой главе диссертации. Для данного примера только уточним расходы материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона. Фактическая плотность смеси выше расчетной, а значит объем смеси при указанных расходах составит меньше 1 м<sup>3</sup>, а именно 0,99 м<sup>3</sup>, поэтому фактический состав на кубометр после второй корректировки будет следующий:

- Ц = 382 кг;
- П = 711 кг;
- Щ = 1094 кг;
- В = 183 кг.

Таким образом осуществлен подбор состава бетона с обеспечением заданной прочности, подвижности и пластичности.

#### **Выводы по четвертой главе**

1) При введении в бетонную смесь пластификатора и соразмерном снижении водоцементного отношения не будет наблюдаться улучшения ее пластических свойств, а в некоторых случаях возможно и их ухудшение;

2) За счет введения в бетонную смесь пластификатора и соразмерного снижения расхода цемента возможно увеличить ее предельную растяжимость на 20...30 % без ухудшения удобоукладываемости смеси и прочности бетона;

3) Дисперсное армирование может быть эффективным инструментом регулирования пластичности бетонной смеси, за счет армирования увеличивается статическая вязкость, что позволяет ввести в смесь разжижающий компонент, который способен повысить предельную растяжимость до 40 %;

4) Введение микросинтетической фибры позволяет повысить предельную растяжимость бетонной смеси на 25 % без ухудшения ее удобоукладываемости и прочности бетона, но требует производить компенсацию потери подвижности за счет и воды, и пластификатора, с подбором оптимальной пропорции между ними;

5) На основе проведенных исследований разработан алгоритм подбора состава бетона с обеспечением заданных прочности, пластичности и подвижности (жесткости), включающий расчетную часть на основе полученных в исследовании зависимостей и применение разработанной программы для ЭВМ, а также рекомендации по корректировке состава, в том числе с помощью разработанных способов улучшения пластичности.

## **5. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

### **5.1 Анализ технологической линии по выпуску предварительно напряженных плит пустотного настила непрерывным безопалубочным способом**

Устранение дефектов, таких как трещины, возникающих в процессе непрерывного безопалубочного формования бетонных и железобетонных изделий, за счет увеличения пластических свойств смеси возможно только в тех случаях, где причиной дефектов является недостаток пластичности. Сегодня существует множество различных способов непрерывного безопалубочного формования, каждый из которых представлен различными технологическими линиями от различных производителей. Широкая номенклатура изделий, специфика местного сырья, особенности работы каждого станка в отдельности и многие другие причины лежат в основе многообразия возможных проблем при формовании, которые так или иначе связаны с процессом трещинообразования свежеуложенной бетонной смеси.

В связи с этим, прежде чем приступать к регулированию пластических свойств смеси, необходимо изучить конкретный производственный случай и достоверно установить причину трещинообразования. И только в том случае, если причина заключается в деформировании смеси, которое невозможно или нецелесообразно избежать, следует рассматривать возможные способы повышения предельной растяжимости бетонной смеси.

Так на производственной площадке ООО «Поляр Инвест» в городе Всеволожск при выпуске предварительно напряженных плит пустотного настила по технологии непрерывного безопалубочного формования в 2019 году участились случаи растрескивания изделий и обрушения полков плиты сразу после укладки и уплотнения бетонной смеси. Как видно на рисунке 5.1,

обрушение полок происходит в существенных объемах, что оголяет напрягаемую арматуру. Помимо этого, данные обрушения носят непредсказуемый характер, но возникают как правило в характерных точках стенда.



Рисунок 5.1 – Обрушение полок свежесформованной предварительно напряженной плиты пустотного настила

Технологическая линия по выпуску данных изделий представляет собой 7 стендов длиной 80 метров и шириной 1,2 метра каждый. По торцам стенда расположены упоры для натяжения арматурных канатов при помощи гидродомкрата. По краям стенда вдоль его длины расположены рельсы, для перемещения бетоноукладчика и распилочной машины. Бетонная смесь поступает в формовочный цех из БСУ при помощи ленточного транспортера, отгружается в кубель вместимостью  $1,5 \text{ м}^3$ , и при помощи кран-балки подается в расходный бункер бетоноукладчика. Бетоноукладчик оснащен вибратором и пустотообразователем на кулачковом механизме, которые позволят укладывать и уплотнять жесткую бетонную смесь, а также заглаживающей рейкой, которая позволяет создать гладкую поверхность на верхней стороне плиты.

Возникающие в процессе формования дефекты влекут за собой множество издержек, которые связаны не только с дополнительными материальными затратами из-за высокого процента бракованной продукции, но и с существенным осложнением подбора раскроя и организации процесса распила плиты на изделия заданной длины. Помимо этого, неравномерное оголение напрягаемых канатов провоцирует неравномерное изменение геометрии изделия после отпуска напряжений, что может оказывать влияние на несущую способность плит и на безопасность зданий и сооружений.

Осмотр данной линии позволил установить следующий механизм обрушений.

В результате механического и коррозионного износа стенов нарушена плотность прилегания металлических листов палубы к бетонному основанию, в результате чего, в некоторых характерных точках стенда можно наблюдать зазор между палубой и основанием (рисунок 5.2 а). При прохождении бетоноукладчика через данное сечение стенда (рисунок 5.2 б) при укладке и уплотнении бетонной смеси осуществляется значительное механическое воздействие, возникает давление, под действием которого прогибается стальной лист палубы и восстанавливает прилегание к бетонному основанию. По мере удаления бетоноукладчика от данного сечения нагрузка на палубу ослабевает, после чего стальной лист возвращается в первоначальное устойчивое положение. При этой возвратной деформации механическое воздействие оказывается уже на бетонную смесь, сопротивляться которому она не способна. Сечение изделия меняет свою форму, выгибается и на верхней поверхности возникают деформации растяжения (рисунок 5.2 в). В результате растяжения верхней зоны плиты появляются трещины, которые ослабляют сечение плиты, что приводит к ее неспособности сохранять свою форму, как следствие, под действием собственного веса полки плиты обрушаются, провоцируя каскадное разрушение.

Первопричиной обрушения полок является износ стенда, и основная рекомендация для производства в таком случае осуществить ремонт. Следует

отметить, что ремонт стенов влечет за собой существенные экономические издержки, связанные не только с осуществлением ремонтных работ, закупкой материалов и прочего, что только по предварительной оценке специалистов составляет около 30 млн. рублей, но и остановкой формовочного цеха на длительное время, простаиванием производственных площадей, потерей клиентов и т.д.

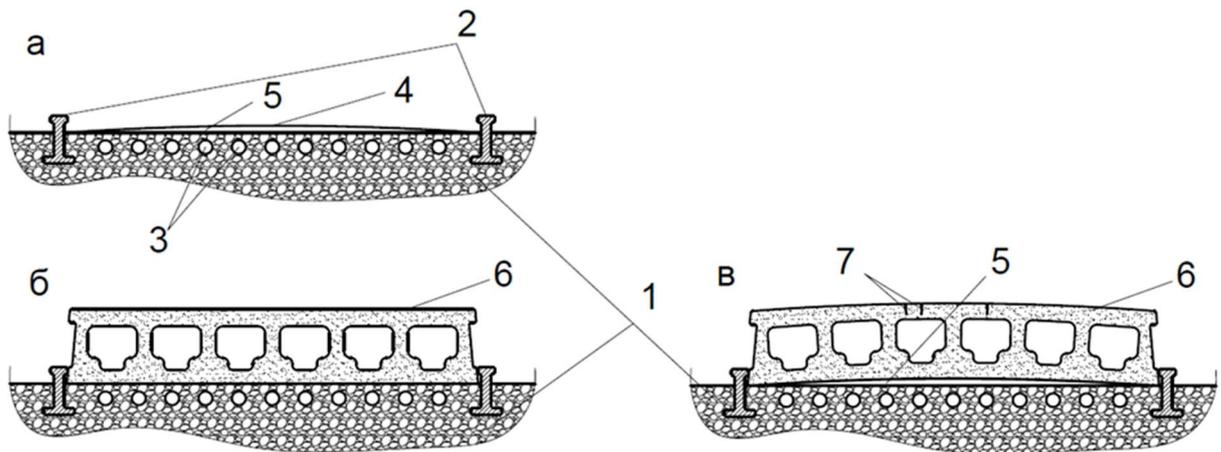


Рисунок 5.2 – схема дефектного поперечного сечения стенов: а) до формирования; б) в момент прохождения бетоноукладчика через сечение; в) после отдаления бетоноукладчика от сечения:

1 – бетонное основание; 2 – рельсы; 3 – трубопровод системы отопления стенов; 4 – стальной лист палубы стенов; 5 – зазор между листом палубы стенов и бетонным основанием; 6 – отформованное изделие; 7 - трещины

Так же данную проблему возможно решить за счет улучшения пластических свойств бетонной смеси. При достаточном повышении предельной растяжимости смеси не будет происходить образования трещин на верхней поверхности плиты при ее деформировании, а значит не будет ослабевать ее сечение и не будет происходить обрушение полок.

Для анализа используемого на производстве состава бетонной смеси были произведены отбор и испытания сырьевых материалов (таблица 5.1), установлены требования к бетонной смеси и бетону и испытан заводской состав (таблица 5.2).

Таблица 5.1 – Используемые на производстве сырьевые материалы

| Показатель                                 | Значение   |
|--|------------|
| ЦЕМ I 42,5 Н                               |            |
| НГ, %                                      | 29,0       |
| Водоотделение, %                           | 16,4       |
| Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг   | 334        |
| Прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа  | 22,4       |
| Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа | 53,3       |
| Песок                                      |            |
| Модуль крупности                           | 2,5        |
| Группа песка                               | крупный    |
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>      | 1570       |
| Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>         | 2693       |
| Водопотребность, %                         | 6,1        |
| Щебень                                     |            |
| Гранулометрический состав                  | фр. 5 – 10 |
| Марка по дробимости                        | 1400       |
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>      | 1350       |
| Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>         | 2704       |
| Водопотребность, %                         | 3,5        |

Таблица 5.2 – Используемый на производстве состав бетонной смеси (контрольный) и требуемые показатели качества

| Показатель   | Значение | Требуемое значение |
|--|----------|--------------------|
| Расход цемента на м <sup>3</sup> бетона, кг                        | 440      | -                  |
| Расход песка на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 960      | -                  |
| Расход щебня на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 850      | -                  |
| Расход воды на м <sup>3</sup> бетона, кг                           | 193      | -                  |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 часов в условиях ускоренного твердения, МПа | 46,2     | не менее 45        |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 суток, МПа                                  | 59,1     | не менее 56        |
| Жесткость бетонной смеси, с  | 45       | 30 – 50            |
| Фактическая предельная растяжимость, мм/м                          | 70       | не менее 100       |
| Расчетная предельная растяжимость, мм/м                            | 74       |                    |

По оценки производителя относительные деформации растяжения бетонной смеси при возвратной деформации палубы стенда в дефектных точках составляют 80...100 мм/м, исходя из чего назначено минимальное требуемое значение предельной растяжимости бетонной смеси 100 мм/м.

Расчетное значение предельной растяжимости используемой на производстве бетонной смеси получено при помощи математической модели

пластичности по уравнению 5.1, и отличается от фактического значения, полученного по методике определения пластичности (пункт 2.4.4 диссертации), на величину примерно равной погрешности измерения.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon^{\text{пр}} &= 11,7 \cdot \left( \left( \frac{B}{C} - \frac{\Pi \cdot B_{\Pi} + \text{Щ} \cdot B_{\text{Щ}}}{C} \right) \cdot 100 - \text{НГ} \right) + \\
 &+ 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} - \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{Щ}}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 = \\
 &= 11,7 \cdot \left( \left( \frac{185}{440} - \frac{960 \cdot 0,061 + 850 \cdot 0,035}{440} \right) \cdot 100 - 29 \right) + \\
 &+ 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{960}{2693} - \frac{850}{2704} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 = 73,9 \left[ \frac{\text{мм}}{\text{м}} \right]
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Помимо вышесказанного, следует отметить следующие особенности используемого на производстве состава: высокий расход цемента; отсутствие пластифицирующей добавки; низкое водосодержание в смеси; высокие прочностные показатели бетона; использование бездобавочного цемента и рядовых заполнителей.

Резюмируя вышеизложенное можно заключить, что первопричиной обрушения полок плит пустотного настила при непрерывном безопалубочном формовании в рассмотренном случае является износ стенда, что приводит к деформированию бетонной смеси при формовании, растрескиванию верхней поверхности полок и ослаблению их сечения. Помимо этого, на производстве используется бетонная смесь, предельная растяжимость которой меньше минимального требуемого значения, что совместно с износом стенда может создавать условия для обрушения полок плиты. Исходя из чего сформулированы две рекомендации производителю данных изделий:

1) Осуществить капитальный ремонт стендов, для минимизации возможных деформаций смеси при формовании;

2) Откорректировать существующий состав бетона или подобрать новый с получением смеси, предельная растяжимость которой не менее 100 мм/м.

Поскольку осуществление капитального ремонта сопровождается существенными издержками, было принято решение в первую очередь повысить предельную растяжимость бетонной смеси для удовлетворения требования по пластичности.

## **5.2 Проектирование состава бетона для производства предварительно напряженных плит пустотного настила с использованием результатов лабораторных исследований**

В соответствии с предложенным алгоритмом подбора состава (пункт 4.2.4 диссертации) был осуществлен расчет состава бетона и его корректировка в лабораторных условиях. Требуемые характеристики бетонной смеси и бетона были назначены в соответствии с таблицей 5.2, при этом предельная растяжимость для расчета была назначена с 10 % запасом и составляла 110 мм/м. Для подбора состава использовались те же материалы, что и на производстве (таблица 5.1). Отношение расхода песка к расходу щебня принято равным 1,13, как и у контрольного состава. Расчет осуществлялся с помощью разработанной программы для ЭВМ (Приложение Ж).

Испытания расчетных и скорректированных составов производились в лабораторных условиях, для обеспечения достоверности результатов и их сходимости с производственными осуществлялось следующее:

- 1) Формовка образцов-кубов со стороной 10 сантиметров осуществлялась в течении 20 минут после затворения смеси;
- 2) Смесь уплотнялась на виброплощадке с использованием пригруза в течении 45 секунд;

3) После уплотнения образцы в формах помещались в климатическую камеру с температурой  $45 \pm 2$  °C и влажностью  $95 \pm 5$  %;

4) Образцы выдерживались 28 часов в климатической камере, затем распалубливались и испытывались на прочность при сжатии.

Корректность воспроизведенных условий была подтверждена сравнением характеристик контрольного состава, полученного на заводе и в лаборатории.

Корректировка расчетного состава осуществлялась в соответствии с рекомендациями (таблица 4.5) в два этапа:

1) Снижение доли цементного теста из-за недостаточной жесткости расчетного состава с получением состава № 4.1;

2) Введение пластифицирующей добавки и соразмерное снижение расхода цемента, из-за недостаточной пластичности состава № 4.1 с получением состава № 4.2.

Для повышения пластичности на втором этапе корректировки применялся пластификатор Макромер П-163 модифицированный гибридным углеродно-фуллероидным наноматериалом. Выбор добавки обусловлен необходимостью обеспечить высокую скорость набора прочности в ранние сроки твердения. Пластификаторы, как правило, снижают скорость набора прочности в раннем возрасте [52, 53, 60], однако их наномодификация позволяет купировать этот эффект, а в некоторых случаях, наоборот, ускорить процессы гидратации цементных минералов и, следовательно, набор прочности [57, 67, 72, 88, 89, 93, 94]. Однако не все добавки совместимы с наноматериалами и способный создавать вместе с ними устойчивую коллоидную систему, одной из самых пригодных для наномодификации добавок-пластификаторов сегодня является Макромер П-163, что и послужило причиной ее использования в данной работе.

Результаты расчета, испытаний и корректировок состава бетона представлены в таблице 5.3.

