

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Донской государственный технический университет»

*На правах рукописи*



**Халезин Сергей Валерьевич**

**ПРОЧНОСТЬ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА  
И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ КАРКАСНОЙ СТРУКТУРЫ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ПОГРУЖЕНИЕМ КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ  
В РАСТВОРНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
Г.В. Несветаев

Ростов-на-Дону

2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

№	Содержание	Стр.
	Введение	5
1.	Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования	13
1.1	Роль бетона и железобетона в современном обществе	13
1.2	Анализ основных известных положений современного бетоноведения	14
1.3	Основные положения технологии бетонов нового поколения	16
1.4	Влияние пористости цементного камня и бетона на его свойства	19
1.5	Влияние усадки на свойства железобетонных конструкций. Основные факторы, определяющие усадку	23
1.6	Ползучесть бетона. Основные факторы, определяющие ползучесть	26
1.7	Технология раздельного бетонирования	27
	Выводы	28
	Глава 2. Материалы и методика экспериментальных исследований	30
2.1	Материалы	30
2.2	Методика экспериментальных исследований	34
	Глава 3. Влияние способа приготовления бетонов и свойств материалов на предел прочности	42
3.1	Свойства растворной составляющей	42
3.1.1	Проектирование состава растворной составляющей бетона	42
3.1.2	Зависимость предела прочности растворной составляющей от величины В/Ц	46
3.1.3	Зависимость предела прочности растворной составляющей от ее пористости (вида песка)	48

3.1.4	Соотношение пределов прочности на изгиб и сжатие растворной составляющей	49
3.1.5	Связь между пределом прочности растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) на сжатие и скоростью ультразвукового импульса (УЗИ)	50
3.1.6	Модуль упругости растворной составляющей	52
3.2	Влияние способа изготовления бетона и свойств растворной составляющей на предел прочности бетона	53
3.2.1	Влияние величины В/Ц (предела прочности растворной составляющей) на предел прочности на сжатие бетонов с каркасной структурой	55
3.2.2	Предел прочности на осевое растяжение	64
3.2.3	Кинетика твердения	65
3.2.4	Удельный расход цемента	66
3.2.5	Оценка себестоимости материалов в бетонах каркасной структуры	70
	Выводы	77
	Глава 4. Деформационные свойства бетонов каркасной структуры	79
4.1	Начальный модуль упругости бетона	80
4.1.1	Моделирование влияния рецептурных факторов на начальный модуль упругости бетона	80
4.1.2	Экспериментальные исследования модуля упругости бетона с фиксированной структурой	87
4.2	Относительная деформация, соответствующая пределу кратковременной прочности	106
4.3	Коэффициент упругости	108
4.4	Коэффициент ползучести	109
4.4.1	Моделирование влияния на коэффициент ползучести бетона	

рецептурных факторов	112
4.4.2 Результаты экспериментальных исследований коэффициента ползучести бетона	125
Выводы	129
Глава 5. Структура и морозостойкость бетонов с каркасной структурой	131
5.1 Средняя плотность и пористость бетонов каркасной структуры	131
5.2 Морозостойкость бетонов с каркасной структурой	133
5.2.1 Формальная зависимость морозостойкости и прочности	133
5.2.2 Анализ внутрискруктурных напряжений в бетонах каркасной структуры	136
5.2.3 Критерии морозостойкости бетонов, учитывающие их структуру	144
5.2.4 Результаты экспериментальных исследований морозостойкости бетонов каркасной структуры	149
5.3 Усадка бетона каркасной структуры	152
Выводы	156
Заключение	158
Список литературы	161
Приложение	176

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Широко применяемые в современном строительстве железобетонные конструкции согласно СП 63.13330 должны удовлетворять проектным требованиям по безопасности, эксплуатационной пригодности, долговечности. Применительно к бетону указанные показатели качества железобетонных конструкций обеспечиваются соответствующими величинами предела прочности бетона на сжатие и растяжение, начального модуля упругости, коэффициента ползучести, усадки, морозостойкости и водонепроницаемости. При прочих равных условиях все указанные свойства бетона зависят от его пористости. Одной из основных задач бетоноведения является минимизации пористости цементного камня (бетона) и предотвращения появления технологических дефектов в структуре бетона, что в последние 30-40 лет как правило реализуется посредством воздействия различными модификаторами или технологическими приемами на структуру цементного камня и контактную зону «цементный камень – заполнитель». К основным технологическим направлениям развития технологии бетонов могут быть отнесены совершенствование способов приготовления, в т.ч. технологии двухстадийного приготовления смеси, транспортирования, укладки, в т.ч. при раздельном бетонировании, и уплотнения бетонной смеси, ухода за твердеющим бетоном. Поскольку основным источником пор в бетонах на плотных заполнителях является цементный камень, уменьшение объема цементного камня (растворной составляющей) в структуре бетона посредством реализации технологии раздельного бетонирования представляется одним из перспективных направлений развития технологии бетонов. Одним из направлений технологии раздельного бетонирования является получение бетонов каркасной структуры двумя способами: нагнетанием растворной составляющей в пустоты каркаса из крупного заполнителя и погружением каркаса из крупного заполнителя в растворную составляющую. Современные суперпластифицирующие добавки (СП),

позволяющие получать высокоподвижные цементные суспензии, открывают новые возможности в реализации технологии раздельного бетонирования. Выявление основных закономерностей формирования структуры и свойств бетонов каркасной структуры, полученных на основе высокоэффективных СП, представляет актуальную проблему, решение которой составит определенный вклад в развитие технологии бетонов.

**Степень разработанности темы.** Совершенствование на основе применения эффективных модификаторов способов приготовления, в т.ч. двухстадийного, транспортирования, укладки и уплотнения, в т.ч. при раздельном бетонировании, включая технологию бетонов каркасной структуры, бетонной смеси, ухода за твердеющим бетоном представляются важными направлениями развития технологии бетонов (Бабков В.В., Баженов Ю.М., Блещик Н.П., Калашников В.И., Каприелов С.С., Лесовик В.С., Макридин Н.И., Соломатов В.И., Шейнфельд А.В. и др.). Пористость цементного камня зависит от величины В/Ц и степени гидратации, а пористость тяжелого бетона, помимо этого, определяется пористостью контактной зоны, технологической пористостью, концентрацией цементного камня в бетоне, собственными деформациями, наличием модификаторов (Ахвердов И.Н., Баженов Ю.М., Блещик Н.П., Гочаков Г.И., Капитонов С.М., Каприелов С.С., Ларионова З.М., Несветаев Г.В., Пауэрс Т.К., Шейкин А.Е. и др.). Предел прочности бетона  $R$  определяется величиной его пористости  $P$  и прочностью «скелета»  $R_0$ , которые зависят от В/Ц, свойств цемента, наличия модификаторов, при этом рост концентрации крупного прочного заполнителя повышает предел прочности (Баженов Ю.М., Берг О.Я., Гладков Г.И., Гордон С.С., Комохов П.Г., Мохов В.Н., Соломатов В.И. и др.). Начальный модуль упругости бетона зависит от предела прочности бетона, модуля упругости крупного заполнителя, модуля упругости цементного камня, наличия модификаторов, при этом рост концентрации крупного высокомодульного заполнителя повышает начальный модуль упругости бетона (Берг О.Я., Бондаренко В.М., Каприелов С.С., Кардумян Г.С., Несветаев Г.В., Шейкин

А.Е. и др.). Усадка портландцементного бетона, вызывающая образование негативно влияющих на все свойства железобетонной конструкции трещин, на ранней стадии (контракционная), возрастает при снижении В/Ц, в дальнейшем (влажностная, карбонизационная) снижается при уменьшении В/Ц. Усадка зависит от свойств цемента и заполнителей, причем модификаторы могут оказывать существенное влияние на величину усадки, а рост концентрации заполнителя позволяет существенно снизить усадку бетона (Александровский С.В., Блещик Н.П., Демьянова В.С., Калашников В.И., Несветаев Г.В., Улицкий И.И., Шейкин А.Е., Цилосани З.Н. и др.). Ползучесть бетона зависит от продолжительности действия и вида нагрузки, возраста бетона и предела прочности к моменту загрузки, состава бетона и свойств материалов для его приготовления, условий твердения бетона, условий эксплуатации. Модификаторы могут значительно влиять на ползучесть бетона, а рост концентрации высокомодульного крупного заполнителя в определенной степени благоприятно влияет на ползучесть (Александровский С.В., Берг О.Я., Бондаренко В.М., Гансен Т.К., Гвоздев А.А., Каприелов С.С., Несветаев Г.В., Серегин И.Н., Улицкий И.И., Цилосани З.Н. Шейкин А.Е., Шейнфельд А.В. и др.). Исходя из вышеизложенного повышение концентрации крупного высокомодульного заполнителя благоприятно влияет на все конструкционные свойства бетонов и может быть реализовано посредством технологии раздельного бетонирования при формировании каркасной структуры бетона.