Полученный состав № 5.2 полностью удовлетворяет требуемым характеристикам, при этом в сравнении с контрольным составом, предельная растяжимость больше на 37 мм/м (на 52,8 %) и составляет 107 мм/м, что превышает минимальное допустимое значение для данной технологической линии, а значит полученный состав можно рекомендовать для непрерывного безопалубочного формования предварительно напряженных плит пустотного настила.

Таблица 5.3 – подбор состава бетона для формования плит пустотного настила

| Показатель   | Значение         |              |              |           |
|--|------------------|--------------|--------------|-----------|
|  | расчетный состав | состав № 5.1 | состав № 5.2 | требуемое |
| Расход цемента на м <sup>3</sup> бетона, кг                        | 471              | 438          | 370          |           |
| Расход песка на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 915              | 950          | 1005         |           |
| Расход щебня на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 810              | 841          | 892          |           |
| Расход воды на м <sup>3</sup> бетона, кг                           | 209              | 195          | 163          |           |
| Расход пластификатора, % от расхода цемента                        | 0                | 0            | 0,3          |           |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 часов в условиях ускоренного твердения, МПа | 45,5             | 46,7         | 47,0         | > 45      |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 суток, МПа                                  | 56,9             | 59,5         | 58,4         | > 56      |
| Жесткость бетонной смеси, с  | 12               | 47           | 43           | 30...50   |
| Предельная растяжимость, мм/м                                      | 113              | 87           | 107          | > 100     |

### 5.3 Выпуск опытно промышленной партии плит пустотного настила и оценка технико-экономической эффективности предложенных решений

Подбор состава бетона и его корректировка в лабораторных условиях заняли около 2-х месяцев времени, за которое произошло изменение свойств используемого на производстве сырья, главным образом изменился зерновой состава заполнителей. Это не позволило в полной степени воспроизвести лабораторные данные в производственных условиях, в связи с чем была произведена корректировка состава № 5.2 с получением состава № 5.3 (таблица 5.4). Основное изменение заключается в снижении  $r$  – отношения расхода песка к расходу щебня, с 1,13 до 0,99.

С использованием состава № 5.3 был осуществлен выпуск опытно промышленной партии предварительно напряженных плит пустотного настила по технологии непрерывного безопалубочного формования общим объемом 52 м<sup>3</sup>.

Таблица 5.4 – сравнение итогового и контрольного составов бетона для производства плит пустотного настила

| Показатель   | Значение           |                         |           |
|--|--------------------|-------------------------|-----------|
|  | контрольный состав | состав № 5.3 (итоговый) | требуемое |
| Расход цемента на м <sup>3</sup> бетона, кг                        | 440                | 380                     |           |
| Расход песка на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 960                | 940                     |           |
| Расход щебня на м <sup>3</sup> бетона, кг                          | 850                | 945                     |           |
| Расход воды на м <sup>3</sup> бетона, кг                           | 193                | 167                     |           |
| Расход пластификатора, % от расхода цемента                        | 0                  | 0,3                     |           |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 часов в условиях ускоренного твердения, МПа | 46,2               | 45,3                    | > 45      |
| $R_{сж}$ в возрасте 28 суток, МПа                                  | 59,1               | 63,5                    | > 56      |
| Жесткость бетонной смеси, с  | 45                 | 40                      | 30...50   |
| Предельная растяжимость, мм/м                                      | 70                 | 107                     | > 100     |

#### *Оценка технико-экономической эффективности*

При выпуске опытно промышленной партии с использованием состава № 5.3 осуществлялась визуальная оценка дефектности отформованных изделий. При этом отмечалось существенное снижение количества дефектов, в том числе и обрушений полок плиты. Достичь чего удалось за счет использования бетонной смеси предельной растяжимостью 107 мм/м, превышающей минимальное требуемое значение 100 мм/м. На некоторых участках стендов, вероятно наиболее дефектных, растрескивание плиты и обрушение ее полок сохранились, однако их число в общей массе дефектных точек составляет не более 10 %. Другими словами, за счет улучшения пластичности бетонной смеси удалось добиться снижения числа дефектов при непрерывном безопалубочном формовании плит пустотного настила на 90 %. Уместно предположить, что количество дефектов возможно снизить до 0, при использовании смесей с большей предельной растяжимостью, или осуществив капитальный ремонт стенда.

Экономическая оценка предложенного состава относительно контрольного (таблица 5.5) показала снижение материальной стоимости смеси на 2 %. Однако главный экономический эффект заключается в снижении прямых издержек, связанных с материальными затратами на выпуск бракованной продукции, и косвенных, связанных с осложнением подбора раскроя и организации процесса распила массива на изделия заданной длины, что существенно повышает трудозатраты и понижает производительность производства. Оценить точную величину такого экономического эффекта без наблюдения за предприятием в течении длительного времени нет возможности, однако можно с уверенностью констатировать факт его наличия.

Таблица 5.5 – сравнение материальной стоимости контрольного и итогового составов

| Показатель   | Цена на 06.2019 | Контрольный состав         | Состав № 5.3                 |
|--|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| Цемент, руб.   | 4850 за т       | $0,44 \cdot 4850 = 2134$   | $0,37 \cdot 4850 = 1794,5$   |
| Песок, руб.  | 405 за т        | $0,96 \cdot 405 = 388,8$   | $0,94 \cdot 405 = 380,7$     |
| Щебень, руб.   | 1190 за т       | $0,85 \cdot 1190 = 1011,5$ | $0,945 \cdot 1190 = 1124,55$ |
| Пластикатор, руб.                                    | 160 за кг       | 0                          | $1,11 \cdot 160 = 3477,35$   |
| Материальная стоимость 1 м <sup>3</sup> бетона, руб. |                 | <b>3534,3</b>              | <b>3477,35</b>               |
| Экономический эффект по мат. стоимости, руб.         |                 |                            | <b>57</b>                    |
| Экономический эффект по мат. стоимости, %            |                 |                            | <b>2</b>                     |

### Выводы по пятой главе

1) При производстве предварительно напряженных плит пустотного настила непрерывным безопалубочным способом с использованием бетонной смеси с предельной растяжимостью меньшей, чем относительные деформации растяжения, возникающих в процессе формования, наблюдается значительное число дефектов, в том числе обрушений полок плиты;

2) С использованием предложенного в диссертации алгоритма подбора состава бетона, удалось получить бетонную смесь, предельная растяжимость которой превышает величину относительных деформаций растяжения, без изменения сырьевых материалов и с обеспечением требуемых характеристик смеси и бетона;

3) Использование полученной бетонной смеси при непрерывном безопалубочном формовании предварительно напряженных плит пустотного настила позволило снизить число дефектов на 90 %, в чем состоит главный технический результат использования рекомендаций, предложенных в диссертации;

4) Экономический эффект от применения разработанной бетонной смеси с предельной растяжимостью, превышающей минимальное требуемое значение, заключается в снижении материальной стоимости бетона на 2 %, но главным образом состоит в снижении прямых издержек, связанных с материальными затратами на выпуск бракованной продукции, и косвенных, связанных с осложнением подбора раскроя и организации процесса распила массива на изделия заданной длины, что существенно повышает трудозатраты и понижает производительность производства, точно определить величину этого эффекта на данный момент невозможно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований продемонстрирована необходимость, возможность и эффективность оценки и регулирования пластических свойств бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования во избежание появления трещин в свежотформованном изделии или конструкции в результате внешних механических воздействий. При этом получены следующие научные и практические результаты:

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 формующей машины с бетонной смесью в процессе ее укладки. При этом наличие или отсутствие дефектов, главным образом, определяется пластичностью смеси, для характеристики которой введено понятие «предельной растяжимости бетонной смеси ( $\varepsilon_{пр}$ , 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 свежотформованный бетонный образец-призму и определять критический прогиб в момент образования трещин на его растянутой грани с дальнейшим переводом полученного значения в  $\varepsilon_{пр}$  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 использованием 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, разработанной 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 10180 – 2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – Взамен ГОСТ 1018 – 90; введ. 01 – 07 – 2013. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 28 с.
2. ГОСТ 10181 – 2014. Смеси бетонные. Методы испытаний [Текст]. – Взамен ГОСТ 10181 – 2000; введ. 01 – 07 – 2015. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 25 с.
3. ГОСТ 12730.1 – 78. Бетоны. Методы определения плотности [Текст]. – Взамен ГОСТ 12630 – 67; введ. 01 – 01 – 1980. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 5 с.
4. ГОСТ 25192 – 2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования [Текст]. – Взамен ГОСТ 25192 – 82; введ. 01 – 07 – 2013. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 11 с.
5. ГОСТ 31108 – 2016. Цементы общестроительные. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 31108 – 2003; введ. 01 – 03 – 2017. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
6. ГОСТ 30744 – 2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка [Текст]. – Введён впервые 01 – 03 – 2002. – Москва: Госстрой России, 2001. – 29 с.
7. ГОСТ 310.1 – 76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения [Текст]. – Взамен ГОСТ 310 – 60; введ. 01 – 01 – 1978. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2003. – 2 с.
8. ГОСТ 310.3 – 76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объёма [Текст]. – Взамен ГОСТ 310 – 60; введ. 01 – 01 – 1978. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2003. – 6 с.
9. ГОСТ 310.4 – 81. Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии [Текст]. – Взамен ГОСТ 310.4 – 76; введ. 30 – 06 – 1983. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2003. – 11 с.

10. ГОСТ 310.6 – 85. Цементы. Методы определения водоотделения [Текст]. – Введён впервые 01 – 01 – 19868. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2003. – 2 с.
11. ГОСТ 7473 – 2010. Смеси бетонные. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 7473 – 94; введ. 01 – 01 – 2012. – Москва: Стандартиформ, 2011. – 20 с.
12. ГОСТ 8267 – 93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 8267 – 82; введ. 01 – 01 – 1995. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2004. – 8 с.
13. ГОСТ 8269.0 – 88. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний [Текст]. – Взамен ГОСТ 8269 – 87; введ. 30 – 06 – 1998. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2004. – 96 с.
14. ГОСТ 8735 – 88. Песок для строительных работ. Методы испытаний [Текст]. – Взамен ГОСТ 8735 – 75; введ. 30 – 06 – 1989. – Москва: Стандартиформ, 2006. – 23 с.
15. ГОСТ 8736 – 2014. Песок для строительных работ. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 8736 – 93; введ. 01 – 07 – 2015. – Москва: Стандартиформ, 2015. – 7 с.
16. *Asprone D., Auricchio F., Menna C. et al.* 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *J. Construction and Building Materials*. 2018(165):218-231.
17. *Banfill, P. F. G.* Rheology of fresh cement and concrete // *Rheology review* 2006 – 2006. – P. 61 – 130.
18. *Buswell, R.A., Leal De Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J.*: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cem. Concr. Res.* 112, 37–49 (2018).

19. Casagrande, L., Esposito, L., Menna, C., Asprone, D., & Auricchio, F. (2020). Mechanical characterization of cement-based mortar used in 3DCP including early-age creep effects doi:10.1007/978-3-030-49916-7\_42
20. *Chandra P.S., Tay Yi Wei Daniel, Tan Ming Jen et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *J. Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;1(18):311-319.
21. Cho, S., Kruger, J., Bester, F., van den Heever, M., van Rooyen, A., & van Zijl, G. (2020). A compendious rheo-mechanical test for printability assessment of 3D printable concrete doi:10.1007/978-3-030-49916-7\_20
22. *Duballeta R., Baverela O., Dirrenbergerb J.* Classification of building systems for concrete 3D printing. *J. Automation in Construction*. 2017(83):247-258.
23. Hage I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction // *Procedia Engineering*. 2016. V. 151. P. 292-299.
24. Jayathilakage, R., Rajeev, P., & Sanjayan, J. (2020). Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*, 240 doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
25. Jones, S. Z., Bentz, D. P., Martys, N. S., George, W. L., & Thomas, A. (2019). Rheological control of 3D printable cement paste and mortars doi:10.1007/978-3-319-99519-9\_7
26. *Kazemian A., Xiao Y., Cochran E. et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *J. Construction and Building Materials*. 2017(145):639-647.
27. *Khalil N., Aouad G., Rémond S. et al.* Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *J. Construction and Building Materials*. 2017(157):382-391.
28. *Laskar, A. I.* (2008) Study of rheological behavior of high-performance concrete // PhD Thesis, Indian Institute of Technology Guwahati

29. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete // *Mater. Struct.* 2012. V. 8. № 45. P.1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z
30. Li, Z., Wang, L., Ma, G., Sanjayan, J., & Feng, D. (2020). Strength and ductility enhancement of 3D printing structure reinforced by embedding continuous micro-cables. *Construction and Building Materials*, 264 doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120196
31. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y. A Systematical Review of 3D Printable Cementitious Materials // *Constr. Build. Mater.* 2019. V. 207. P. 477–490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144
32. Ma G., Li Z., Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 162. P. 613-627.
33. Malaeb Z. et al. 3D Concrete printing: machine and mix design // *International Journal of Civil Engineering*. 2015. V. 6. № 6. P. 104-109.
34. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V. N., Fataei S., Wolfs R.J. M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-Based Additive Manufacturing with Cement-Based Materials – Production Steps, Processes, and Their Underlying Physics: A Review // *Cem. Concr. Res.* 2020. V. 132. P. 106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037
35. Mukhametrakhimov, R., & Lukmanova, L. (2020). Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 890(1)
36. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges // *Compos. Part B*. 2018. V. 143. P. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

37. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., et al. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar // *Measurement*. 2018. V. 113. P. 108-116.
38. *Paul S. C., Tay Y. W., Panda B. et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction // *Archives of civil and mechanical engineering*. 2018. Vol. 18. P. 311-319.
39. *Paul S.C., Tay Y.W.D., Panda B., et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. № 18(1). P. 311-319.
40. Peng F., Xinmiao M. Fiber reinforced composite material reinforced 3 D (three - dimensional) printing structure: пат. C N 104309126A, 2014
41. *Perrot A., Mélinge Y., Estellé P. et al.* Extrusion criterion for firm cement based materials // *Applied Rheology*. 2009. Vol. 19. P. 53042.
42. *Perrot A., Rangeard D., Pierre A.* Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, *J. Materials and Structures*. 2016; 49:1213-1220.
43. *Russel N., Lanos C.* Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test // *Applied Rheology*. 2003. Vol. 13. № 3. P. 3-5
44. Slavcheva, G. S., Artamonova, O. V.: Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 8, 97–108 (2018).
45. *Tay Y.W., Panda B., Paul S.C., et al.* Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing // *Materials Science Forum Submitted*. 2016. V. 861. P. 177-181.
46. Tianrong Y., Qiaoling L. 3 D printing cement - based material and preparation method thereof: пат. C N 104891891A, 2015.
47. *Wolfs R., Bos F., Salet T.* Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 106. P. 103-116.

48. Xoi - Qiang L., Jing - Fang L., Tao Z., et al. Cement based composite material used for 3 D printing technology as well as preparation method and application thereof: пат. С N 104310918А, 2014.
49. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L. et al. Rheological and Harden Properties of the High-Thixotropy 3D Printing Concrete // Constr. Build. Mater. 2019. V. 201. P. 278–285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
50. Zhu, B., Pan, J., Nematollahi, B., Zhou, Z., Zhang, Y., & Sanjayan, J. (2019). Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction. *Materials and Design*, 181 doi:10.1016/j.matdes.2019.108088
51. Акулова, И. И. Современные технологии 3D-печати в контексте эффективности их применения в жилищном строительстве / И. И. Акулова, Г. С. Славчева // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: материалы IV международной научно-технической конференции – 2019. – С. 3 – 7.
52. Акулова, М. В. Влияние комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки на свойства цементного теста и прочность цементного камня различного минералогического состава / М. В. Акулова, О. В. Селиверстова // Строительные материалы и технологии – 2014. – № 2(52). – С. 57 – 62.
53. Акулова, М. В. Влияние четырехкомпонентной комплексной добавки на реологические свойства бетонной смеси и прочность тяжелого бетона / М. В. Акулова, О. В. Селиверстова // Строительные материалы и технологии – 2013. – № 3(47). – С. 58 – 63.
54. Алфимова, В. И. Влияние способов помола на реологию тонкомолотых многокомпонентных цементов / В. И. Алфимова, П. В. Трунов, Е. Е. Шадский, Д. Ю. Попов, В. А. Кузнецов // Научноёмкие технологии и инновации – 2014. – С. 28 – 31.
55. Баженов, Ю. М. Технология бетонов [Текст] / Ю. М. Баженов – Москва: АСВ. 2007. – 528 с.

56. *Базаров, Б. Г.*, Пластифицирующие добавки в бетон на основе промышленных отходов / Б. Г. Базаров, С. Норжибадам, Р. Санжаасурен, С. Г. Доржиева, Л. А. Урханова // Вестник ВСГУТУ – 2012. – № 1(36). – С. 27 – 31.
57. *Бальмаков, М. Д.* Нанокomпозиционное материаловедение / М. Д. Бальмаков, Ю. В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров – 2005. – № 3 (4). – С. 53 – 57.
58. *Барабанщиков, Ю. Г.* Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей / Ю. Г. Барабанщиков, М. В. Комаринский // Строительство уникальных зданий и сооружений – 2014. – № 6(21). – С. 58 – 69.
59. *Блещик, Н. П.* Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона [Текст] / Н. П. Блещик – Минск: Наука и техника, 1977 – 232 с.
60. *Бритвина, Е. А.* Влияние модификаторов вязкости на кинетику набора прочности смесей для строительной 3D-печати / Е. А. Бритвина, М. А. Шведова, Г. С. Славчева, О. В. Артамонова // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (поиск) – 2020. – № 1. – С. 46 – 48.
61. *Вагнер, Е. С.* Безопалубочное формование как перспективная технология производства ЖБИ / Е. С. Вагнер, Е. Ю. Супруненко // Достижения ВУЗовской науки – 2014. – № 9. – С. 108 – 113.
62. *Гончарова, М. А.* Подбор и оптимизация составов бетона для производства многопустотных плит перекрытия безопалубочного формования / М. А. Гончарова, А. Н. Ивашкин, А. А. Коста // Строительные материалы – 2017. – № 3. – С. 35 – 38.
63. *Гордеев, Е. В.* Водопотребность бетонной смеси / Е. В. Гордеев, А. Л. Захарычев // Технологии бетонов – 2011. – № 5-6. – С. 16 – 17.
64. *Добшиц, Л. М.* Исследование влияния виброуплотнения на реологию бетонных смесей при бетонировании конструкций методом скользящей

- опалубки / Л. М. Добшиц, Н. В. Швецов // Механизация строительства – 2014. – № 4 (838). – С. 15 – 20.
65. Дорожное строительство с гидравлически связанным несущим верхним слоем дорожного покрытия // Сборник рекомендаций Немецкой ассоциации цементных заводов – С. 236 – 247 URL: [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de) (дата обращения 04.04.2017)
66. *Зарапин, В. Г.* Формирование химического сцепления дисперсной арматуры с бетоном / В. Г. Зарапин, В. Г. Лугин, В. С. Артимович // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности 2018: сборник трудов конференции конференции – 2018 – С. 232 – 234.
67. *Золотарёв, А. А.* Бетон, наноструктурированный водорастворимыми фуллеренолами / А. А. Золотарёв, Н. А. Чарыков, К. Н. Семёнов, В. И. Намазбаев, Д. Г. Летенко, Ю. В. Пухаренко, С. В. Скачков, А. И. Лушин // Вестник СПбГУ – 2011. – Серия 4 Вып. 3. – С. 72 – 79.
68. *Зотов, А. Н.* Исследование и прогнозирование технологических свойств бетонных смесей с полипропиленовой фиброй / А. Н. Зотов // Вестник гражданских инженеров – 2014. – № 1(42). – С. 79 – 83.
69. *Иноземцев, А. С.* Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Вестник МГСУ – 2013. – № 6. – С. 100 – 108.
70. *Капырин, П. Д.* Движение твердых частиц в вязкой среде под действием вибрации / П. Д. Капырин, М. А. Степанов // Механизация строительства – 2013. – № 12(834). – С. 32 – 35.
71. *Клюев, А. В.* Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном / А. В. Клюев, С. В. Клюев, А. В. Нетребенко, А. В. Дураченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова – 2014. – № 4 – С. 67 – 72.
72. *Ковалёва, А. Ю.* Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей / А. Ю. Ковалёва, И. У.

- Аубакирова, В. Д. Староверов // Строительные материалы и изделия – 2008. – № 3 (16). – С. 74 – 76.
73. Кононова, О. В. Исследование свойств строительных растворных смесей при различном модуле крупности песка / О. В. Кононова, А. И. Чегаев // Современные проблемы науки и образования – 2014. – № 3. – С. 141 – 148.
74. Копша, С. П. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья / С. П. Копша, В. А. Заикин // Технологии бетонов – 2013. – № 11. – С. 29 – 33.
75. Коробко, Б. О. Определение реологических характеристик строительных растворов / Б. О. Коробко, Е. А. Васильев // Вестник гражданских инженеров – 2014. – № 6 (47). – С. 160 – 163.
76. Коровкин, М. О. Влияние способа введения суперпластификатора на его водоредуцирующий эффект / М. О. Коровкин, Н. А. Ерошкина, Д. С. Саденко // Региональная архитектура и строительство – 2013. – № 2. – С. 66 – 70.
77. Коровкин, М. О. Оценка вязкости цементных суспензий с помощью шарикового вискозиметра / М. О. Коровкин, В. И. Калашников, Н. А. Ерошкина, И. М. Куликов // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сборник статей международной научно-технической конференции – 2015. – С. 80 – 84.
78. Кудяков, А. И. Сухие растворные смеси с гранулированными органоминеральными воздухововлекающими добавками / А. И. Кудяков, С. А. Белых // Вестник ТГАСУ – 2019. - № 3. – С. 101 – 110.
79. Курочкин, М. П. Прогрессивные технологии производства бетонных и железобетонных изделий / М. П. Курочкин // Вестник ПДАБА – 2010. – № 2-3. – С. 92 – 96.
80. Леднев, А. А. Особенности проявления реологических свойств дисперсно-зернистых систем при сдвиге / А. А. Леднев, С. М. Усачев, В.

- Т. Перцев // Физико-химические проблемы строительного материаловедения – 2009. – № 2. – С. 7 – 11.
81. *Лесовик, В. С.* Современные трехмерные технологии и факторы сдерживающие их // В. С. Лесовик, Л. Х. Загороднюк, Н. В. Чернишева, Е. С. Глаголев, А. С. Кучерова, М. Ю. Дребезгова, Е. В. Канаева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова – 2016. – № 12. – С.22 – 30.
82. *Литвиненко, С. В.* Конструирование реологических свойств строительных смесей / С. В. Литвиненко // Сухие строительные смеси – 2014. – № 3. – С. 37 – 40.
83. *Логанина, В. И.* Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В. И. Логанина, С. Н. Кислицына, Л. В. Макарова, М. А. Садовникова // Известия вузов – 2013. – № 4. – С. 37 – 42.
84. *Максимов, С. В.* Применение суперпластификатора «Полипласт СП-3» в конструкционном керамзитобетоне / С. В. Максимов, Р. А. Кудряшова, В. Ю. Рябцев // Вестник УлГТУ – 2010. – № 1. – С. 63 – 65.
85. *Мосаков, Б. С.* Основы технологической механики тяжёлых бетонов [Текст] / Б. С. Мосаков – Новосибирск: СГПУС, 2017 – 186 с.
86. *Мухаметрахимов, Р. Х.* Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением 3D-принтера / Р. Х. Мухаметрахимов, И. М. Вахитов // Известия КГАСУ – 2017. – № 4(42). – С. 350 – 359.
87. *Низина, Т. А.* Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов / Т. А. Низина, А. В. Бабалин // Вестник ТГАСУ – 2012. – № 2. – С. 148 – 153.
88. *Низина, Т. А.* Оптимизация составов наномодифицированных цементных вяжущих / Т. А. Низина, С. Н. Кочетков // Региональная архитектура и строительство – 2013. – № 1. – С. 35 – 41.
89. *Низина, Т. А.* Оценка эффективности влияния наномодификаторов на прочностные и реологические характеристики цементных композитов в

- зависимости от вида пластифицирующих добавок / Т. А. Низина, С. Н. Кочетков, А. Н. Понамарев, А. А. Козеев // Региональная архитектура и строительство – 2013. – № 2. – С. 43 – 49.
90. *Николаев, Д. Н.* Современные суперпластификаторы для изготовления железобетонных изделий / Д. Н. Николаев, К. А. Лебедев // Технологии бетонов – 2014. – № 10. – С. 8 – 9.
91. *Перцев, В. Т.* Методологические подходы к исследованию реологических свойств строительных смесей / В. Т. Перцев, А. А. Леднев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета – 2017. – № 1(41). – С. 71 – 77.
92. *Перцев, В. Т.* Оценка реологических свойств строительных смесей с получением дополнительных количественных характеристик / В. Т. Перцев, А. А. Леднев, С. М. Усачев, А. М. Усачев // Конденсированные среды и межфазные границы – 2016. – Том 18, № 3. – С. 394 – 401.
93. *Пухаренко, Ю. В.* Модифицирование цементных композитов смешанным нанокремнеземным материалом фуллероидного типа / Ю. В. Пухаренко, В. А. Никитин // Технологии бетонов – 2013. – № 12. – С. 13 – 15.
94. *Пухаренко, Ю. В.* О влиянии углеродных фуллероидных наночастиц на тепловыделение цементного теста / Ю. В. Пухаренко, Д. И. Рыжов // Вестник гражданских инженеров – 2013. – № 4 (39). – С. 156 – 161.
95. *Пухаренко, Ю. В.* Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Лезов // Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. тр. – Л.: ЛИСИ, 1988. – С. 24 – 27.
96. *Пухаренко, Ю. В.* Опыт проектирования и производства эффективных строительных конструкций из фиброармированных бетонов / Ю. В. Пухаренко, В. С. Стерин, И. Н. Легалов // Популярное бетоноведение. . – 2008. – № 4. – С. 113-117

97. Рабинович, Ф. Н. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Ф. Н. Рабинович, С. М. Баев // Промышленное и гражданское строительство – 2009. – № 9. – С. 38 – 41.
98. Разделительные бетонные ограждения. Защитные дорожные ограждения // Сборник рекомендаций Немецкой ассоциации цементных заводов – С. 248 – 255 URL: [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de) (дата обращения 04.04.2017)
99. Рыжов, Д. И. О долговечности бетонов из наномодифицированных смесей / Д. И. Рыжов // Вестник гражданских инженеров – 2013. – № 2 (37). – С. 146 – 151.
100. Рыжов, Д. И. Применение наномодифицированных добавок для железобетонных изделий / Д. И. Рыжов // Строительные материалы и изделия – 2015. – № 6 (53). – С. 146 – 150.
101. Салих, Ф. Влияние повторного введения добавок на реологию и твердение цементного раствора как матрицы бетона / Ф. Салих, С. В. Коваль // Строительство и техногенная безопасность – 2013. - № 47. – С. 39 – 43.
102. Селяев, В. П. Железобетонные конструкции, изготовленные методом безопалубочного формования: оценка надежности, опыт применения / В. П. Селяев, В. Н Уткина // Технологии бетонов – 2011. – № 5-6. – С. 45 – 47.
103. Селяев, В. П. Оценка надежности и долговечности железобетонных плит, изготовленных методом безопалубочного формования на стендах // В. П. Селяев, В. Н Уткина, П. В. Селяев, И. Ю. Уткин, А. О. Колдин // Вестник ТГАСУ – 2010. – № 2. – С. 176 – 187.
104. Славчева, Г. С. Влияние концентрации и гранулометрии наполнителей на реологические свойства цементных систем / Г. С. Славчева, А. И. Ибряева // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии – 2019. – № 2(2). – С. 29 – 36.

105. *Славчева, Г. С.* Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Г. С. Славчева, Е. А. Бритвина, А. И. Ибряева / Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета – 2019. – № 4 (41). – С. 134 – 143.
106. *Славчева, Г. С.* Формирование высококонцентрированных гетерогенных дисперсных цементных систем для строительной 3D-печати / С. Г. Славчева, О. В. Артамонова, М. А. Шведова, А. А. Полосина // Современные строительные материалы и технологии: сборник научных статей II международной конференции – 2020. – С. 132 – 140.
107. *Соболев, Г.М.* Модифицированные фибробетоны с повышенными эксплуатационными характеристиками // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Выпуск 82. – Караваево: Костромская ГСХА, 2015. – С. 55 – 61.
108. *Строкова, В. В.* Реотехнологические свойства суспензий механоактивированных кварцевых компонентов и композиционных вяжущих на их основе / В. В. Строкова, В. В. Нелюбова, А. И. Бондаренко, Е. В. Кобзев // Вестник ВолгГАСУ – 2013. – № 31(50). Ч. 2 – С. 179 – 185.
109. *Тараканов, О. В.* Влияние суперпластификаторов на пластичность цементных и минеральных паст // О. В. Тараканов, Е. А. Беякова // Технологии бетонов – 2013. - № 2. – С. 18 – 20.
110. *Уткин, В. В.* Современная технология строительной индустрии [Текст] / В. В. Уткин, Ю. Н. Чумерин – Москва: Русский издательский дом, 2008. – 100 с.
111. *Хвастунов, В. Л.* Высокоэффективные керамзитожелезобетонные плиты перекрытий безопалубочного формования из керамзитобетона М500 / В. Л. Хвастунов, А. В. Хвастунов, В. В. Пауск // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и образовании: сборник научных трудов. Под общей редакцией В. В. Белова – 2015. – С. 108 – 113.

112. *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.
113. *Шатов, А. Н.* Сохраняемость бетонных смесей: современные решения повседневных задач / А. Н. Шатов // Технологии бетонов – 2012. – № 3-4. – С. 30 – 33.
114. *Шведова, М. А.* Влияние добавок модификаторов вязкости на реологическое поведение цементных систем для 3D-печати / М. А. Шведова, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета – 2020. – № 3(44). – С. 129 – 138.
115. *Шведова, М. А.* Вопросы регулирования составов цементных систем для 3D-печати / М. А. Шведова, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Химия, физика и механика материалов – 2020. – № 1(24). – С. 95 – 120.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

к диссертации Хренова Г. М. на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и  
изделия на тему:

**Проектирование бетонных смесей в технологии непрерывного  
безопалубочного формования**



ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

# ДИПЛОМ

серия ПСП № 17595

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,  
МОЛОДЫХ КАНДИДАТОВ НАУК 2017 Г.