**Цель исследования:** разработать способ получения бетона по технологии раздельного бетонирования, характеризующегося улучшенными деформационными свойствами и минимальным удельным расходом цемента за счет достижения предельной концентрации крупного заполнителя, выявить основные закономерности «состав-технология-структура-свойства» бетонов каркасной структуры.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи исследования:

- проанализировать известные способы отдельного бетонирования и оценить целесообразность их применения с учетом использования высокоэффективных добавок-разжижителей;

- разработать способ получения бетонов каркасной структуры на основе высокоэффективных добавок-разжижителей;

- выявить основные закономерности изменения строительно-технических свойств бетонов каркасной структуры в зависимости от способа получения бетона и свойств его составляющих;

- сформулировать предложения по рациональному применению бетонов каркасной структуры, получаемых по разработанному способу.

Объект исследования – бетоны каркасной структуры, полученные способом нагнетания растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя и способом погружения крупного заполнителя в растворную составляющую.

Предмет исследования – процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры и взаимосвязь свойств бетонов каркасной структуры.

#### **Научная новизна работы:**

- разработан способ получения бетонов каркасной структуры посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую, обеспечивающий концентрацию крупного заполнителя, близкую к предельной;

- развиты научные представления о влиянии модуля крупности песка на свойства мелкозернистых бетонов (растворная составляющая), полученных с применением эффективных добавок-разжижителей;

- выявлены закономерности изменения строительно-технических свойств бетонов каркасной структуры, полученных способом нагнетания растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя (1) и способом погружения крупного заполнителя в растворную составляющую (2) в зависимости от свойств компонентов, теоретически обоснована и



экспериментально доказана эффективность способа 2;

- предложена модель, включающая 4 элемента структуры бетона (крупный заполнитель, мелкий заполнитель, цементный камень, контактная зона «цементный камень – заполнитель»), описывающая влияние концентрации и свойств элементов на модуль деформаций бетонов при кратковременном (начальный модуль упругости) и длительном (коэффициент ползучести) действии нагрузки;

- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена роль внутрискруктурных напряжений вследствие температурной несовместимости заполнителя и цементного камня на морозостойкость бетонов с повышенной концентрацией заполнителя, развиты научные представления о зависимости морозостойкости бетонов от соотношения условно-закрытой и открытой пористости;

- развиты научные представления о влиянии структуры бетона и свойств его компонентов на величину усадочных деформаций.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии научных представлений и уточнении известных закономерностей, определяющих изменение свойств бетонов посредством регулирования параметров в системе «состав - технология – структура – свойства» в широком диапазоне изменения соотношения «растворная составляющая»/«крупный заполнитель».

**Практическая значимость работы:**

- разработан способ получения посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую бетонов каркасной структуры с пределом прочности на сжатие до 80 МПа и удельным расходом цемента менее 4 кг/(м<sup>3</sup>·МПа) при объемной концентрацией крупного заполнителя до 0,66;

- выявлены зависимости строительно-технических свойств бетонов каркасной структуры от состава и способа изготовления, получены уравнения, описывающие изменение прочностных и деформационных

свойств бетонов от рецептурно-технологических факторов и видов нагружения;

- произведена оценка экономической эффективности бетонов каркасной структуры и определены целесообразные области их применения.

**Методология и методы исследования:** уточнение основополагающих зависимостей «состав – технология – структура-свойства», экспериментальные исследования с использованием стандартных и оригинальных методик, численные эксперименты на основе предложенных в работе математических моделей. Объект исследования – структура и свойства мелкозернистых бетонов из высокоподвижных смесей, бетонов каркасной структуры, полученных различными способами отдельного бетонирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследований и выявленные закономерности прочностных и деформационных свойств мелкозернистых бетонов, полученных из высокоподвижных бетонных смесей с использованием песков с модулем крупности от 1,56 до 2,72;

- результаты исследований и выявленные закономерности прочностных и деформационных при кратковременном и длительном нагружении свойств, пористости, морозостойкости и усадки бетонов каркасной структуры, полученных способом нагнетания растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя (1) и способом погружения крупного заполнителя в растворную составляющую (2);

- предложенная модель, результаты исследований и выявленные закономерности влияния свойств и объемной концентрации элементов структуры бетона на его модуль деформаций при кратковременном и длительном нагружении;

- результаты исследований влияния пористости и внутрискруктурных напряжений при циклическом изменении температуры на морозостойкость бетонов каркасной структуры;

- результаты исследований влияния макроструктуры бетона на величину деформаций усадки.

**Степень достоверности** научных положений, выводов и практических рекомендаций обеспечена использованием стандартных методов оценки строительно-технических свойств бетона, применением поверенного оборудования, непротиворечивостью полученных результатов основным положениям бетоноведения, научной обоснованностью и статистической надежностью при обработке результатов экспериментальных исследований.

**Реализация результатов работы:** результаты исследований рассмотрены, одобрены и используются ООО «Инсула» при производстве растворной составляющей в виде сухих строительных смесей для раздельного бетонирования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы, технологии и конструкции», посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова (Грозный, март 2015);

- Международной научно-технической конференции Ростовского государственного строительного университета «Строительство – 2015» (Ростов-на-Дону, 2015);

- Международной научно-технической конференции «Высокопрочные цементные бетоны: технология, конструкции, экономика (ВПБ 2016), Казань, 2016;

- XXIV Международной заочной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», (Белгород, 31 марта 2017).

Международной научно-практической конференции «Строительство и архитектура 2017» –ДГТУ АСА, (Ростов-на-Дону, 2017).

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях

из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад соискателя** заключается в планировании и реализации экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований. Основные научные результаты получены лично соискателем лично. Отдельные вопросы теоретических и экспериментальных исследований и внедрение результатов выполнены с соавторами, приведенными в списке публикаций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 136 наименований и приложения. Основной текст диссертации изложен на 160 страницах, включая 58 рисунков и 25 таблиц.

## **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1 Роль бетона и железобетона в современном обществе**

Как известно, удовлетворение потребностей человека в жилье, общественной и культурной жизни, развитии производительных сил общества, благоустройстве среды обитания, обеспечении обороноспособности и т.д. связано с соответствующими областями строительства (жилищное, гражданское, промышленное, сельскохозяйственное, транспортное, энергетическое и др.). Строительство является важной сферой экономической деятельности человека и связано с переработкой больших объемов нерудных ископаемых, потреблением значительной доли энергоресурсов, продукции смежных отраслей. В строительстве экономически развитых стран занята, как правило, значительная часть трудоспособного населения, на долю строительства приходится до 45 % потребляемой энергии и до 40 % перерабатываемых материалов[64]. В связи с тем, что строительство формирует не только экономический потенциал страны и человечества, но и может изменять окружающую среду и даже климат, важной задачей является применение в строительстве ресурсосберегающих технологий на основе достижений науки и техники в строительных технологиях.

Широко применяемые в современном строительстве железобетонные конструкции согласно СП 63.13330 должны удовлетворять проектным требованиям по безопасности, эксплуатационной пригодности, долговечности и другим требованиям, указанным в задании на проектирование [91]. При расчете конструкций по предельным состояниям первой группы (прочности) основным требованием к бетону выступает обеспечение необходимой прочности (расчетного сопротивления). При расчете по второй группе предельных состояний (образование и раскрытие трещин, деформации) основным требованием к бетону выступают обеспечение необходимого предела прочности на осевое растяжение, начального модуля упругости, параметров деформирования при длительном

действии нагрузки (коэффициент ползучести), усадки бетона. С точки зрения обеспечения долговечности конструкций (третья группа предельных состояний), в зависимости от условий эксплуатации, ключевыми факторами, определяющими долговечность, могут выступать такие свойства бетона, как морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, стойкость к агрессивным воздействиям, температурные и влажностные деформации, истираемость и др.