*Орлов Георгий Михайлович*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.С. ПОЛТАВЧЕНКО

Правительство Санкт-Петербурга  
Комитет по науке и высшей школе

## СПРАВКА

(Приложение к диплому ПСП № 17595 победителя конкурса)

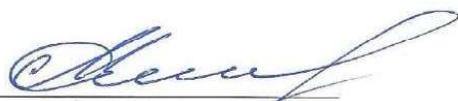
*Хренов Георгий Михайлович*

является победителем конкурса грантов 2017 года  
для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга,  
аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов,  
расположенных на территории Санкт-Петербурга,  
в соответствии с распоряжением Комитета по науке и высшей школе

от 17.11.2017 г. № 167

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Место учебы (работы)          | <i>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет</i>     |
| Категория победителя конкурса | <i>Студент</i>   |
| Научное направление           | <i>Строительство и архитектура</i>   |
| Тема проекта                  | <i>Разработка метода параметрической оценки пластических свойств бетонных смесей</i> |

Председатель Комитета  
по науке и высшей школе

  
А.С. Максимов

Председатель  
научного совета конкурса

  
В.Е. Романов



Правительство Санкт-Петербурга  
Комитет по науке и высшей школе

## СПРАВКА

(Приложение к диплому ПСП № 16474 победителя конкурса)

*Хренов Георгий Михайлович*

является победителем конкурса грантов 2016 года  
для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга,  
аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов,  
расположенных на территории Санкт-Петербурга,  
в соответствии с распоряжением Комитета по науке и высшей школе

от 28.11.2016 № 148

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Место учебы (работы)          | <i>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет</i>                                      |
| Категория победителя конкурса | <i>Строительство и архитектура</i>  |
| Научное направление           | <i>Студенты</i>   |
| Тема проекта                  | <i>Определение эффективности суперпластификаторов бетонной смеси применительно к технологии трёхмерной печати ЖБИ</i> |

Председатель Комитета  
по науке и высшей школе



А.С. Максимов

Председатель  
научного совета конкурса



В.Е. Романов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2677234

**Способ определения пластичности бетонной смеси и устройство для его осуществления**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет" (RU)*

Авторы: *Хренов Георгий Михайлович (RU),  
Пухаренко Юрий Владимирович (RU)*

Заявка № 2017142066

Приоритет изобретения 01 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

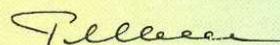
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 января 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 декабря 2037 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Извлев



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Технологии строительных материалов и метрологии

**РЕКОМЕНДАЦИИ**

по определению предельной растяжимости бетонной смеси

Разработал:

Г. М. Хренов  29.05.2019

Научный руководитель:

д.т.н, проф.

Ю. В. Пухаренко  29.05.2019

Санкт-Петербург

2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное приложение разработано в рамках диссертационного исследования Хренова Г. М., посвящённого пластическим свойствам бетонных смесей и содержит подробное описание сущности метода и методики оценки пластических свойств бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования.

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Предельная растяжимость бетонной смеси ( $\varepsilon^{пр}$  в мм/м)** – это то относительное удлинение бетонной смеси, при котором происходит разрыв сплошности среды.

**Критический прогиб образца ( $h^{кр}$  в мм)** – это тот прогиб образца, при котором образовалась (образовались) трещина (трещины) при равномерном изгибании свежеотформованного образца балки размерами 280x70x70 мм.

**Прибор для определения предельной растяжимости бетонной смеси** – это прибор, моделирующий процесс растяжения бетонной смеси путём равномерного изгибания свежеотформованного образца-балки размерами 270x70x70 мм.

## ОБОРУДОВАНИЕ

1. Прибор для определения предельной растяжимости бетонной смеси (рисунок 1)

Станина прибора изготовлена из клеёной сосны и представляет из себя щит толщиной 18 мм габаритами 550x400 мм. Станина является жёстким плоским основанием прибора. Поэтому каких-либо требований кроме достаточной жёсткости и плоскостности к ней не предъявляется. Станина

может обладать другими габаритами и толщиной и может быть изготовлена из другого материала.

Силовой элемент представляет собой стальную трубу длиной 300 мм прямоугольного сечения 30x60 мм с соосно сваренными внутри двумя гайками М10 (резьбовая ось гаек параллельна оси трубы) на равном удалении от торцов трубы (около 30 мм). Силовой элемент оснащён двумя упорами для обеспечения устойчивости и жёстко связан со станиной. Возможно изготовление данной детали другой конструкции и из других материалов, при условии обеспечения связи между гибкой оснасткой и винтовым штоком, которая позволяет изгибать гибкую оснастку при вращении винтового штока.

Винтовой шток представляет собой шпильку М10 длиной 550 мм. Шпилька вкручена в гайки силового элемента. Шток выполняет функцию преобразования вращательных движений ворота в линейное перемещение торца шпильки с целью образования механического воздействия на гибкую оснастку.

Ворот является органом управления прибора. Придавая вращение вороту и регулируя скорость производится управление процессом испытания. Ворот может быть любой конструкции при условии выполнения его прямой функции.

Стропы изготовлены из стального троса диаметром 1 мм и обладают длиной 300 мм. Стропы оснащены концевыми карабинами для создания связи между гибкой формой и силовым элементом.

Поверхность скольжения обеспечена за счёт оцинкованного стального листа толщиной 0,8 мм и габаритами 250x400 мм жёстко связанного со станиной.

Гибкая оснастка изготовлена из листовой оцинкованной стали толщиной 0,8 мм. Наружные габариты оснастки 70x70x280 мм. Данная деталь воспринимает перемещение штока средней частью, при этом установленные по краям оснастки стропы препятствуют её перемещению. Таким образом,

линейное перемещение штока преобразуется в изгибание оснастки. Оснастка выполняет функцию передачи собственных деформаций на отформованный образец, и обеспечивает равномерное растяжение его наружной поверхности.

Съемная форма изготовлена из фанеры толщиной 8 мм. Внутренние габариты съемной формы соответствуют наружным габаритам гибкой оснастки. На внутренней поверхности формы располагается стальной лист размерами 70x180 мм в соответствии с формой размерами гибкой оснастки. Съемная форма надевается на гибкую оснастку, таким образом создается непрерывная стальная поверхность внутри формы. Функция данной детали заключается в обеспечении возможности укладки и уплотнения бетонной смеси внутри гибкой оснастки для формирования образца балки.

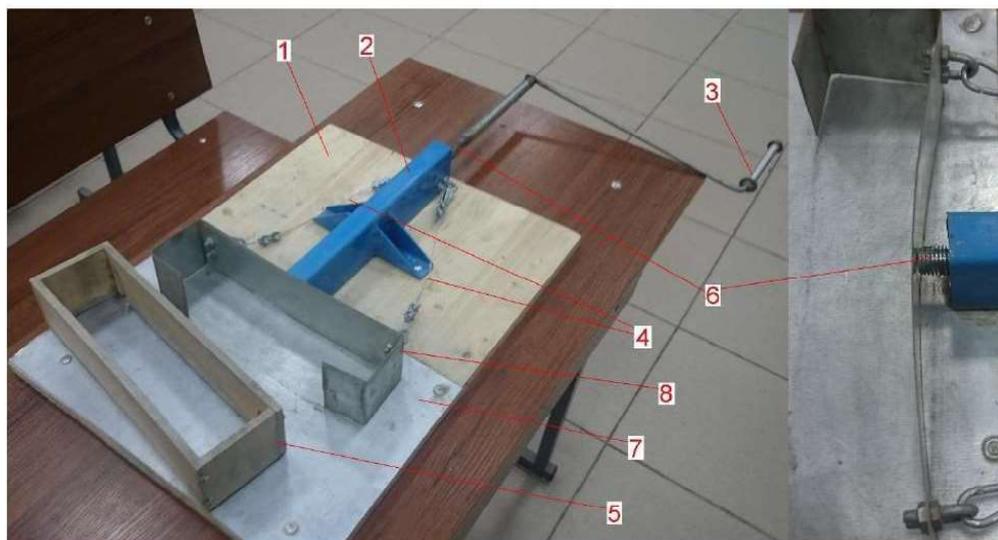


Рисунок 1 – Прибор для определения пластичности бетонной смеси: 1 – станция прибора; 2 – силовой элемент; 3 – вороток; 4 – стропы; 5 – съемная форма; 6 – винтовой шток; 7 – поверхность скольжения; 8 – гибкая оснастка.

### МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ

1) Подготовка прибора к испытанию: гибкая оснастка устанавливается на поверхность скольжения и закрепляется при помощи строп

к основному корпусу прибора; на гибкую оснастку надевается съёмная форма и выставляется на поверхности скольжения таким образом, чтобы ось винтового штока проходила через центр внутренней и наружной поверхности формы; поверхность скольжения, а также внутренняя поверхность гибкой оснастки и съёмной формы увлажняются водой;

2) В съёмную форму подготовленного прибора укладывается испытываемая бетонная смесь в три слоя. Каждый слой штыкуется 20 раз. После укладки и уплотнения смеси верхняя поверхность заглаживается и выравнивается по уровню со съёмной формой мастерком. Интенсивными ударами (15 ударов) штыковкой по верхним торцам стенок съёмной формы создаётся механическое воздействие, схожее с вибрационным;

3) Аккуратно и плавно съёмная форма снимается движением вверх, при этом гибкая оснастка придерживается;

4) Осуществляется визуальная проверка отформованного образца. В случае наличия дефектов предыдущие операции производятся заново;

5) Движением воротка по часовой стрелке шток приводится в касание с гибкой оснасткой;

6) Испытание: вращением воротка по часовой стрелке шток приводится в движение и провоцируется изгибание гибкой оснастки и образца с постоянной скоростью изменения прогиба от 1 до 5 мм/с, при этом осуществляется визуальный контроль наружной поверхности образца; вращение воротка прекращается в тот момент, когда на наружной поверхности образца образовалась трещина и раскрылась примерно на 1 мм;

7) Если трещина образовалась на удалении более чем 85 мм от середины наружной поверхности, результат испытания считается недействительным;

8) Фиксируется прогиб образца в мм и заносится в рабочий журнал;

9) Завершение испытания: гибкая оснастка снимается с образца; бетонная смесь удаляется с поверхности скольжения; все детали прибора отчищаются от бетонной смеси и цементного теста.

Полученная методика испытания позволяет проводить численную оценку пластических свойства бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с таблицей 1 выбирается значение предельной растяжимости бетонной смеси, соответствующее полученному критическому прогибу

Таблица 1 – соответствие  $\varepsilon^{np}$  и  $h^{kp}$

| $h^{kp}$ , мм | $\varepsilon^{np}$ , мм/м | $h^{kp}$ , мм | $\varepsilon^{np}$ , мм/м | $h^{kp}$ , мм | $\varepsilon^{np}$ , мм/м |
|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
| 1             | 9                         | 12            | 105                       | 23            | 202                       |
| 2             | 17                        | 13            | 113                       | 24            | 211                       |
| 3             | 26                        | 14            | 122                       | 25            | 220                       |
| 4             | 35                        | 15            | 131                       | 26            | 229                       |
| 5             | 43                        | 16            | 140                       | 27            | 238                       |
| 6             | 52                        | 17            | 149                       | 28            | 247                       |
| 7             | 61                        | 18            | 157                       | 29            | 256                       |
| 8             | 70                        | 19            | 166                       | 30            | 265                       |
| 9             | 78                        | 20            | 175                       | 31            | 274                       |
| 10            | 87                        | 21            | 184                       | 32            | 283                       |
| 11            | 96                        | 22            | 193                       | 33            | 293                       |



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра технологии строительных материалов и метрологии

**Отчёт по результатам проведения испытаний опытно-  
промышленной партии предварительно напряженных плит пустотного  
настила, выпущенных по технологии непрерывного безопалубочного  
формования с использованием бетонной смеси повышенной  
пластичности на производственной базе ООО «Полар Инвест»**

Исполнители:

От «СПбГАСУ»:

д.т.н., профессор,  
член-корреспондент РААСН,  
заведующий кафедрой «ТСМиМ»


Ю. В. Пухаренко

аспирант кафедры «ТСМиМ»

Г. М. Хренов

От ООО «Полар Инвест»:

главный технолог



Д. С. Кудинов

Санкт-Петербург

2019 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

Кафедра Технологии строительных материалов и метрологии

Лабораторный бетоноукладчик. КД

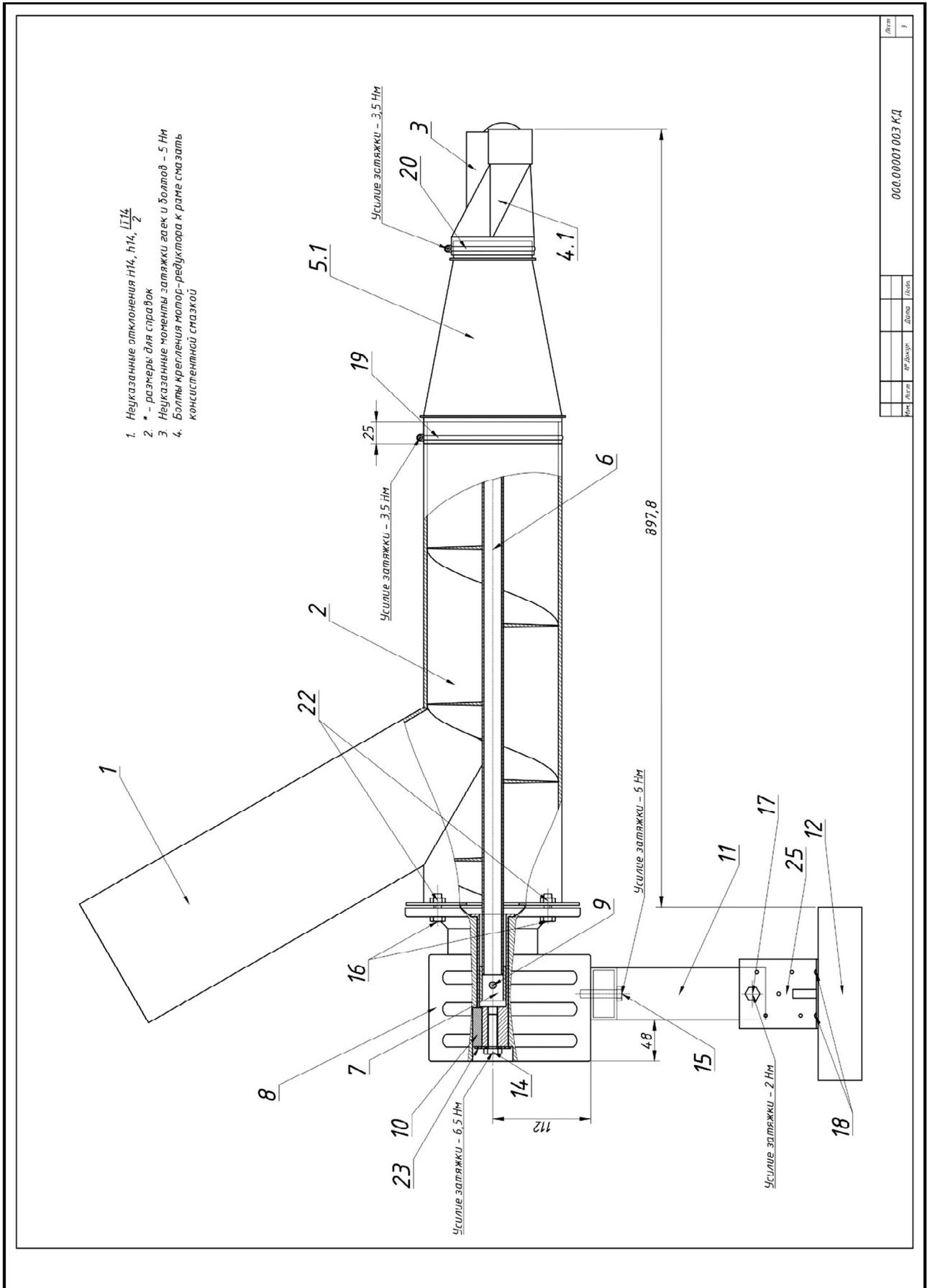
|                  |             |                        |                   |                  |  |               |                  |                     |
|------------------|-------------|------------------------|-------------------|------------------|--|---------------|------------------|---------------------|
|                  |             |                        |                   |                  | 000.00001 001 КД                           |               |                  |                     |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ Докум.</i>        | <i>Дата</i>       | <i>Подп.</i>     | <i>Лабораторный<br/>бетоноукладчик. КД</i> | <i>Лит.</i>   | <i>Масса</i>     | <i>Масштаб</i>      |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Хренов Г. М.</i>    | <i>30.10.2017</i> | <i>[Подпись]</i> |  |               |                  |                     |
| <i>Проверил</i>  |             | <i>Пухаренко Ю. В.</i> | <i>30.10.2017</i> | <i>[Подпись]</i> |  |               |                  |                     |
| <i>Н. контр.</i> |             | <i>Пухаренко Ю. В.</i> | <i>30.10.2017</i> | <i>[Подпись]</i> |  |               |                  |                     |
| <i>Рук-тель</i>  |             | <i>Пухаренко Ю. В.</i> | <i>30.10.2017</i> | <i>[Подпись]</i> | <i>Титульный лист</i>                      | <i>Лист 1</i> | <i>Листов 13</i> | <i>СПбГАСУ 2017</i> |

**Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД**  
165

| <i>Состав КД</i>   |             |                 |             |              |                         |
|--|-------------|-----------------|-------------|--------------|-------------------------|
| <i>Наименование листа</i>  |             |                 |             |              | <i>№ листа</i>          |
| <i>Титульный лист</i>  |             |                 |             |              | <i>1</i>                |
| <i>Состав КД</i>   |             |                 |             |              | <i>2</i>                |
| <i>Сборочный чертёж. Вид сбоку</i>   |             |                 |             |              | <i>3</i>                |
| <i>Сборочный чертёж. Вид спереди</i>   |             |                 |             |              | <i>4</i>                |
| <i>Закрепление и положение на рабочей поверхности. Основыне характеристики</i> |             |                 |             |              | <i>5</i>                |
| <i>Расходный дункер. Материальный цилиндр. Вспомогательная рама</i>            |             |                 |             |              | <i>6</i>                |
| <i>Шнековый вал</i>  |             |                 |             |              | <i>7</i>                |
| <i>Основная рама. Крепёжная планка</i>   |             |                 |             |              | <i>8</i>                |
| <i>Шпоночно-стержневой переходник</i>  |             |                 |             |              | <i>9</i>                |
| <i>Сменный формообразователь СФ-50.200</i>                                     |             |                 |             |              | <i>10</i>               |
| <i>Сменный формообразователь СФ-50.100</i>                                     |             |                 |             |              | <i>11</i>               |
| <i>Схема подключения мотор-редуктора и частотного преобразователя</i>          |             |                 |             |              | <i>12</i>               |
| <i>Спецификация</i>  |             |                 |             |              | <i>13</i>               |
|  |             |                 |             |              |                         |
|  |             |                 |             |              |                         |
| <i>Изм.</i>  | <i>Лист</i> | <i>№ Докум.</i> | <i>Дата</i> | <i>Подп.</i> | <i>000.00001 002 КД</i> |
|  |             |                 |             |              | <i>Лист</i>             |
|  |             |                 |             |              | <i>2</i>                |

# Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД

166

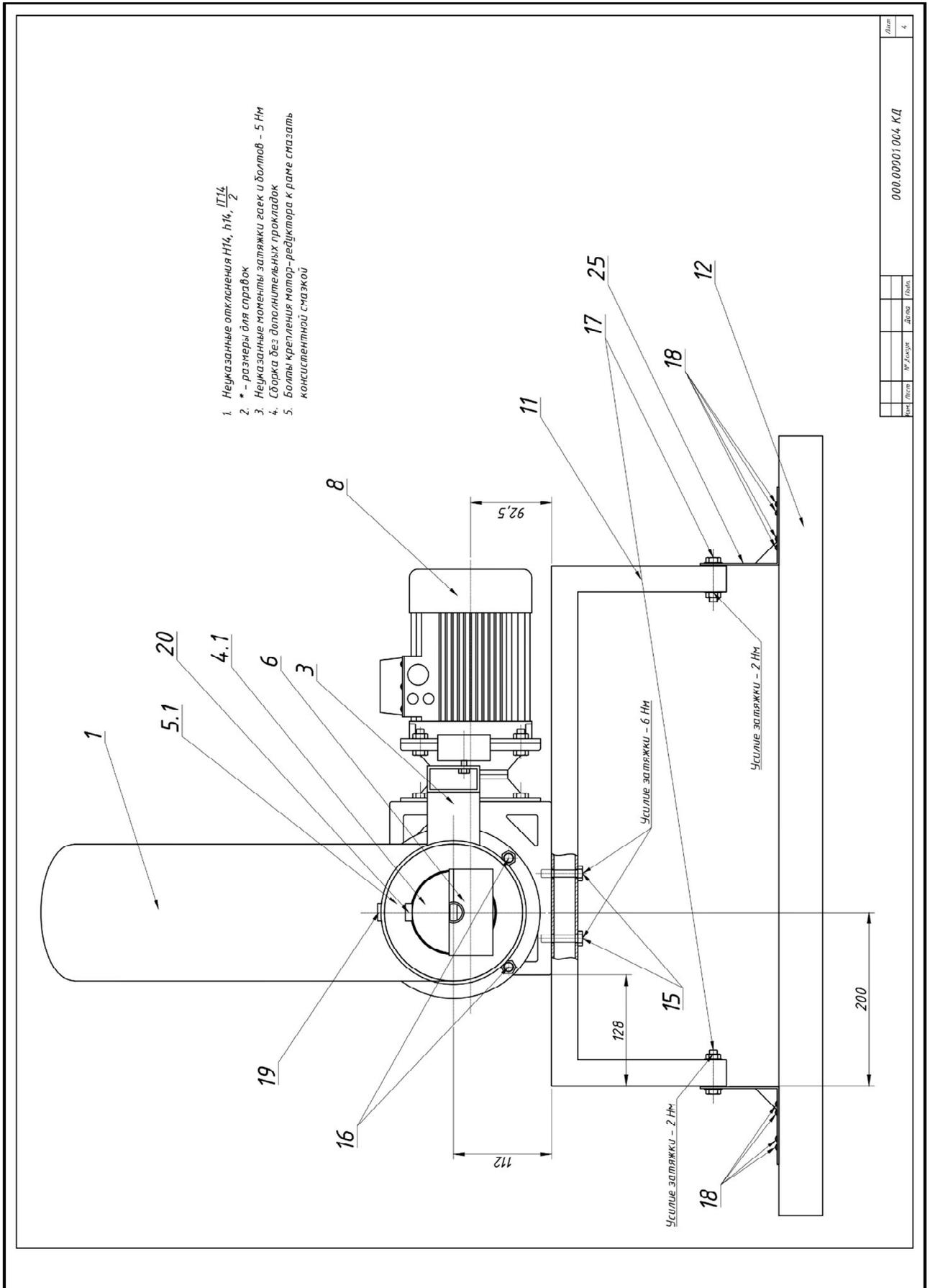


| № | Изм. | Дата | Исполн. | Провер. |
|---|------|------|---------|---------|
| 1 |      |      |         |         |

000.00001.003 КД

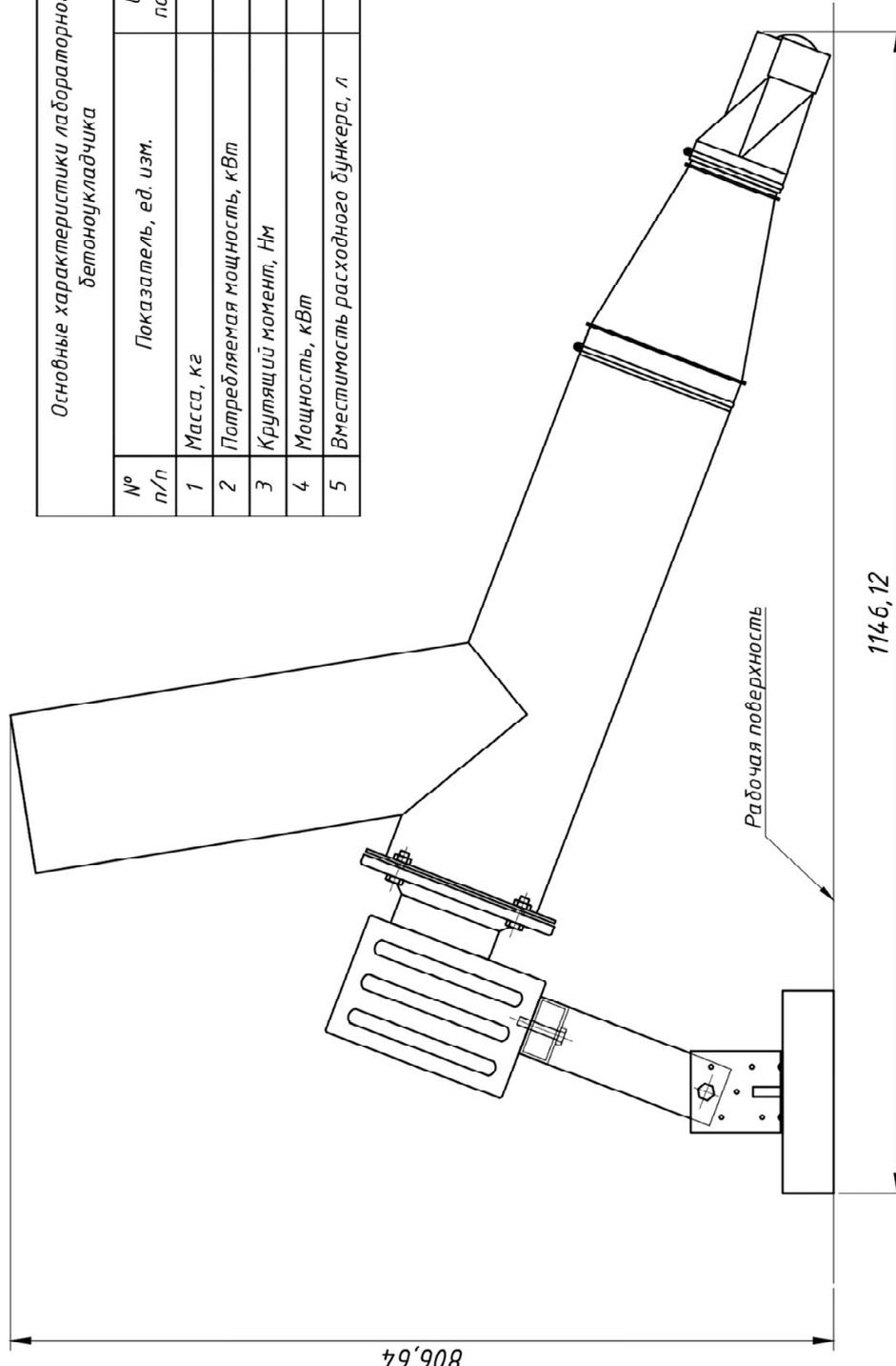
# Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД

167



000.00001.004.КД

| Основные характеристики лабораторного бетоноукладчика |                                   |                     |
|---|-----------------------------------|---------------------|
| № п/п   | Показатель, ед. изм.              | величина показателя |
| 1   | Масса, кг                         | 75                  |
| 2   | Потребляемая мощность, кВт        | 1,6                 |
| 3   | Крутящий момент, Нм               | 360                 |
| 4   | Мощность, кВт                     | 1,1                 |
| 5   | Вместимость расходного бункера, л | 7,62                |

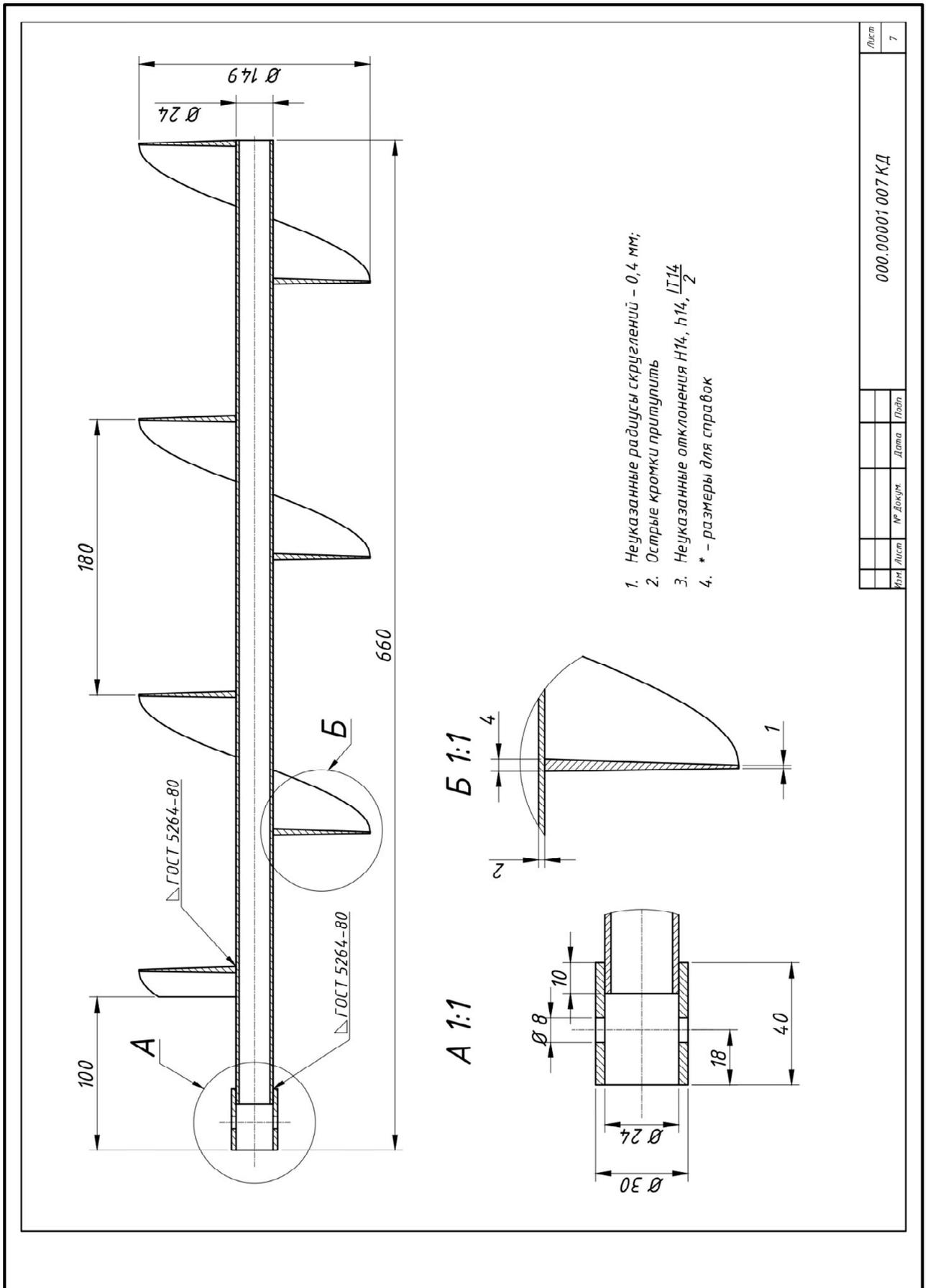


1. Неуказанные отклонения Н14, н14, П14, 2
2. \* – размеры для справок
3. Зазор между формообразователем и рабочей поверхностью не более 0,5 мм
4. Операние на ролик вспомогательной рамы
5. Крепёжную планку жёстко закрепить к рабочей поверхности на 2 зажима

|      |      |          |      |       |                 |      |   |
|------|------|----------|------|-------|-----------------|------|---|
| Изм. | Лист | № Доким. | Дата | Подп. | 000.00001 005КД | Лист | 5 |
|------|------|----------|------|-------|-----------------|------|---|

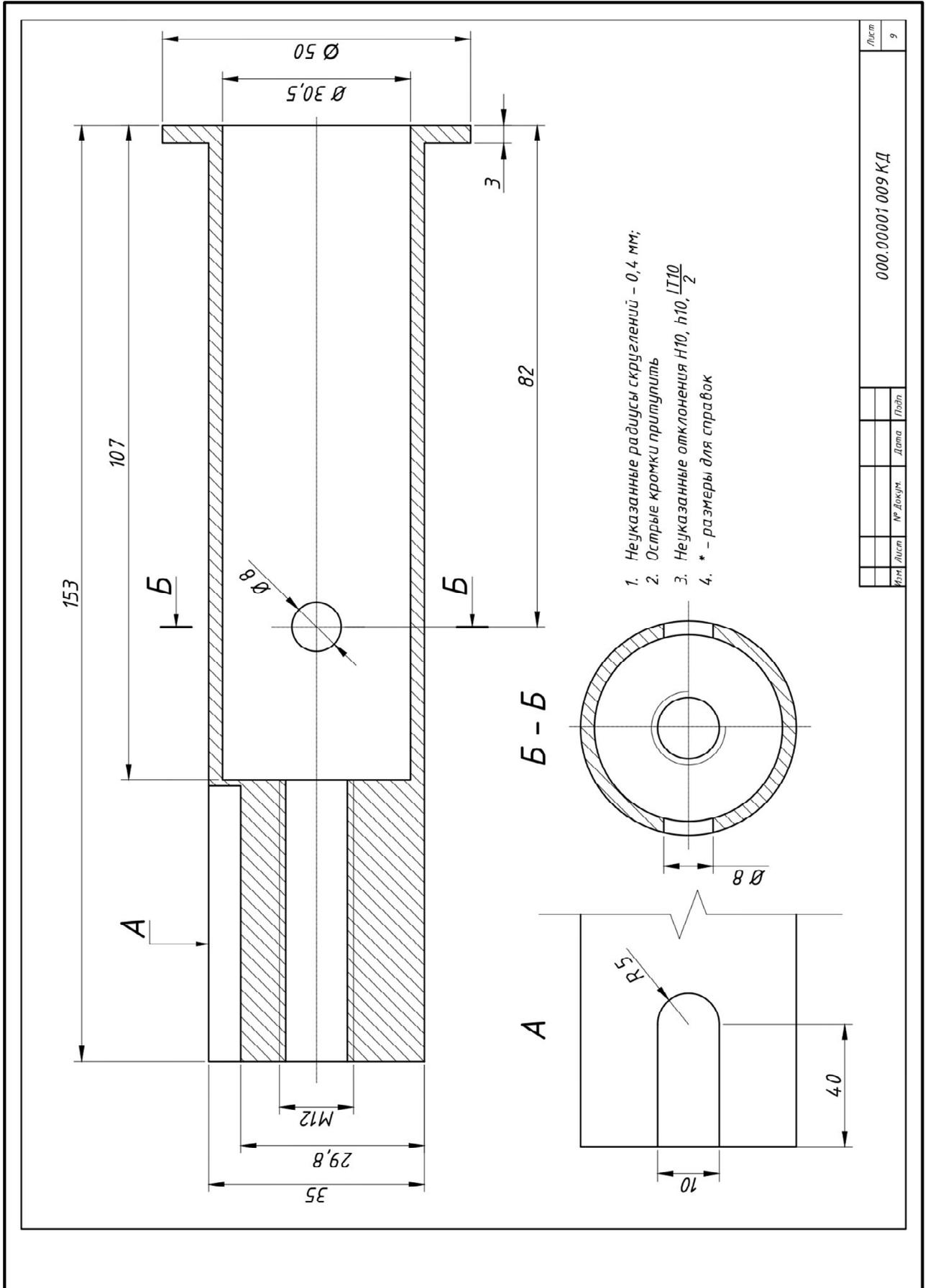


Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД  
170

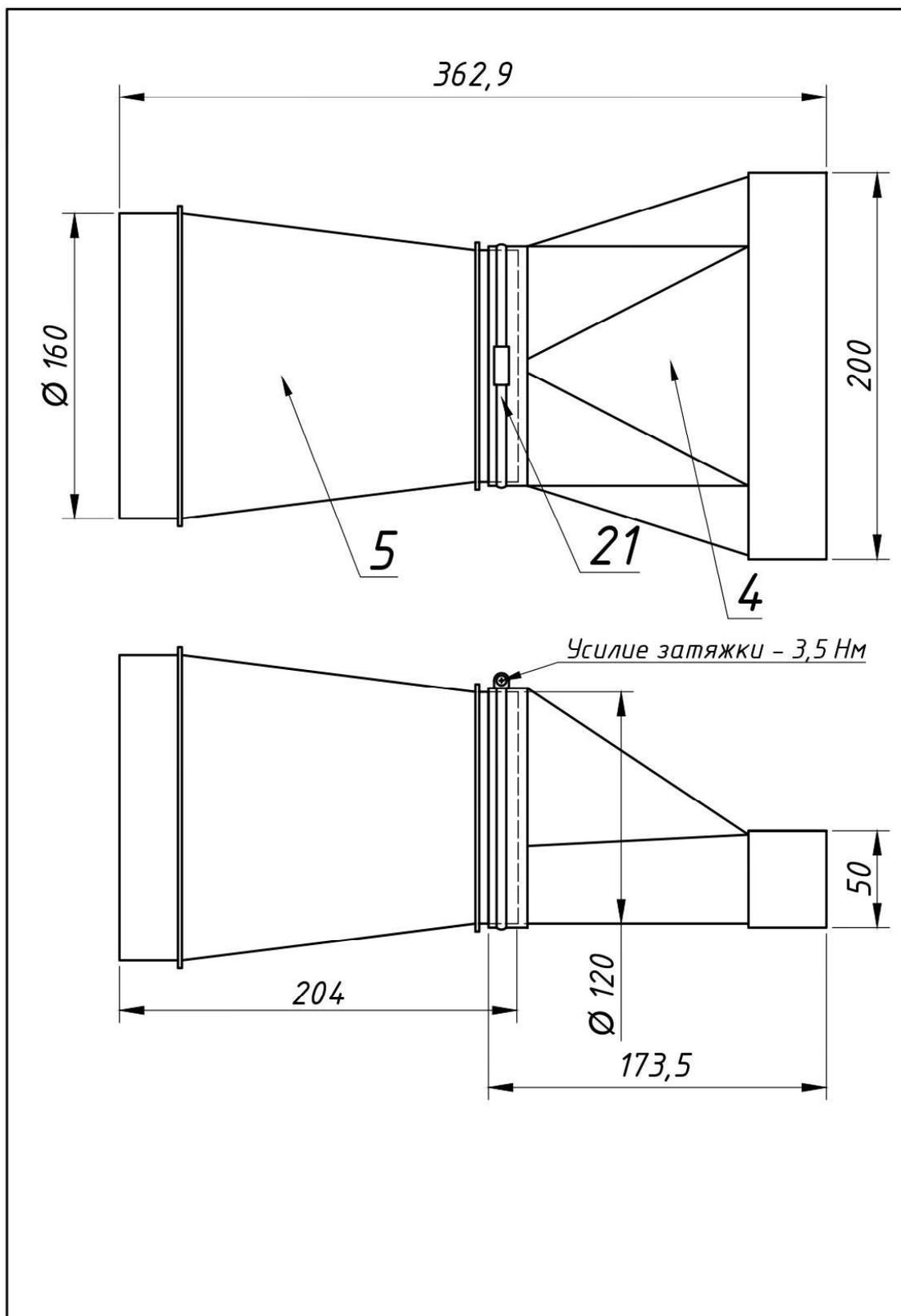




Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД  
172



Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД  
173



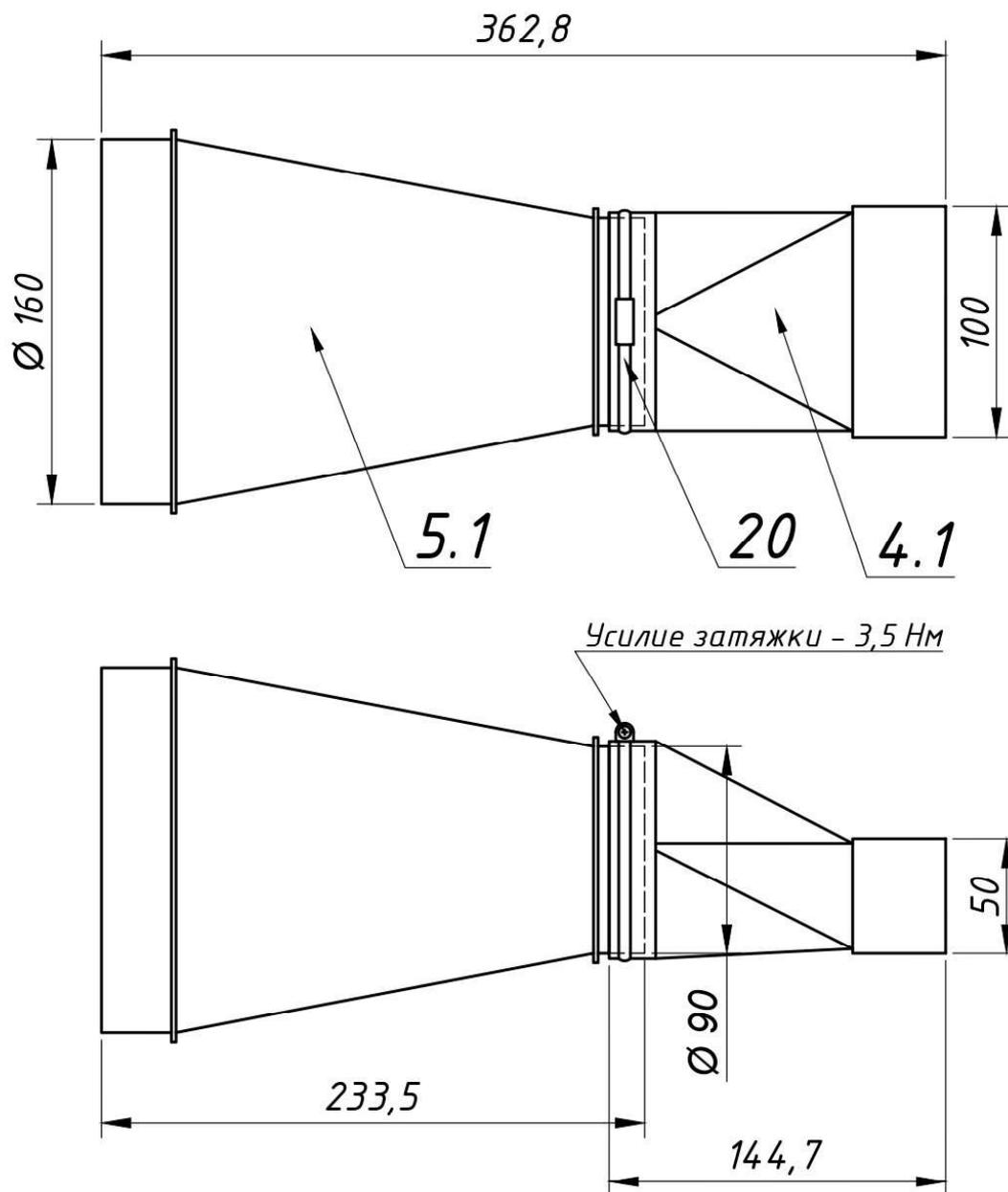
|      |      |          |      |       |
|------|------|----------|------|-------|
| Изм. | Лист | № Докум. | Дата | Подп. |
|      |      |          |      |       |

000.00001 010 КД

Лист

10

Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД  
174



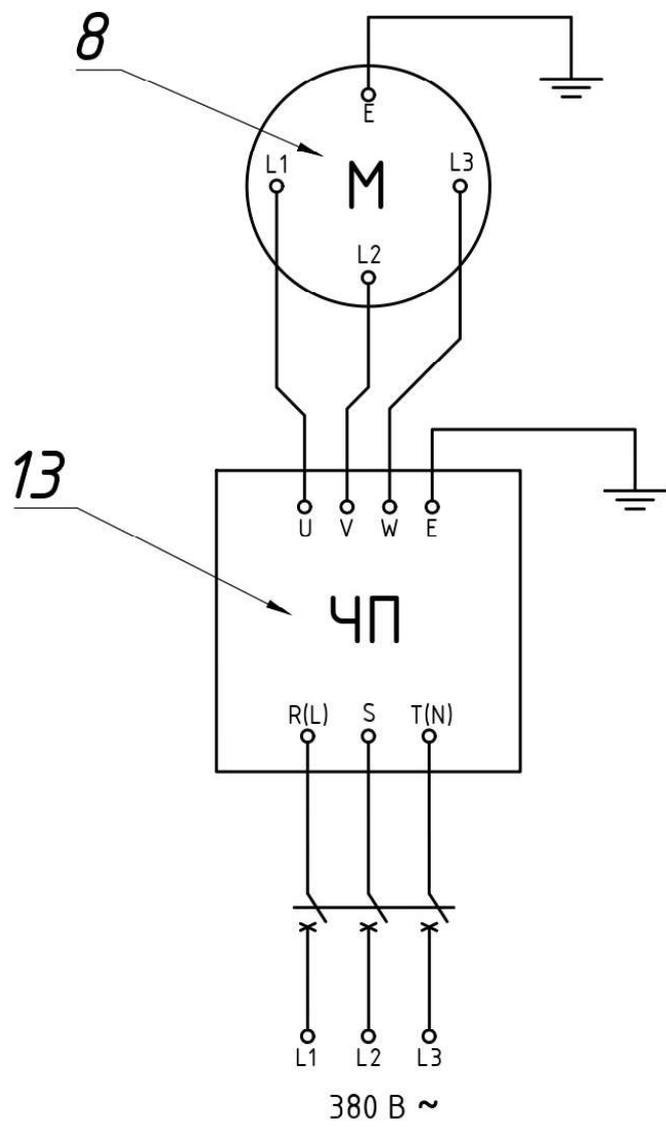
|      |      |          |      |       |
|------|------|----------|------|-------|
| Изм. | Лист | № Докум. | Дата | Подп. |
|      |      |          |      |       |

000.00001 011 КД

Лист

11

Приложение Д – лабораторный бетоноукладчик. КД  
175



|      |      |          |      |       |
|------|------|----------|------|-------|
|      |      |          |      |       |
| Изм. | Лист | № Докум. | Дата | Подп. |

000.00001 012 КД

Лист

12



**Приложение Е –прибор для определения пластичности. КД**  
177

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

Кафедра Технологии строительных материалов и метрологии

Прибор для определения предельной  
растяжимости бетонной смеси. КД

|             |             |                 |             |              |   |              |              |                |
|-------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|---|--------------|--------------|----------------|
|             |             |                 |             |              | 000.00002 001 КД  |              |              |                |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ Докум.</i> | <i>Дата</i> | <i>Подп.</i> | Прибор для определения<br>предельной растяжимости<br>бетонной смеси. КД | <i>Лит.</i>  | <i>Масса</i> | <i>Масштаб</i> |
| Разраб.     |             | Хренов Г. М.    | 29.05.2018  |              |   |              |              |                |
| Проверил    |             | Лухаренко Ю. В. | 29.05.2018  |              |   |              |              |                |
| Н. контр.   |             | Лухаренко Ю. В. | 29.05.2018  |              |   |              |              |                |
| Рук-тель    |             | Лухаренко Ю. В. | 29.05.2018  |              |   |              |              |                |
|             |             |                 |             |              | Титульный лист  | СПбГАСУ 2018 |              |                |