## **1.2 Анализ основных известных положений современного бетоноведения**

Как известно, все свойства бетона в той или иной степени определяются объемом и характером его пор [3-5,29,55,64,70,104,109,110,123 и др.]. Одной из основных задач бетоноведения в последние тридцать-сорок лет является воздействие различными модификаторами или технологическими приемами на структуру цементного камня и контактную зону «цементный камень – заполнитель» с целью минимизации пористости цементного камня в объеме и в контактной зоне «цементный камень – заполнитель», т.е. минимизация рецептурной пористости бетона в сочетании с предотвращением появления технологических дефектов в структуре бетона на этапах укладки и уплотнения бетонной смеси и ухода за твердеющим бетоном [109,110 и др.]. Основными рецептурными факторами, определяющими структуру цементного камня и контактной зоны, являются:

- снижение водоцементного отношения (далее – В/Ц) посредством применения СП [7-9,12-14,33,35,36,40,44,45 и др.];

- регулирование пористости и свойств контактной зоны посредством введения минеральных модификаторов, влияющих на собственные деформации цементного камня, его пористость и сцепление с заполнителем [4,7,8,12,13,35,43-45,60,61,87,93,109,110,115,118,130,131,133,134 и др.];

- уменьшение объема растворной составляющей (цементного камня) в структуре бетона – «лишний цемент портит бетон» [3,4,7,11,64,123 и др.].

Достоверно известно, что:

- прочность сцепления цементного камня с заполнителем зависит от химико-минералогического состава заполнителей, характера поверхности заполнителей и чистоты их поверхности [20, 28, 29, 38, 48, 50, 62, 98, 106, 116, 123, 130, 131];

- прочность сцепления цементного камня с заполнителем возрастает при увеличении прочности цементного камня на растяжение [123];

- контактная зона «цементный камень – заполнитель» обычно имеет толщину порядка 60 мкм и состоит из нескольких, по некоторым данным до 4, различающихся по плотности и свойствам слоев [28,48-50,98];

- пористость контактной зоны «цементный камень – плотный заполнитель» в некоторых случаях несколько выше пористости цементного камня в объеме, особенно в слое толщиной до 30 мкм [133], вследствие более высокого значения В/Ц [134], при этом на пористость контактной зоны оказывает влияние и минералогия заполнителя;

- собственные деформации цементного камня оказывают влияние на величину сцепления с заполнителем, в частности, усадка приводит к снижению величины сцепления [28,48,49];

- в бетонах, изготовленных с применением химически не взаимодействующие с вяжущим заполнителей (изверженные горные породы), контактная зона «цементный камень – заполнитель» практически отсутствует, а прочность адгезионного сцепления близка к нулю, при этом сцепление цементного камня с заполнителем обеспечивается в основном за счет зацепления неровностей поверхности [28,38,48,98,106,129,130];

- в бетонах, изготовленных с применением химически и физико-химически взаимодействующих с вяжущим заполнителей (карбонатные породы и кварцевые пески), возможно, некоторое снижение прочности заполнителя в зоне контакта, при этом возникает диффузный промежуточный слой, за счет чего прочность контактной зоны «цементный камень – заполнитель» примерно равна прочности цементного камня в объеме [28,38,98,106,129,130];

- прочность бетона на разных заполнителях вследствие различной прочности сцепления цементного камня с заполнителем может различаться до 50% при одинаковых свойствах цементного камня, при этом более высокую прочность обеспечивают заполнители, химически и физико-химически взаимодействующих с вяжущим [28].

### **1.3 Основные положения технологии бетонов нового поколения**

К основным технологическим направлениям, обеспечивающим получение бетонов нового поколения, могут быть отнесены совершенствование способов приготовления, транспортирования, укладки и уплотнения бетонной смеси, ухода за твердеющим бетоном, реализация технологии двухстадийного приготовления смеси и отдельного бетонирования [6,12,13,27,43,45,109-111 и др.].

Судя по количеству исследований в области технологии высокопрочных бетонов, в т.ч. получаемых из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей, можно утверждать о перспективности производства железобетонных конструкций из указанных бетонов, поскольку это позволяет снизить расход арматурной стали, уменьшить размер сечений, повысить долговечность конструкций [1,6,7,9,11–13,20,21,31,35,42,44,46,53,57,60,61,73,74,107,115,118 и др.]. Основа технологии высокопрочных бетонов была заложена фундаментальными исследованиями влияния свойств материалов, состава бетона, технологии приготовления смеси и бетонирования конструкции на основные показатели качества бетона. Выполненные за многие десятилетия исследования позволили сформулировать основные положения механики разрушения бетона и определили основные направления технологии высокопрочных бетонов [3 –8, 10, 11, 15, 20, 25, 27, 29, 37, 48 – 50, 55, 63, 96, 98, 103, 106, 108, 114, 116, 119, 120, 123, 125, 127, 128 и др.]. Само понятие «высокопрочный бетон» на различных этапах развития бетоноведения трактовалось по-разному. Так, к высокопрочным бетонам предлагалось



относить все бетоны, предел прочности которых превышал активность цемента, что совершенно не логично, поскольку бетон с прочностью 43 МПа на цементе М400 в данном случае будет высокопрочным, а бетон с пределом прочности 48 МПа на цементе М500 – нет. Баженов Ю.М. для легких высокопрочных бетонов предлагал критерий  $R/\rho > 25$ . Этому критерию примерно соответствует тяжелый бетон класса В60, согласно ГОСТ 31914 – 2012 относящийся к высокопрочным бетонам. По нормам EN к высокопрочным относятся бетоны класса С50/60 (аналог В60) и выше [6,7,13,27,31,64,126 и др.].

К основным положениям технологии высокопрочных бетонов относительно рецептуры, а значит, и технологии высокоэффективных бетонов, характеризующихся лучшим соотношением расхода цемента и предела прочности (в литературе этот показатель иногда называется удельным расходом цемента, кг/(м<sup>3</sup>·МПа)), относятся [3–7,11,27–29,35,42,45, 55,60,61,73,74,107,115,117,118 и др.]:

- применение высокоактивных цемента, характеризующихся рациональным сочетанием соотношения клинкерных минералов С3S/С3А при содержании С3А не более 7% и С3S в пределах 58 – 63%, минимальной водопотребностью цемента (нормальной густотой), рациональной тонкостью помола (удельная поверхность 3400 – 3900 см<sup>2</sup>/г) и дозировкой гипсового камня, зависящей от количества С3А: по Meissner  $SO_3 = a + 0,115 \cdot C_3A$  А (в пределах 2,65 – 3,1%), минимальной контрактционной и влажностной усадкой в присутствии суперпластификатора;

- применение крупного заполнителя с пределом прочности, превышающем предел прочности бетона не менее чем на 20%, обладающим развитой шероховатой поверхностью, формой зерен, близкой к кубовидной, с гранулометрическим составом, максимально соответствующим кривой Фуллера, с минимальным содержанием ПГ до 0,5% (в некоторых источниках называется цифра до 0,2%);

- применение мелкого заполнителя с модулем крупности более 2,5, с минимальным содержанием ПГ до 1% (в некоторых источниках называется цифра до 0,5%), с гранулометрическим составом, максимально соответствующим кривой Фуллера;

- применение химических добавок, не оказывающих негативного влияния на процессы гидратации цемента, обеспечивающих минимальное водосодержание бетонной смеси при заданной удобоукладываемости (СП) и регулирующих кинетику твердения (регуляторы схватывания и твердения), поскольку интенсивный рост прочности в ранний период может привести к микротрещинообразованию вследствие контракционной усадки и температурных деформаций;

- применение тонкодисперсных минеральных добавок, обеспечивающих уплотнение структуры цементного камня и контактной зоны «цементный камень – заполнитель»;

- подбор компонентов, обеспечивающих с учетом всех вышеперечисленных факторов, максимальное сцепление цементного камня с заполнителем, в т.ч. за счет химического взаимодействия заполнителя с продуктами гидратации портландцемента.

Однако технология высокопрочных бетонов, предусматривающая традиционный одностадийный способ приготовления бетонной смеси, обладает определенным недостатком – неизбежным ростом объема цементного теста (камня) в структуре бетона, что, как правило, сопровождается ухудшением таких показателей, как усадка, особенно контракционная, ползучесть. В СП 63.13330 нормирование усадочных деформаций бетона предусматривает увеличение деформаций усадки с ростом класса бетона. Определенным шагом в устранении указанных недостатком можно рассматривать технологию «порошковых» бетонов [117].

#### **1.4 Влияние пористости цементного камня и бетона на его свойства**

Развитие технологии бетона сопровождается появлением новых видов бетонов, что предопределяет необходимость широкого изучения свойств бетонов, определяющих прочность, жесткость, трещиностойкость и долговечность железобетонных конструкций. К таким свойствам, в первую очередь, относятся предел прочности на сжатие и растяжение, модуль упругости и параметры диаграммы «напряжения – деформации» при кратковременном центральном и внецентренном сжатии, закономерности деформирования при длительном нагружении, в частности, такие показатели, как мера и коэффициент ползучести, собственные деформации бетона, связанные с процессом гидратации – контракционная усадка, деформации бетона, обусловленные массообменом с окружающей средой – усадка при высыхании (влажностная усадка), карбонизационная усадка [2,4, 5 –7,11-13, 23,25,33,37,41,44,52,56,57,74,75,76,80,85,99,102,121,122,127,128 и др.]. Поскольку практически все свойства бетона, как уже отмечалось, определяются величиной и характером его пористости, а пористость бетона на плотных заполнителях в основном определяется пористостью цементного камня и контактной зоны, значительная часть исследований по совершенствованию технологии бетонов, в т.ч. высокопрочных, посвящена вопросам формирования пористости цементного камня, в т.ч. в присутствии различных добавок – СП, регуляторов схватывания и твердения, минеральных, органо-минеральных модификаторов [3,4,7,8,12,13,33,36,40,41, 57,60,61,70,71,109,110,118 и др.].

Одной из актуальных задач бетоноведения является выявление и уточнение зависимостей «рецептура + условия твердения – структура», «структура – свойства», «предел прочности на сжатие – свойства». Указанные зависимости являются основой для нормирования свойств бетонов, необходимых для расчета железобетонных конструкций по всем группам предельных состояний. На сегодняшний день можно считать в

определенной степени известными следующие закономерности, в т.ч. описываемые соответствующими аналитическими зависимостями:

- пористость цементного камня зависит от величины В/Ц и степени гидратации цемента, которая в определенной степени зависит от тонкости помола. Пористость тяжелого бетона, помимо этого, определяется пористостью контактной зоны, зависящей, в т.ч., от свойств заполнителей, и технологической пористостью (дефекты уплотнения, наличие вовлеченного воздуха и т.п.) [3-6,12,13,25,29,33,49,55,64,70,82,123,126 и др.]. На величину пористости цементного камня могут оказывать влияние его собственные деформации, например, расширение в процессе твердения [70]. Пористость цементного камня практически не зависит от минералогического состава цемента [97]. Из вышеизложенного для уменьшения величины пористости вытекает необходимость минимизации величины В/Ц и обеспечения благоприятных условий для повышения степени гидратации цемента. При этом следует учитывать, что чрезмерное повышение тонкости помола цемента часто негативно влияет на долговечность цементного камня вследствие исчерпания «клинкерного фонда»;

- предел прочности бетона  $R$  определяется величиной его пористости  $P$  и прочностью «скелета»  $R_0$ . Известны зависимости вида  $R = f(P)$ ,  $R = R_0 \cdot \exp(-kP)$  [64]. Поскольку, как отмечено выше, пористость в значительной степени определяется величиной В/Ц, то и предел прочности бетона зависит от величины В/Ц, что известно как «закон водоцементного отношения», например, в виде зависимости [5]  $R = aR_0 \left( \frac{W}{B} - 0,5 \right)$ , а поскольку помимо величины В/Ц, пористость бетона может зависеть от технологических факторов, а прочность, помимо пористости, определяется прочностью «скелета», предел прочности бетонов как правило неоднозначно зависит от величины В/Ц, что хорошо известно. Согласно [64], в общем случае предел прочности бетона может быть определен с учетом рецептурных и

технологических факторов как  $R = k_1 k_2 k_3 k_{SP} k_4 k_D k_C k_R (1 - BB)^{3,3} \frac{aR_C}{\left(\frac{B}{C}\right)^{1,39}}$ , где  $k_1$  –

коэффициент, учитывающий влияние различий условий уплотнения в лаборатории и при производстве (0,85 – 1,1);  $k_2$  – коэффициент, учитывающий влияние геометрии конструкции (0,85 – 1,0);  $k_3$  – коэффициент, учитывающий влияние различий условий твердения бетона в лаборатории (НУ) и при производстве (0,85 – 1,05);  $k_4$  – коэффициент, учитывающий влияние способа укладки бетонной смеси (кран-бадья, ленточный конвейер, бетононасос) на предел прочности бетона (0,9 – 1,05);  $k_{SP}$  – коэффициент, учитывающий влияние СП на предел прочности бетона (0,5 – 1,2);  $k_D$  – коэффициент, учитывающий влияние добавок (кроме СП) на предел прочности бетона (0,85 – 1,15);  $k_C$  – коэффициент, используемый при определении активности цемента по ГОСТ 30744 ( $\approx 1,15$ );  $k_R$  – коэффициент, учитывающий влияние прочности заполнителей (1 - гранит, 1,05 – 1,3 – базальт, 1,15 – диабаз, 1,2 – габбро), значительно проявляется при значениях  $B/C < 0,3$ ;  $a$  – коэффициент, учитывающий содержание пылевидных и глинистых частиц в составе заполнителей и вид заполнителей (0,23 – 0,3), из чего следует, что предел прочности бетона при равных значениях  $B/C$  может изменяться в широком диапазоне и, следовательно, показатель удельного расхода цемента  $C/R$  также может изменяться в широком диапазоне значений;

- начальный модуль упругости бетона  $E_0$ , значения которого в СП 63.13330 нормируются для тяжелого бетона однозначно в зависимости класса бетона, на самом деле зависит, помимо прочности бетона, от упругих свойств крупного заполнителя и его концентрации в составе бетонной смеси (фактически – от подвижности бетонной смеси), свойств цемента, влияния СП на модуль упругости цементного камня и других факторов и, при одном и том же значении прочности бетона величина модуля упругости бетона может существенно различаться [11–13,20,46,63,64,67,72,77,92]. Согласно [64,126],

модуль упругости бетона определяется по зависимости

$$E_0 = k_A k_V k_{Ц} k_{SP} k_N \frac{0,05R_{pr}^2 + 57,2R_{pr} + 217}{32,8 + R_{pr}},$$

где коэффициенты учитывают влияние

упругих свойств заполнителя ( $k_A$ ), концентрации крупного заполнителя ( $k_V$ ), свойств цемента ( $k_{Ц}$ ), влияния добавок ( $k_{SP}$ ), уровня напряжений, при котором определяется значение начального модуля упругости ( $k_N$ ). Согласно [113], модуль упругости горных пород может изменяться в широком диапазоне, до трех раз. В бетонах с различной макроструктурой относительная объемная концентрация крупного заполнителя может изменяться от примерно 0,34 (бетоны, полученные из самоуплотняющихся бетонных смесей) до примерно 0,51 (в бетонах, полученных из жестких бетонных смесей), а в особых случаях, в частности, при реализации технологии раздельного бетонирования, до значений, превышающих 0,6 [88]. Теоретически пустотность крупного заполнителя может составлять около 0,28, т.е. при этом относительная объемная концентрация крупного заполнителя может достигать до 0,72 [3]. Такое изменение концентрации крупного заполнителя приведет к изменению его роли в формировании модуля упругости бетона. В связи с тем, что изменение модуля упругости бетона вызывает изменение всех параметров диаграммы «напряжения – деформации» [64,126] как при кратковременном центральном осевом сжатии (коэффициент упругости, «предельная» деформация), так и при длительном действии нагрузки (коэффициент ползучести) [64,126], а также при развитии деформаций усадки [64,126], представляется актуальным исследование влияния свойств крупного заполнителя на указанные деформационные свойства бетона;