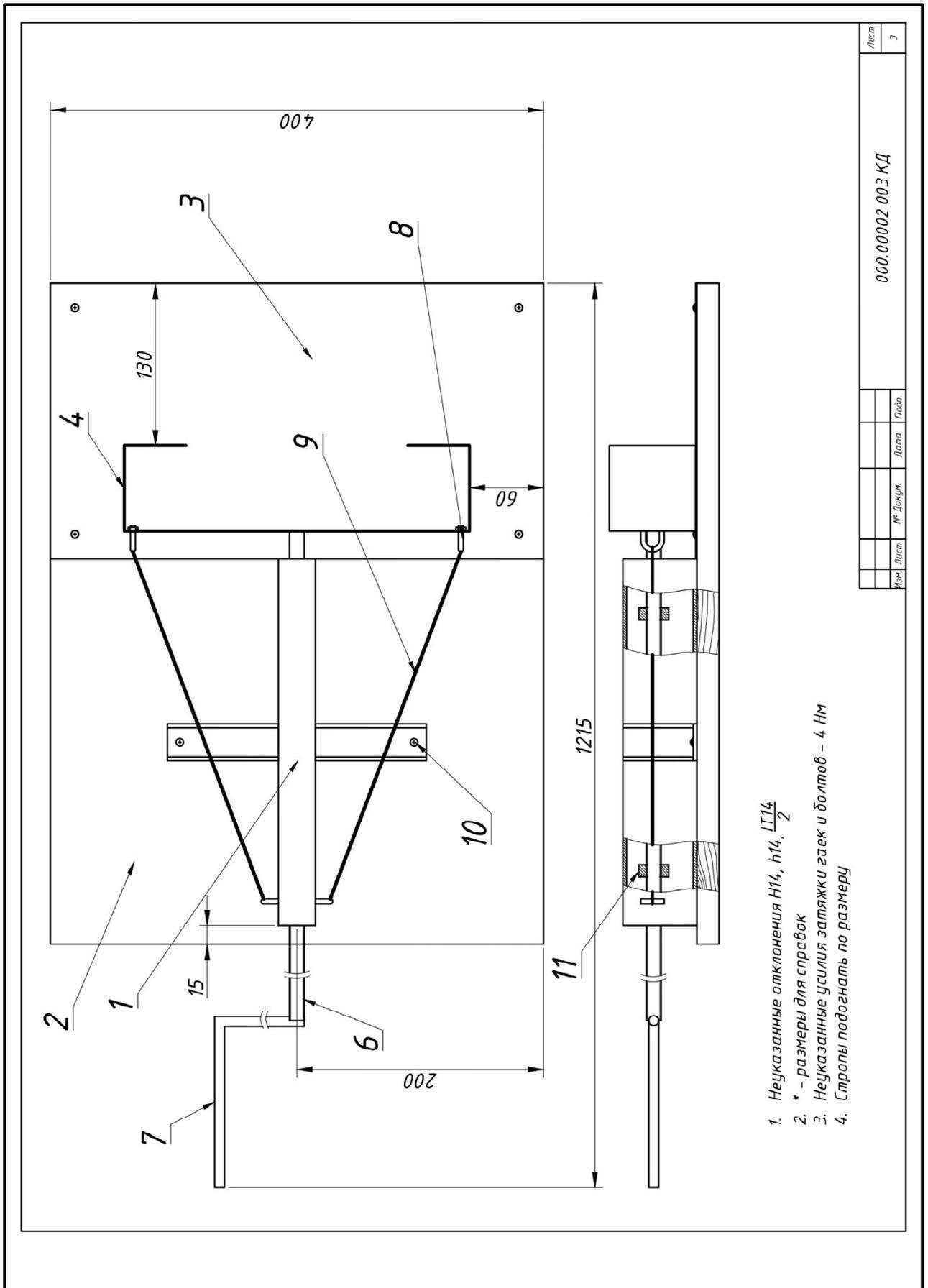
**Приложение Е** –прибор для определения пластичности. КД  
178

*Состав КД*

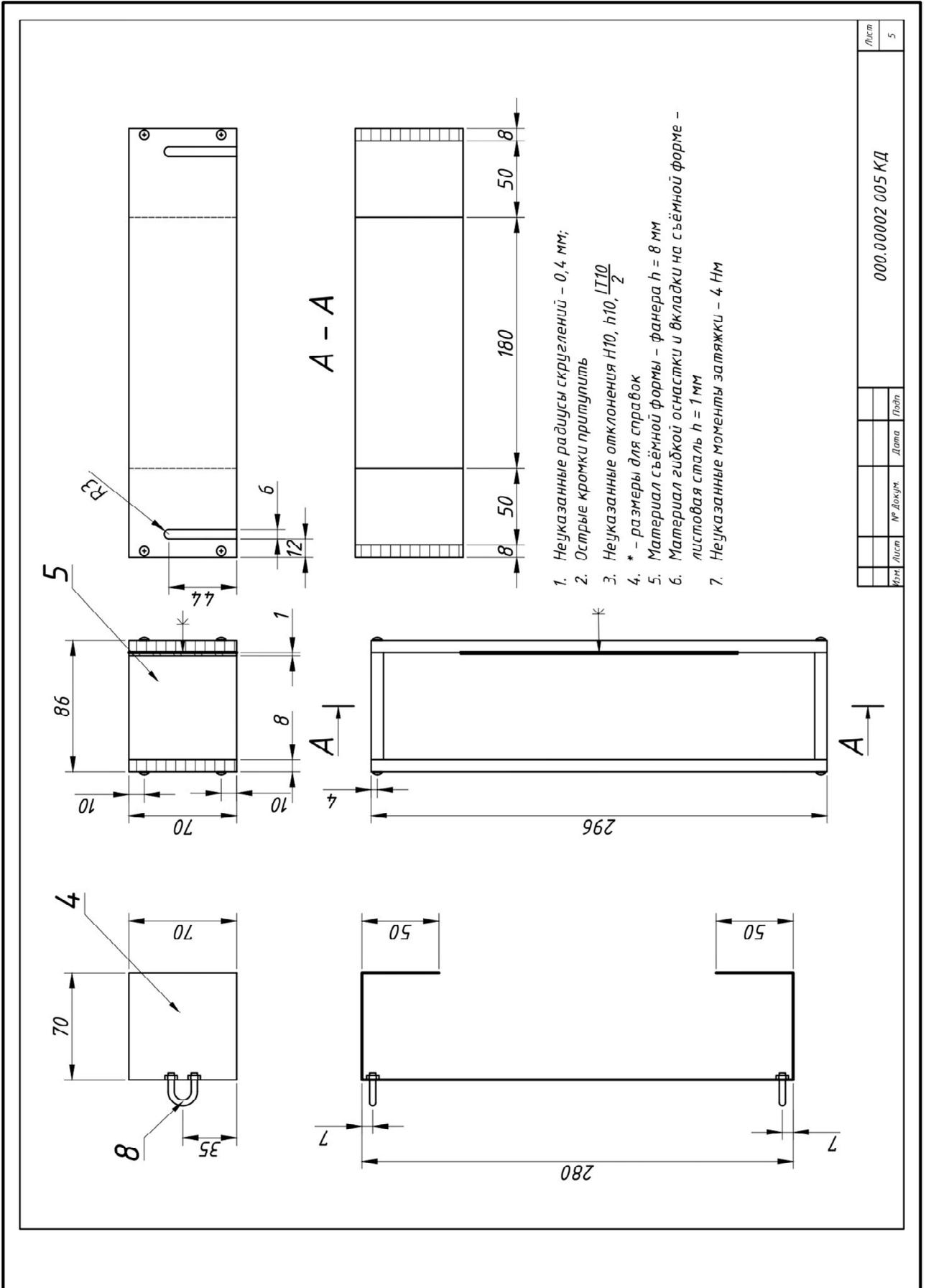
| <i>Наименование листа</i>              | <i>№ листа</i> |
|--|----------------|
| <i>Титульный лист</i>                  | <i>1</i>       |
| <i>Состав КД</i>                       | <i>2</i>       |
| <i>Сборочный чертёж</i>                | <i>3</i>       |
| <i>Основной корпус</i>                 | <i>4</i>       |
| <i>Гибкая оснастка. Съёмная форма</i>  | <i>5</i>       |
| <i>Станина. Поверхность скольжения</i> | <i>6</i>       |
| <i>Винтовой шток. Вороток</i>          | <i>7</i>       |
| <i>Спецификация</i>                    | <i>8</i>       |

|             |             |                 |             |              |                         |             |
|-------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|-------------------------|-------------|
|             |             |                 |             |              | <i>000.00002 002 КД</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ Докум.</i> | <i>Дата</i> | <i>Подп.</i> |                         | <i>2</i>    |

Приложение Е – прибор для определения пластичности. КД  
179

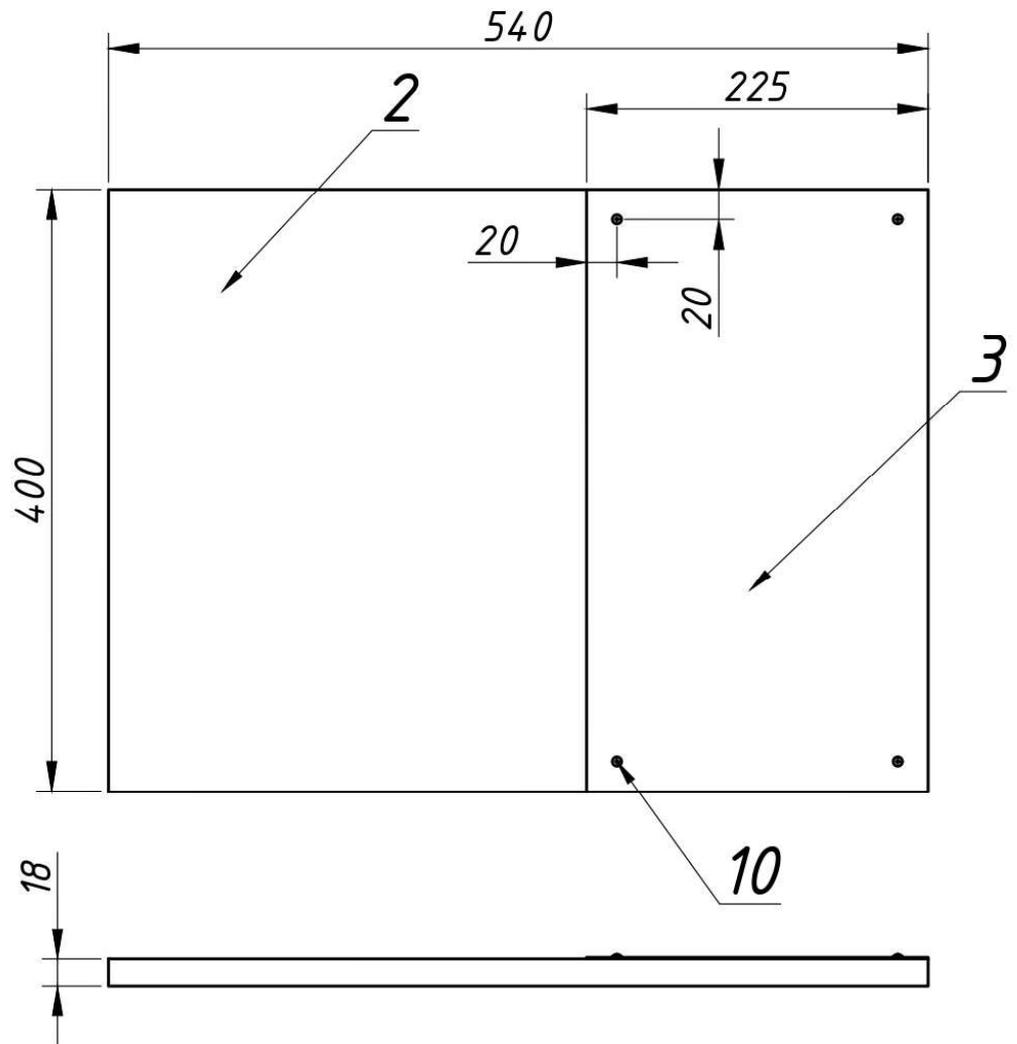






|          |                  |
|----------|------------------|
| Лист     | 5                |
| № докум. | 000.00002.005 КД |
| Дата     |                  |
| Подп.    |                  |

Приложение Е – прибор для определения пластичности. КД  
182



1. Неуказанные радиусы скруглений - 0,4 мм;
2. Острые кромки притупить
3. Неуказанные отклонения H14, h14,  $\frac{IT14}{2}$
4. \* - размеры для справок
5. Материал станины - сосна массив
6. Материал поверхности скольжения - листовая сталь  $h = 1$  мм

|      |      |          |      |       |
|------|------|----------|------|-------|
| Изм. | Лист | № Докум. | Дата | Подп. |
|      |      |          |      |       |

000.00002 006 КД

Лист

6



**Приложение Е –прибор для определения пластичности. КД**  
184

| <i>Спецификация</i> |                                       |                 |             |              |                         |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------|-------------|--------------|-------------------------|
| <i>№</i>            | <i>Наименование элемента</i>          |                 |             |              | <i>Кол-во</i>           |
| 1                   | <i>Основной корпус</i>                |                 |             |              | 1                       |
| 2                   | <i>Станина</i>                        |                 |             |              | 1                       |
| 3                   | <i>Поверхность скольжения</i>         |                 |             |              | 1                       |
| 4                   | <i>Гибкая оснастка</i>                |                 |             |              | 1                       |
| 5                   | <i>Съёмная форма</i>                  |                 |             |              | 1                       |
| 6                   | <i>Винтовой шток</i>                  |                 |             |              | 1                       |
| 7                   | <i>Вороток</i>                        |                 |             |              | 1                       |
| 8                   | <i>Зажим троса DIN 741 5 мм</i>       |                 |             |              | 4                       |
| 9                   | <i>Стропа</i>                         |                 |             |              | 2                       |
| 10                  | <i>Саморез оцинкованный 3,5x15 мм</i> |                 |             |              | 14                      |
| 11                  | <i>Гайка М12</i>                      |                 |             |              | 2                       |
|                     |                                       |                 |             |              |                         |
|                     |                                       |                 |             |              | <i>000.00002 008 КД</i> |
| <i>Изм.</i>         | <i>Лист</i>                           | <i>№ Докум.</i> | <i>Дата</i> | <i>Подп.</i> | <i>Лист</i>             |
|                     |                                       |                 |             |              | 8                       |

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Технологии строительных материалов и метрологии

**ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ**

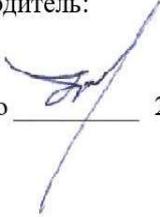
«Расчет состава бетона с обеспечением заданной пластичности»

Разработал:

Г. М. Хренов  29.05.2020

Научный руководитель:

д.т.н, проф.

Ю. В. Пухаренко  29.05.2020

Санкт-Петербург

2020

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное приложение разработано в рамках диссертационного исследования Хренова Г. М., посвящённого пластическим свойствам бетонных смесей и содержит подробное описание программы для ЭВМ, позволяющей осуществить расчетный этап подбора состава бетона с обеспечением заданного значения предельной растяжимости бетонной смеси.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ

Программа для ЭВМ «Расчет состава бетона с обеспечением заданной пластичности» разработана на базе программного обеспечения *Microsoft Excel* и представляет собой файл формата *.xls*. Файл открывается с помощью программы *Microsoft Excel* версии 2003 года и выше и содержит три листа. Лист 1 содержит необходимый интерфейс для взаимодействия с программой, ввода исходных данных и получения результата расчетов. Лист 2 и Лист 3 скрыты и защищены и содержат все необходимые для вычислительных операций команды в виде формул для расчета состава тяжелого бетона и мелкозернистого бетона соответственно.

## ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ

Интерфейс программы располагается на Листе 1 (рисунок 1) и содержит три поля:

1) **Свойства сырьевых материалов.** Данное поле (рисунок 2) предназначено для ввода исходных данных для расчета состава, а именно характеристик сырьевых материалов (нормальная плотность цемента, %; плотность цемента, кг/м<sup>3</sup>; активность цемента в возрасте 28 суток, МПа; плотность зерен песка, кг/м<sup>3</sup>; водопотребность песка, %; плотность зерен

щебня (гравия), кг/м<sup>3</sup>; водопотребность щебня (гравия), %;  $A$  – коэффициент учитывающий качество заполнителя), соотношения расхода песка и щебня (гравия)  $r$ , а так же содержит рекомендации по назначению  $A$  и  $r$ ;

2) **Техническое задание.** Данное поле (рисунок 3) предназначено для ввода данных из технического задания на подбор состава бетона ( $R_{сж}$  – предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток, МПа, предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м), в том числе выбора типа бетона с помощью всплывающего списка (тяжелый; мелкозернистый);

3) **Ответ.** Данное поле (рисунок 4) содержит результаты расчета состава бетона, а именно расходы основных компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси (цемент, песок, щебень (гравий), вода), расчетную плотность смеси в кг/м<sup>3</sup> и водоцементное отношение (В/Ц, в долях). В зависимости от выбранного типа бетона в поле «Техническое задание» данные для ответа копируются с Листа 1 или с Листа 2, на которых осуществляется расчет состава тяжелого бетона и мелкозернистого бетона соответственно.

| 1  |   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18                                 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |                |  |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|------------------------------------|----|----|----|----|----|----------------|--|
| 1  | Свойства сырьевых материалов                          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 2  | Вяжущее   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | Заполнители                                       |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 3  | Цемент  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | Песок   |    |    |    |    |    | Щебень (гравий)                    |    |    |    |    |    | $r = П/Щ(г) *$ |  |
| 4  | нормальная густота, %                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>                |    |    |    |    |    | плотность зерен, кг/м <sup>3</sup> |    |    |    |    |    | 0,6            |  |
| 5  | 29  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 2693  |    |    |    |    |    | 2704                               |    |    |    |    |    |                |  |
| 6  | плотность, кг/м <sup>3</sup>                          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | водопотребность, %                                |    |    |    |    |    | водопотребность, %                 |    |    |    |    |    | $\Delta **$    |  |
| 7  | 3100  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 6   |    |    |    |    |    | 3,5                                |    |    |    |    |    | 0,65           |  |
| 8  | активность, МПа                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 53,3  |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 9  | * - отношение расхода песка к расходу щебня (гравия): |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | $r = 0,55 \dots 0,8$ для щебня (гравия) фр. 5-20; |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | $r = 0,65 \dots 1,5$ для щебня (гравия) фр. 5-10  |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 12 | ** - коэффициент, учитывающий качество заполнителя:   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 13 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | $\Delta = 0,03$ - заполнители высокого качества   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | $\Delta = 0,60$ - заполнители рядовые             |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 15 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | $\Delta = 0,55$ - заполнители низкого качества    |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 16 | Техническое задание                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 17 | выберите тип бетона                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 18 | тяжелый   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 19 | R <sub>сж</sub> , МПа                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 20 | 50  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 21 | предельная  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 22 | растяжимость, мм/м                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 23 | 150   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 24 | Ответ   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 25 | расход на 1 м <sup>3</sup>                            |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 26 | Цемент  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 27 | 386   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 28 | Песок   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 29 | 685   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 30 | Щебень (Гравий)                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 31 | 1142  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 32 | Вода  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 33 | 199   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 34 | плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 35 | 2412  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 36 | В/Ц   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |
| 37 | 0,52  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |    |    |                                    |    |    |    |    |    |                |  |

Рисунок 1 – общий вид интерфейса программы

# Приложение Ж – программа для ЭВМ для расчета состава бетона

## 188

| Свойства сырьевых материалов                          |      |                                    |   |                                    |      |
|---|------|------------------------------------|---|------------------------------------|------|
| Вяжущее   |      |                                    | Заполнители   |                                    |      |
| Цемент  |      | Песок                              |   | Щебень (Гравий)                    |      |
| нормальная густота, %                                 | 29   | плотность зёрен, кг/м <sup>3</sup> | 2693  | плотность зёрен, кг/м <sup>3</sup> | 2704 |
| плотность, кг/м <sup>3</sup>                          | 3100 | водопотребность, %                 | 6   | водопотребность, %                 | 3,5  |
| активность, МПа                                       | 53,3 |                                    |   | $r = \rho/\rho(\rho)^*$            | 0,6  |
|   |      |                                    | $A^{**}$  |                                    |      |
|   |      |                                    | 0,65  |                                    |      |
| * - отношение расхода песка к расходу щебня (гравия): |      |                                    | $r = 0,55 \dots 0,8$ для щебня (гравия) фр. 5-20;<br>$r = 0,65 \dots 1,5$ для щебня (гравия) фр. 5-10                       |                                    |      |
| ** - коэффициент, учитывающий качество заполнителя:   |      |                                    | $A = 0,65$ - заполнители высокого качества<br>$A = 0,60$ - заполнители рядовые<br>$A = 0,55$ - заполнители низкого качества |                                    |      |

Рисунок 2 – поле «Свойства сырьевых материалов»

| Техническое задание           |         |
|-------------------------------|---------|
| выберите тип бетона           | тяжелый |
| Рсж, МПа                      | 50      |
| предельная растяжимость, мм/м | 150     |

Рисунок 3 – поле «Техническое задание»

| Ответ                              |      |
|------------------------------------|------|
| <b>расход на 1 м<sup>3</sup></b>   |      |
| Цемент                             | 386  |
| Песок                              | 685  |
| Щебень (Гравий)                    | 1142 |
| Вода                               | 199  |
| плотность смеси, кг/м <sup>3</sup> | 2412 |
| В/Ц                                | 0,52 |

Рисунок 4 – поле «Ответ»

В описанных полях серым цветом выделены ячейки доступные для редактирования, остальные ячейки заблокированы.

### РАСЧЕТ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Расчет состава тяжелого бетона осуществляется на скрытом и защищенном Листе 2, который содержит три области:

1) Область исходных данных для расчета. В данную область копируются все значения, указанные в полях «Свойства сырьевых материалов» и «Техническое задание», необходимые для расчета состава бетона.

2) Область расчета. В данной области осуществляются все расчетные операции.

3) Область результатов расчета. Содержит результат расчета состава в виде округленных до целых значений расходов основных компонентов в кг на 1 м<sup>3</sup>, округленной до целого значения расчетной плотности смеси в кг/м<sup>3</sup> и округленного до сотых долей водоцементного отношения в долях.

Расчет состава заключается в решении системы уравнений 1 – 4 и осуществляете путем варьирования одной переменной и поиском решения наиболее близкого к техническому заданию

$$R_B = R_{II} \cdot A \cdot \left( \frac{\Pi}{B} \pm 0,5 \right) \quad (1)$$

$$\frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{II}} + \frac{\Pi}{\rho_{II}} + \frac{\Pi}{\rho_{III}} = 1 \quad (2)$$

$$\left\{ \varepsilon^{mp} - 11,7 \cdot \left( \left( \frac{B}{\Pi} - \frac{\Pi \cdot B_{II} + \Pi \cdot B_{III}}{\Pi} \right) \cdot 100 - \Pi \Gamma \right) + \right. \quad (3)$$

$$\left. + 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{\Pi}{\rho_{II}} - \frac{\Pi}{\rho_{III}} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 \right.$$

$$r = \frac{\Pi}{\Pi} \quad (4)$$

где:  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $\epsilon^{пр}$  – заданная предельная растяжимость бетонной смеси;  $R_{Ц}$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей; Ц, В, П, Щ – расход цемента воды, песка, щебня на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{Ц}$ ,  $\rho_{П}$ ,  $\rho_{Щ}$  – плотность зерен цемента, песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – 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  $r = 0,65 \dots 1,5$ )

Последовательность расчета:

1) определение В/Ц исходя из заданной прочности бетона, активности цемента и качества используемого заполнителя по формуле 5

$$\frac{B}{Ц} = \frac{1}{\left( \frac{R_B}{R_{Ц} \cdot A} \pm 0,5 \right)} \quad (5)$$

где: В/Ц – водоцементное отношение, %;  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $R_{Ц}$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей

2) Строится массив данных в каждой строчке которого присваивается расход щебня (гравия) начиная с 300 кг и заканчивая 1500 кг с шагом 0,1 кг, таким образом массив содержит 12000 строчек, в каждой из которых осуществляется расчет состава и последующий расчет предельной растяжимости смеси по формулам 6 – 11 в следующей последовательности:

$$П = r \cdot Щ \quad (6)$$

$$\varphi^{шт} = \left( 1 - \frac{П}{\rho_{П}} - \frac{Щ}{\rho_{Щ}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

$$Ц = \frac{\varphi^{шт}}{100 \cdot \left( \frac{\rho_B}{\frac{B}{Ц} \cdot 100} - \frac{1}{\rho_{Ц}} \right)} \quad (8)$$

$$B = \frac{B}{Ц} \cdot Ц \quad (9)$$

$$\frac{B}{\text{Ц}_{\text{ист}}} = \frac{B - \text{П} \cdot \text{В}_{\text{п}} - \text{Щ} \cdot \text{В}_{\text{щ}}}{\text{Ц}} \quad (10)$$

$$\varepsilon^{\text{пр}} = 11,7 \cdot \left( \frac{B}{\text{Ц}_{\text{ист}}} - \text{НГ} \right) + 0,032 \cdot (\varphi^{\text{цт}} - 37)^3 + 137 \quad (11)$$

где: Ц, П, Щ, В – расход цемента, песка, щебня (гравия), воды соответственно на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, кг;  $r$  – отношение расхода песка к расходу щебня (гравия);  $\varphi^{\text{цт}}$  – объемная доля цементного теста в смеси, %; В/Ц – водоцементное отношение в долях;  $\text{В}/\text{Ц}_{\text{ист}}$  – истинное водоцементное отношение, %;  $\text{В}_{\text{п}}$  – водопотребность песка в долях;  $\text{В}_{\text{щ}}$  – водопотребность щебня (гравия) в долях;  $\varepsilon^{\text{пр}}$  – предельная растяжимость бетонной смеси.

3) В полученном массиве данных с помощью функции «ПОИСК» программа выбирает строку, в которой значение предельной растяжимости смеси наиболее близко к заданному в техническом задании.

4) Из выбранной в пункте 3 строки программа с помощью функции «ИНДЕКС» копирует значения расходов цемента, песка, щебня (гравия) и воды в область результатов расчета, при этом осуществляется округление до целых значений.

5) С помощью полученных значений программа рассчитывает расчетную плотность смеси и водоцементное отношение по формулам 12 и 13 соответственно.

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В}}{1 \text{ м}^3} \quad (12)$$

$$\frac{B}{\text{Ц}} = \frac{B}{\text{Ц}} \quad (13)$$

где:  $\rho_{\text{см}}$  – расчетная плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>; Ц, П, Щ, В – расход цемента, песка, щебня (гравия) и воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси соответственно, кг; В/Ц – водоцементное отношение в долях.

### РАСЧЕТ СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Расчет состава мелкозернистого бетона осуществляется на скрытом и защищенном Листе 3, который содержит три области:

1) Область исходных данных для расчета. В данную область копируются все значения, указанные в полях «Свойства сырьевых материалов» и «Техническое задание», необходимые для расчета состава бетона.

2) Область расчета. В данной области осуществляются все расчетные операции.

3) Область результатов расчета. Содержит результат расчета состава в виде округленных до целых значений расходов основных компонентов в кг на 1 м<sup>3</sup>, округленной до целого значения расчетной плотности смеси в кг/м<sup>3</sup> и округленного до сотых долей водоцементного отношения в долях.

Расчет состава заключается в решении системы уравнений 14 – 16 и осуществляете путем варьирования одной переменной и поиском решения наиболее близкого к техническому заданию

$$\left\{ \begin{array}{l} R_B = R_C \cdot A \cdot \left( \frac{Ц}{В} \pm 0,3 \right) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{В}{\rho_B} + \frac{Ц}{\rho_C} + \frac{П}{\rho_P} = 1 \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon^{пр} = 11,7 \cdot \left( \left( \frac{В}{Ц} - \frac{П \cdot В_P}{Ц} \right) \cdot 100 - \text{НГ} \right) + 0,032 \cdot \left( \left( 1 - \frac{П}{\rho_P} \right) \cdot 100 - 37 \right)^3 + 137 \end{array} \right. \quad (16)$$

где:  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $\epsilon^{пр}$  – заданная предельная растяжимость бетонной смеси;  $R_C$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителя;  $Ц$ ,  $В$ ,  $П$  – расход цемента, воды, песка на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_C$ ,  $\rho_P$  – плотность зерен цемента, песка, кг/м<sup>3</sup>;

Последовательность расчета:

1) определение В/Ц исходя из заданной прочности бетона, активности цемента и качества используемого заполнителя по формуле 17

$$\frac{В}{Ц} = \frac{1}{\left( \frac{R_B}{R_C \cdot A} \pm 0,3 \right)} \quad (17)$$

где:  $V/C$  – водоцементное отношение, %;  $R_B$  – заданная прочность бетона, МПа;  $R_C$  – активность цемента, МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителя

2) Строится массив данных в каждой строчке которого присваивается расход песка начиная с 500 кг и заканчивая 2000 кг с шагом 0,1 кг, таким образом массив содержит 15000 строчек, в каждой из которых осуществляется расчет состава и последующий расчет предельной растяжимости смеси по формулам 18 – 22 в следующей последовательности:

$$\varphi^{ПТ} = \left(1 - \frac{П}{\rho_{П}}\right) \cdot 100 \quad (18)$$

$$C = \frac{\varphi^{ПТ}}{100 \cdot \left(\frac{\rho_B}{\frac{B}{C} \cdot 100} - \frac{1}{\rho_C}\right)} \quad (19)$$

$$B = \frac{B}{C} \cdot C \quad (20)$$

$$\frac{B}{C_{ист}} = \frac{B - П \cdot B_{П}}{C} \quad (21)$$

$$\varepsilon^{пр} = 11,7 \cdot \left(\frac{B}{C_{ист}} - НГ\right) + 0,032 \cdot (\varphi^{ПТ} - 37)^3 + 137 \quad (22)$$

где:  $C, П, B$  – расход цемента, песка и воды соответственно на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, кг;  $\varphi^{ПТ}$  – объемная доля цементного теста в смеси, %;  $V/C$  – водоцементное отношение в долях;  $B/C_{ист}$  – истинное водоцементное отношение, %;  $B_{П}$  – водопотребность песка в долях;  $\varepsilon^{пр}$  – предельная растяжимость бетонной смеси.

3) В полученном массиве данных с помощью функции «ПОИСК» программа выбирает строку, в которой значение предельной растяжимости смеси наиболее близко заданному в техническом задании.

4) Из выбранной в пункте 3 строки программа с помощью функции «ИНДЕКС» копирует значения расходов цемента, песка и воды в область результатов расчета, при этом осуществляется округление до целых значений.

5) С помощью полученных значений программа рассчитывает расчетную плотность смеси и водоцементное отношение по формулам 23 и 24 соответственно.

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\text{Ц} + \text{П} + \text{В}}{1 \text{ м}^3} \quad (23)$$

$$\text{В} / \text{Ц} = \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \quad (24)$$

где:  $\rho_{\text{см}}$  – расчетная плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>; Ц, П, В – расход цемента, песка и воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси соответственно, кг; В/Ц – водоцементное отношение в долях.

## РУКОВОДСТВО

Для расчета состава бетона с помощью программы для ЭВМ необходимо открыть файл программы в *Microsoft Excel* версии 2003 года и выше, после чего пользователь сможет взаимодействовать с интерфейсом программы (рисунок 1) следующим образом:

1) В поле «Свойства сырьевых материалов» в ячейки, выделенные серым цветом и доступные для редактирования, пользователь вносит с помощью физической или цифровой клавиатуры необходимые данные. При этом, для ввода данных в ячейку необходимо навести на неё курсор и нажать левую клавишу цифровой или физической «мышь», после чего удалить старое значение с помощью клавиш *Delete* или *Backspace*, и только потом ввести необходимос значение.

2) В поле «Техническое задание» в ячейки, выделенные серым цветом и доступные для редактирования, пользователь вносит необходимые значения. Требуемую прочность бетона и предельную растяжимость бетонной смеси по пункту 1. Тип бетона выбирается из выпадающего списка. Для это

этого необходимо навести курсор ячейку с указанным типом бетона и выбрать её, нажав на левую клавишу «мышь», после чего справа от выбранной ячейки появится иконка выпадающего списка в виде треугольника. Установив на иконку курсор и нажав левую клавишу «мышь» открывается выпадающий список, в котором содержится две строки: тяжелый; мелкозернистый. Наведя курсор на соответствующую строку и нажав левую клавишу «мышь» в техническое задание вносится необходимый тип бетона.

3) Программа в автоматическом режиме осуществляет все расчеты при любом изменении в исходных данных, по этому сразу после внесения всех данных, в поле «ответ» содержатся корректные результаты расчета состава бетона.