- предел прочности бетона на осевое растяжение, предопределяющий усадочную трещиностойкость железобетонных конструкций, а также момент образования трещин в конструкциях без предварительного напряжения арматуры, согласно СП 63.13330 однозначно нормируется в соответствии с классом бетона по прочности на сжатие. Но, поскольку сцепление цементного камня с крупным заполнителем может оказывать существенное

влияние на предел прочности бетона на осевое растяжение, а величина этого сцепления определяется не только свойствами крупного заполнителя, но и его относительной объемной концентрацией (т.е. площадью контактной зоны) [3,28,64], представляется актуальным исследовать соотношение «предел прочности на осевое растяжение – предел прочности на сжатие» для бетонов, у которых величина относительной объемной концентрации крупного заполнителя существенно отличается от бетонов традиционной структуры. Согласно [64], пределы прочности бетона на осевое растяжение  $R_t$  и сжатие  $R$  связаны зависимостью  $R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}$ , поэтому одной из задач исследования можно рассматривать уточнение указанной зависимости применительно к бетонам, полученным по технологии раздельного бетонирования.

## **1.5 Влияние усадки на свойства железобетонных конструкций.**

### **Основные факторы, определяющие усадку**

Уменьшение объема твердеющего портландцементного бетона вследствие химических, физико-химических и химических процессов, или усадка, является одним из основных его недостатков [12,13,23,37,41,52,56,64,74-76, 80,85,99,102,122,123,126-128 и др.]. Как известно, усадка может вызывать образование трещин на разных этапах жизненного цикла конструкции, от изготовления до эксплуатации, а трещины оказывают негативное влияние на все свойства железобетонной конструкции, в первую очередь на жесткость и долговечность. Согласно [64,74-76,125], контракционная усадка бетона, развивающаяся интенсивно в ранний период твердения вследствие процессов взаимодействия минералов ПЦ с водой, т.е. вследствие процессов гидратации цемента, может быть весьма значительной по величине, в связи, с чем контракционная усадка рассматривается как причина возможного раннего трещинообразования бетона [74-76]. Нормы EN 1991-1-1 величину контракционной усадки  $\varepsilon_{CA,(æ)}$  нормируют в зависимости

от класса бетона по прочности  $f_{ck}$  на сжатие  $\varepsilon_{CA,(æ)} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ . Усадка при высыхании включает влажностную усадку, которая развивается при удалении воды из поровой структуры цементного камня, и карбонизационную усадку вследствие взаимодействия углекислого газа с продуктами гидратации портландцемента (новообразованиями) [64]. Поскольку в условиях атмосферы Земли разделить эти два вида усадки не представляется возможным, эти два вида усадки при ее определении фиксируются как одно целое, при этом карбонизационная усадка составляет порядка 10 – 20 % от величины общей усадки при высыхании [64]. Усадка влажностная (и при высыхании) зависит в основном от величины В/Ц бетона и свойств цемента [15,33,37,41,64,75,121-123,125-128 и др.] и во времени развивается длительно, несколько месяцев, что зависит от интенсивности высыхания, т.е. от влажности окружающей среды и геометрии конструкции [121-123,125-128]. При этом в усадке, вызванной обезвоживанием бетона, особо выделяют пластическую усадку, которая развивается в свежееуложенном бетоне в течение нескольких часов. Усадка бетона вызывает появление собственных напряжений в структуре бетона, которые приводят к образованию и развитию усадочных трещин, что интенсифицирует ползучесть бетона, снижает жесткость сечений вследствие снижения модуля упругости, снижает долговечность конструкции [127,128].

Согласно [64], усадка бетона  $\varepsilon_{SH,B}$  зависит от величины усадки цемента, объемной концентрации заполнителей, наличия СП  $\varepsilon_{SH,B} = k_{SH,ЦК} \cdot k \cdot \varepsilon_{SH,ЦК}$  и составляет от 0,15 до 0,33 величины базовой усадки цементного камня  $\varepsilon_{SH,ЦК}$ . Согласно [64,126], усадка бетона может протекать вследствие процессов взаимодействия минералов ПЦ с водой, т.е. вследствие процессов гидратации. Такую усадку называют контракционной, она наиболее интенсивно протекает в ранний период формирования структуры бетона, обычно в первые 4 – 5 сут твердения. Величина контракционной усадки может быть весьма значительна, в связи, с чем



контракционная усадка является причиной возможного раннего трещинообразования бетона [74,76]. В нормах EN величина контракционной усадки устанавливается в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие, причем с увеличением класса значение усадки возрастает. Другая разновидность усадки – усадка при высыхании, развивается вследствие процессов, связанных с удалением воды из поровой структуры цементного камня (так называемая влажностная усадка), а также вследствие явления карбонизации (карбонизационная усадка). В атмосфере разделить эти два вида усадки не представляется возможным. Специальные исследования показали, что карбонизационная усадка составляет порядка 10 – 20 % усадки при высыхании [64,126]. Усадка при высыхании зависит в основном от величины В/Ц бетона и свойств цемента [64,75,121-123,125-128]. Во времени развитие усадки довольно продолжительно, несколько месяцев, и зависит, в т.ч., от влажностных условий окружающей среды и геометрии конструкции [64,126], т.е. от интенсивности испарения воды из поровой структуры бетона. Усадка бетона приводит к появлению собственных структурных напряжений и, в результате, к образованию усадочных микротрещин, развитие которых вызывает рост ползучести бетона, снижает модуль деформаций, т.е. уменьшает жесткость сечений, способствует снижению стойкости бетона при воздействии агрессивных сред, в т.ч. к снижению стойкости бетона при воздействии циклического замораживания-оттаивания [64,126]. Поскольку в бетонах, полученных по раздельной технологии, в т.ч. в бетонах каркасной структуры, концентрация заполнителей, или концентрация цементного камня, существенно отличаются от значений, характерных для бетонов, полученных по традиционной технологии, исследование особенностей протекания усадочных деформаций в бетонах каркасной структуры представляет актуальную задачу.

## 1.6 Ползучесть бетона

Развитие деформаций бетона в конструкциях при действии нагрузки в течение длительного времени, или ползучесть бетона, вызывает перераспределение напряжений в железобетонных конструкциях, особенно статически неопределимых, и рост деформаций, в частности, прогибов, во времени. Исследованию ползучести бетона, после ее открытия в 80-х годах 19 века, посвящено огромное количество работ [2-4,11-13,15-18,24-26,29,44,52,67,71,89,92,94,95,99-103,108,120-122,127,128 и др.]. На сегодняшний день можно считать достоверными следующие факты:

- ползучесть бетона зависит от продолжительности действия и вида нагрузки, возраста бетона (предела прочности) к моменту загрузки, состава бетона и свойств материалов для его приготовления, условий твердения бетона, условий эксплуатации [64,126-128 и др.];

- ползучесть бетона развивается в течение длительного времени, десятилетия, причем за первые полгода величина деформаций ползучести достигает примерно 60 – 70% ее конечного значения, определенного примерно через 35 лет [64,126], вероятно, в связи с этим обстоятельством измерение ползучести согласно ГОСТ 24544 продолжается 180 сут;

- общепризнанной гипотезы ползучести нет, наиболее достоверной представляется объяснение ползучести как результата капиллярных явлений, вязкости гелевой составляющей цементного камня, деформаций кристаллического скелета и процесса микротрещинообразования [64,126];

- количественно ползучесть бетона характеризуется величиной, называемой мерой ползучести бетона, которая зависит в основном от свойств цемента  $k_{Co,C}$ , заполнителей  $k_{Co,V}$ , добавок  $k_{Co,B}$  и предела прочности бетона

на сжатие  $R$ :  $C_0 = k_{Co,C} k_{Co,V} k_{Co,B} \frac{322}{R^{1,04}} \cdot 10^{-5}$  [64,126]. Другой часто

употребляемой величиной, характеризующей ползучесть бетона, является характеристика ползучести  $\phi$ , численно равная отношению деформации ползучести к величине упругой деформации при одном и том же уровне

действующего напряжения. Количественные характеристики ползучести связаны соотношением  $\varphi = C_0 \cdot E_0$ . Поскольку согласно [71,72] характеристика ползучести бетона снижается при повышении модуля упругости, то в бетонах с повышенной концентрацией крупного заполнителя, в т.ч. в бетонах каркасной структуры, можно ожидать снижение ползучести. Это вопрос требует исследования.

### **1.7 Технология раздельного бетонирования**

Поскольку возможности получения бетонов с повышенной концентрацией крупного заполнителя по традиционной технологии с использованием вибрационного уплотнения ограничено необходимостью соблюдения определенных значений так называемого коэффициента раздвижки зерен крупного заполнителя, численно равного соотношению объема растворной составляющей и объема пустот в крупном заполнителе (коэффициент раздвижки в традиционных бетонных смесях составляет примерно от 1,1 до 1,6 и с ростом подвижности бетонной смеси возрастает), то для получения макро структуры бетона с высокой концентрацией крупного заполнителя применяют технологии раздельного бетонирования [111,112].

Согласно [111], при раздельном бетонировании происходит заполнение пустот в крупном заполнителе, который имеет плотную упаковку и даже возможное предварительное «склеивание» зерен крупного заполнителя в каркас (крупнопористый бетон) высокоподвижной растворной составляющей на основе портландцемента либо полимерных (полимерцементных) связующих. Ключевым моментом является соотношение размера пустот – каналов в каркасе (крупнопористом бетоне) с параметрами растворной составляющей (вязкость, наибольшая крупность частиц), при котором будет обеспечено надежное заполнение пустот в каркасе. Анализ представленной в [111] зависимости между размерами частиц матрицы и каркаса показал, что при крупности заполнителя до 20 мм возможно наличие частиц в матрице до

2,8 мм, что вполне соответствует параметрам заполнителей, используемых при производстве традиционных бетонов. Однако авторы [111] отмечают, что более предпочтительно получение изделий методом погружения каркаса в матрицу, при этом сокращается время вибрирования и возможно использовать менее подвижные смеси с О.К. не менее 7 см против не менее 9 см в первом случае. Рассматривая подробно технологии получения бетонов каркасной структуры, приходим к выводу о целесообразности исключения из нее процесса склеивания каркаса из крупного заполнителя, формируя гипотезу о том, что погружение (засыпка) крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую в сочетании с периодической кратковременной вибрацией обеспечит плотную упаковку крупного заполнителя с минимальной, характерной для его гранулометрического состава пустотностью, заполненной растворной составляющей, при этом макро структура будет характеризоваться контактным расположением зерен крупного заполнителя.

### **Выводы**

1. Одной из ведущих тенденций технологии бетонов является получение высокопрочных бетонов посредством совершенствования структуры цементного камня и контактной зоны органоминеральными модификаторами, обеспечивающими в т.ч. высокую подвижность бетонных смесей;

2. Улучшение деформационных свойств бетонов в сочетании со снижением расхода цемента предопределяет, в т.ч., повышение концентрации крупного заполнителя в структуре бетона, что противоречит принципам получения высокоподвижных смесей и бетонов на их основе, но может быть реализовано при технологии отдельного бетонирования, в частности, при получении бетонов каркасной структуры;

3. На основании вышеизложенного в работе формулируется *рабочая гипотеза* о том, что минимизация объема растворной составляющей

посредством получения бетонов каркасной структуры погружением крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую, полученную на основе высокоэффективных СП, обеспечит улучшение деформационных свойств бетонов в сочетании со снижением удельного расхода цемента, а выявление основных закономерностей формирования структуры и свойств таких бетонов позволит выявить рациональные области их практического применения.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Материалы

В экспериментальных исследованиях использовались портландцемент, суперпластифицирующая добавка (СП), крупный и мелкий заполнители.

#### 2.1.1 Портландцемент

В экспериментальных исследованиях использован портландцемент без минеральных добавок ПЦ 500 Д0 по ГОСТ 10178 производства ОАО «Новоросцемент», завод «Пролетарий» активностью 51,2 МПа.

Информация о свойствах ПЦ 500 Д0 представлены в таблицах 2.1 – 2.3.

Таблица 2.1- Минералогический состав клинкера

Завод изготовитель	Марка цемента	Минералогический состав клинкера, % по массе			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1	2	3	4	5	6
«Пролетарий» ОАО «Новоросцемент»	ПЦ М500 Д0	60,4	19,4	5,8	13,9

Таблица 2.2 - Химический состав портландцемента

ПЦ	Химический состав, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	R <sub>2</sub> O
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПЦ М500 Д0	20,98	4,34	4,15	64,82	0,82	3,03	0,28	0,02	0,84

Таблица 2.3 - Показатели качества цемента

№	Показатель	Значение показателя
1	2	3
1	ТП - остаток на сите № 008, по массе, % - удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	4,7 3380
2	НГ цементного теста, %	24,50
3	Сроки схватывания, мин:	

	- НС	165
	- КС	220
4	Истинная плотность цемента, г/см <sup>3</sup>	3,12
5	Нормальная густота, %	25,5

2.1.3 Мелкий заполнитель – песок для строительных работ по ГОСТ 8736 – 93\* карьеров: «Малкинский», далее по тексту – песок К (характеристики представлены в таблице 2.4) с модулем крупности 2,72, песок для строительных работ из р. Дон, далее по тексту – песок М (характеристики представлены в таблице 2.5) с модулем крупности 1,56, и смесь песков К и М в соотношении 50/50, далее по тексту – песок С.

Таблица 2.4 - Показатели качества песка К

№	Наименование показателя	Показатели
1	1	2
1.	Модуль крупности песка	2,72
2.	Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1473
3.	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	1,25
4.	Содержание органических примесей	Нет
5.	Гранулометрический состав (остатки на ситах частные, полные, %): сито: 2,5 1,25 0,63 0,315 0,16 дно	17,4/17,4 14,8/32,2 14,9/47,1 32,4/79,5 17,2/96,7 3,3/100

Таблица 2.5 - Показатели качества песка М

№	Наименование показателя	Показатели
1	1	2
1.	Модуль крупности песка	1,56
2.	Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1378
3.	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	2,75

4.	Содержание органических примесей	Нет
5.	Гранулометрический состав (остатки на ситах частные, полные, %): сито: 2,5 1,25 0,63 0,315 0,16 дно	0 0 3,2/3,2 12,1/15,3 30,5/45,8 45,5/91,2 8,9/100,1

#### 2.1.4 Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя использован щебень из песчаника кварцевого с модулем упругости 36,8 – 48 ГПа производства «Донской камень» фракции 20 – 40 мм для технологии 1 (далее – К) и фракции 5 – 20 мм для технологии 2 (далее – М), 50%К+50%М – для технологии 2 (далее С). Марка по прочности М1000.

Щебень гранитный по ГОСТ 8267 с модулем упругости 65 – 70 ГПа Павловского карьера фракции 5-20 мм (далее – Гр). Насыпная плотность – 1432 кг/м<sup>3</sup>, плотность в куске 2,72, пустотность 0,47. Марка по прочности 1200.

#### 2.1.5 Суперпластифицирующая добавка

По результатам предварительных опытов с имеющимся цементом был принят СП GLENIUM®115 (далее Glenium 115 или G115). По данным производителя (BASF) G115–СП третьего поколения на основе поликарбоксилатного эфира. Предназначен для:

- получения высокопрочных бетонов;
- бетонных смесей для изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций;
- СУБ.

Основные достоинства:



- повышение конечной прочности бетона при сжатии, изгибе и растяжении;
- повышение подвижности смесей с низким В/Ц без расслоения или водоотделения (высокий водоредуцирующий эффект);
- малая чувствительность к особенностям химико-минералогического состава цементов;
- повышение плотности и снижение проницаемости.

Жидкость, вводимая в бетонную смесь с водой затворения. Рекомендуемая дозировка 0,1 - 1,1 % от массы цемента по товарному продукту.

#### 2.1.6 Вода затворения

Вода затворения– водопроводная, отвечающая требованиям ГОСТ 23732 – 2011 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

#### 2.1.7. Растворная составляющая

В качестве растворной составляющей использованы составы Ц:П = 1:1,3 на крупном (модуль крупности 2,87, далее К), среднем (С = 50% К + 50% М, далее - С) и мелком песке (модуль крупности 1,56, далее – М) при В/Ц 0,35; 0,4 и 0,45 соответственно с 1% суперпластификатора Glenium 115 [96].

#### 2.1.8 Обозначения составов бетона:

- на первом месте буква, указывающая вид песка, соответственно К,С, М;
- на втором месте цифра, указывающая способ получения бетона:
  - 1 – посредством нагнетания маловязкой растворной составляющей в пустоты уложенной упаковки крупного заполнителя (далее – технология 1);
  - 2 – посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую (далее – технология 2).

## 2.2 Методика экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях использованы методики действующих стандартов, нормативных и рекомендательных документов.

2.2.1 Определение текучести минеральных суспензий при подборе дозировке СП производилось в соответствии с инструкцией по проектированию состава и определению свойств высокопрочных бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей[39], Приложение 1,2.

2.2.2 Определение пористости растворной составляющей бетона (мелкозернистый бетон) производилось на образцах, полученных из мелкозернистой бетонной смеси по п. 2.1.7. Твердение образцов – первые сутки – в формах под пленкой, далее – в воде. Высушивание осуществлялось при температуре 105°С. Определение средней плотности, водопоглощения, истинной плотности, водопоглощения при кипячении – по ГОСТ 12730.

2.2.3 Определение предела прочности растворной составляющей бетона (мелкозернистый бетон) выполнялось на образцах 40x40x160 мм, изготовленных из мелкозернистой бетонной смеси по п. 2.1.7. Твердение образцов – первые сутки – под пленкой в форме, далее – в воде. Испытания образцов – по ГОСТ 310.4 (рисунки 2.1, 2.2).

2.2.4 Определение модуля упругости и меры ползучести растворной составляющей (мелкозернистый бетон) выполнялось по Приложениям 5,6 [39].



Рисунок 2.1 – Испытание балочки 40x40x160 мм на изгиб



Рисунок 2.2 – Испытание половинки балочки 40x40x160 мм на сжатие

2.2.5 Формование бетонных образцов выполнялось в цилиндрических пластиковых формах диаметром (внутренним) 100 мм и высотой 550 мм.

При реализации технологии 1 в форму укладывался плотный заполнитель на высоту 470 – 490 мм, производилось уплотнение укладки вибрацией, фиксация объема укладки для ограничения возможности раздвижки зерен заполнителя. Далее в форму заливалась маловязкая мелкозернистая бетонная смесь по п. 2.1.7. Периодически для понижения вязкости мелкозернистой бетонной смеси форма подвергалась вибрированию на лабораторной виброплощадке.

При реализации технологии 2 в форму заливалась высотой слоя 180 мм маловязкая мелкозернистая бетонная смесь по п. 2.1.7, далее в форму подавался крупный заполнитель. Периодически для понижения вязкости мелкозернистой бетонной смеси форма подвергалась вибрированию на лабораторной виброплощадке. Заполнение формы осуществлялось на высоту 490 – 520 мм.

При реализации технологии 1 в предварительных опытах было установлено, что заполнение укладки крупного заполнителя маловязкой мелкозернистой бетонной смесью возможно только при фракции крупного заполнителя 20 – 40 мм, при использовании фракций 5 – 10 + 10 – 20 и 10 – 20 + 20 – 40 обеспечить качественное заполнение укладки крупного заполнителя не удалось.

При реализации технологии 2 заполнение формы любой фракцией крупного заполнителя происходило без проблем.

2.2.5.1 Свойства бетонов определяли на образцах – цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 400 мм, и цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 150 или 200 мм, которые получали из образцов по п. 2.2.5 посредством резки алмазным диском. Перед испытаниями торцы цилиндров шлифовали (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3—Образец – цилиндр для определения предела прочности на сжатие и параметров диаграммы «напряжения – деформации» при кратковременном нагружении

2.2.5.2 Предел прочности на сжатие бетона – по ГОСТ 10180, ГОСТ 24452 на образцах – цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 400 мм или 150 мм(рисунок 2.4). Предел прочности на растяжение при раскалывании бетона – по ГОСТ 10180, ГОСТ 24452 на образцах – цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 250 мм (рисунок 2.5).



Рисунок 2.4 –Образец – цилиндр 400x100 (d) после испытаний на центральное осевое сжатие при кратковременном нагружении



Рисунок 2.5 –Образец – цилиндр 200x100 (d) после испытаний на растяжение при раскалывании при кратковременном нагружении

2.2.5.3 Начальный модуль упругости бетона – по ГОСТ 24452 на образцах – цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 400 мм по п.2.6 (рисунок 2.6). При этом определяли параметры диаграммы «напряжения – деформации» при центральном осевом сжатии кратковременной нагрузкой.



Рисунок 2.6 – Измерение деформаций при испытаниях образцов-цилиндров для определения параметров диаграммы «напряжения – деформации»

2.2.5.4 Мера ползучести бетона – по [95]. Сущность методики состоит в определении деформаций ползучести в изолированном состоянии образцов-балок при изгибе. Используются образцы – балки 60х60х600 мм, изготовленные в пластиковых формах с использованием крупного заполнителя фракции 5-10 мм (рисунок 2.7). Такой способ изучения ползучести исключает влияние усадки на результаты измерений.



Рисунок 2.7 – Общий вид и детали испытаний балок 60x60x600 мм на изгиб при длительном нагружении



2.2.5.5 Средняя плотность бетона определялась на образцах по ГОСТ 12730.

Объемную концентрацию крупного заполнителя определяли из формулы

$$\varphi_{\text{кз}} \cdot \rho_{\text{кз}} + (1 - \varphi_{\text{кз}}) \cdot \rho_{\text{р}} = \rho_{\text{б}} \quad (2.1)$$

$$\varphi_{\text{кз}} = \frac{\rho_{\text{б}} - \rho_{\text{р}}}{\rho_{\text{кз}} - \rho_{\text{р}}}, \quad (2.2)$$

где  $\varphi_{\text{кз}}$  – объемная концентрация крупного заполнителя;

$\rho_{\text{кз}}$ ,  $\rho_{\text{р}}$ ,  $\rho_{\text{б}}$  – соответственно плотность крупного заполнителя в куске, средняя плотность растворной составляющей, средняя плотность бетона каркасной структуры.

2.2.5.6 Морозостойкость бетона определялась по 2 методу ГОСТ 10060 на образцах-цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 150 мм и образцах 40x40x160 мм (морозостойкость растворной составляющей). При циклическом замораживании-оттаивании осуществляли измерение скорости прохождения ультразвука через бетон в оттаянном состоянии, изменение объема бетона посредством измерения изменения линейных размеров по ГОСТ 24544, и изменение массы образцов.

2.2.5.7 Усадку бетона определяли по ГОСТ 24544 на образцах-цилиндрах 100x200 (h) мм и образцах 40x40x160 мм (растворная составляющая).

## **ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНОВ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ**

Как известно, предел прочности бетона определяется прочностью растворной составляющей (цементного камня), прочностью крупного заполнителя и надежным сцеплением заполнителя с цементным камнем. В случае бетонов с каркасной структурой в связи с особенностью их изготовления к растворной составляющей предъявляются особые требования, а именно высокая подвижность (текучесть) и нерасслаиваемость для надежного заполнения пустот в крупном заполнителе при изготовлении бетонов с каркасной структурой по первому способу (нагнетание в пустоты крупного заполнителя) либо по второму способу (погружение крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую).

### **3.1 Свойства растворной составляющей**

Определяли значения следующих показателей растворной составляющей (мелкозернистого бетона): средняя плотность бетона, предел прочности на сжатие и изгиб на образцах 40x40x160 мм в возрасте 28 сут. при нормальных условиях твердения, скорость прохождения ультразвукового импульса при сквозном прозвучивании (УЗИ).

#### **3.1.1 Проектирование состава растворной составляющей бетона**

Согласно [5], расчет состава мелкозернистого бетона на требуемую прочность может производиться на основе зависимости:

$$R_b = k \cdot R_c \cdot \left( \frac{Ц}{В+ЗВ} - 0,8 \right), \quad (3.1)$$

где  $k = 0,8; 0,7; 0,65$  соответственно для крупного, среднего и мелкого песка,  $ЗВ$  (защемленный воздух) =  $20 - 70 \text{ л/м}^3$  в зависимости от крупности песка и, в основном, от подвижности смеси. В настоящей работе предполагается, что влияние крупности песка на прочность мелкозернистого бетона обусловлена в основном зависимостью водопотребности бетонной смеси в зависимости от

удельной поверхности (крупности) песка и величины ЗВ от крупности песка, в связи с чем при применении высокоэффективных СП, вследствие снижения количества ЗВ (при использовании СП с эффектом «воздухоподавления») зависимость предела прочности бетона будет однозначно определяться величиной В/Ц и активностью цемента.

Соотношение Ц:П принималось из условия достаточного количества цементного теста для обеспечения текучести [69]:

$$V_{\text{ЦТ}} > 0,57 \cdot V_p, \quad (3.2)$$

$$V_{\text{ЦТ}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}} + \text{В} = \text{Ц} \left( \frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right), \quad (3.3)$$

$$V_p = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}} + \text{В} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}} = \text{Ц} \left( \frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{\text{В}}{\text{Ц}} + \frac{n}{\rho_{\text{П}}} \right), \quad (3.4)$$

откуда

$$n < 0,75 \cdot \rho_{\text{П}} \cdot \left( \frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right), \quad (3.5)$$

где  $n = \text{П}/\text{Ц}$ ; В, Ц – соответственно расход воды и цемента;  $\rho_{\text{Ц}}$ ,  $\rho_{\text{П}}$  – соответственно истинная плотность цемента и песка.

В соответствии с ф. (3.2 – 3.5) исследования выполняли на составах мелкозернистого бетона с соотношением Ц:П = 1:1,3 на:

- крупном (К, модуль крупности 2,82);
- среднем (С = 50% К + 50% М);
- мелком (М, модуль крупности 1,18) песке.

Составы подбирались в соответствии с [68] и имели одинаковую текучесть растворов смесей 150 мм по минивискозиметру Суттарда, характерную для самоуплотняющихся бетонных смесей. Активность портландцемента по ГОСТ 310.4 составляла 45,5 МПа. С учетом водопотребности песков значения величины В/Ц составили соответственно 0,35; 0,4 и 0,45. На основании предварительных опытов применяли СП Glenium 115 производства BASF в дозировке 1% от массы цемента по товарному продукту.

Данные о свойствах растворной составляющей (мелкозернистого бетона) представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты испытаний самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов

Серия	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость УЗИ, км/с	Предел прочности, МПа		R, МПа
			сжатие	изгиб	
КМ1	2098	3920	50,9	4,9	38,7
КК1	2230	4380	74,8	7,32	56,8
КС1	2108	4071	61,9	5,79	47,1
МК2	2250	4680	76,7	7,35	57,9
ММ2	2115	3964	58,3	5,93	44,3
МС2	2190	4083	68,85	6,60	52,4
СС2	2194	4199	67,5	6,45	51,3

Примечание: \*\* - приведенная к базовому образцу прочность на сжатие 1 – для технологии 1 (нагнетание); 2 – для технологии 2 (погружение)

Теоретическое значение средней плотности бетона рассчитывали по формуле:

$$\rho_{Б,т} = \frac{1 + \frac{B}{\Pi} + n}{\frac{1}{\rho_{Ц}} + \frac{B}{\Pi} + \frac{n}{\rho_{П}}} \quad (3.6)$$

Расчетное значение полной пористости бетона в состоянии естественной влажности в момент испытаний рассчитывали по формуле:

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_{Б,ф}}{\rho_{Б,т}}, \quad (3.7)$$

где  $\rho_{Б,ф}$ ;  $\rho_{Б,т}$  – соответственно фактическая и расчетная средняя плотность бетона по таблице 3.2.

Поскольку средняя плотность  $\rho_{ср}$  и пористость бетона  $P$  связаны соотношением ф.(3.7), по представленным в таблице 3.1 данным можно определить расчетное значение пористости мелкозернистого бетона. Величина  $\rho_{и}$  может быть определена из следующих данных:

- состав бетона 1:1,3:0,35 (1:1,3:0,4 и 1:1,3:0,45 соответственно для песков К; С; М;

- расчетный объем для песков К; С; М составит:

$$V = \frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{1}{\rho_{п}} + 0,35 = \frac{1}{3,15} + \frac{1}{2,62} + 0,35 = 1,164;$$

$$V = \frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{1}{\rho_{п}} + 0,4 = \frac{1}{3,15} + \frac{1}{2,62} + 0,4 = 1,214;$$

$$V = \frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{1}{\rho_{п}} + 0,45 = \frac{1}{3,15} + \frac{1}{2,62} + 0,45 = 1,264; \quad (3.8)$$

- масса для песков К; С; М составит  $1+1,3+0,35 = 2,65$  (2,7; 2,75), тогда расчетная средняя плотность МЗБ для песков К; С; М составит:

$$\rho_{\text{МЗБ}} = \frac{2,7}{1,214} = 2,277;$$

$$\rho_{\text{МЗБ}} = \frac{2,75}{1,264} = 2,224;$$

$$\rho_{\text{МЗБ}} = \frac{2,65}{1,164} = 2,176. \quad (3.9)$$

Результаты расчетов значений пористости представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Показатели пористости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов

Песок	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Расчетная пористость, П, %	ΔП, % <sup>1</sup>
	расчетная	фактическая		
М	2176	2098 - 2115	3,6 – 2,8	1,5 – 1,6
С	2224	2108 - 2194	5,2 – 1,3	3,1 – 0,1
К	2277	2230 - 2250	2,1 – 1,2	0

Примечание: 1 – относительно песка «К»:  $\Delta П = П_{\text{М(С)}} - П_{\text{К}}$

Из представленных в таблице 3.2 данных следует, что при уменьшении модуля крупности песка от 2,82 (К) до 1,56 (М) не происходит значительного увеличения объема заземленного воздуха, в среднем 1,6%. В связи с этим можно сделать вывод о том, что при применении мелких песков в высокоподвижных бетонных смесях дополнительное воздухововлечение, в связи с его незначительностью, не будет оказывать существенного влияния на прочность бетона. Тогда предел прочности растворной составляющей (мелкозернистого бетона) на сжатие, в соответствии с ф.(3.1), будет определяться в основном активностью цемента и значением коэффициента  $k$ , принимаемого в зависимости от крупности песка. Действительно, при

увеличении  $3B$  в ф. (3.1) на 1,6% (16 л), например, от 30 л до 46 л выражение в скобке уменьшается менее чем на 5%.

### 3.1.2 Зависимость предела прочности растворной составляющей от величины В/Ц

На рисунке 3.1 представлена зависимость предела прочности растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) от величины В/Ц. Данные рисунка 3.1 не подтверждают зависимость величины коэффициента  $k_B$  в ф.(3.1) от крупности песка в случае получения мелкозернистых бетонов из самоуплотняющихся смесей. Из представленных данных очевидно, что в случае применения высокоподвижных мелкозернистых бетонных смесей предел прочности мелкозернистого бетона  $R_b$  практически не зависит от модуля крупности песка, а определяется величиной В/Ц, на которую крупность песка косвенно влияет через водопотребность бетонной смеси:

$$R_b = \frac{19,6}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,3}}. \quad (3.10)$$

Поскольку в экспериментах использован ПЦ с активностью 51,2 МПа, то ф.(3.1) можно представить в виде:

$$R_b = \frac{0,38 \cdot R_{ц}}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,3}}. \quad (3.11)$$

В связи с этим применение мелких песков в сочетании с эффективными СП, позволяющим максимально снизить величину В/Ц, будет влиять только на максимальное значение предела прочности бетона, которое может быть получено на данных материалах.

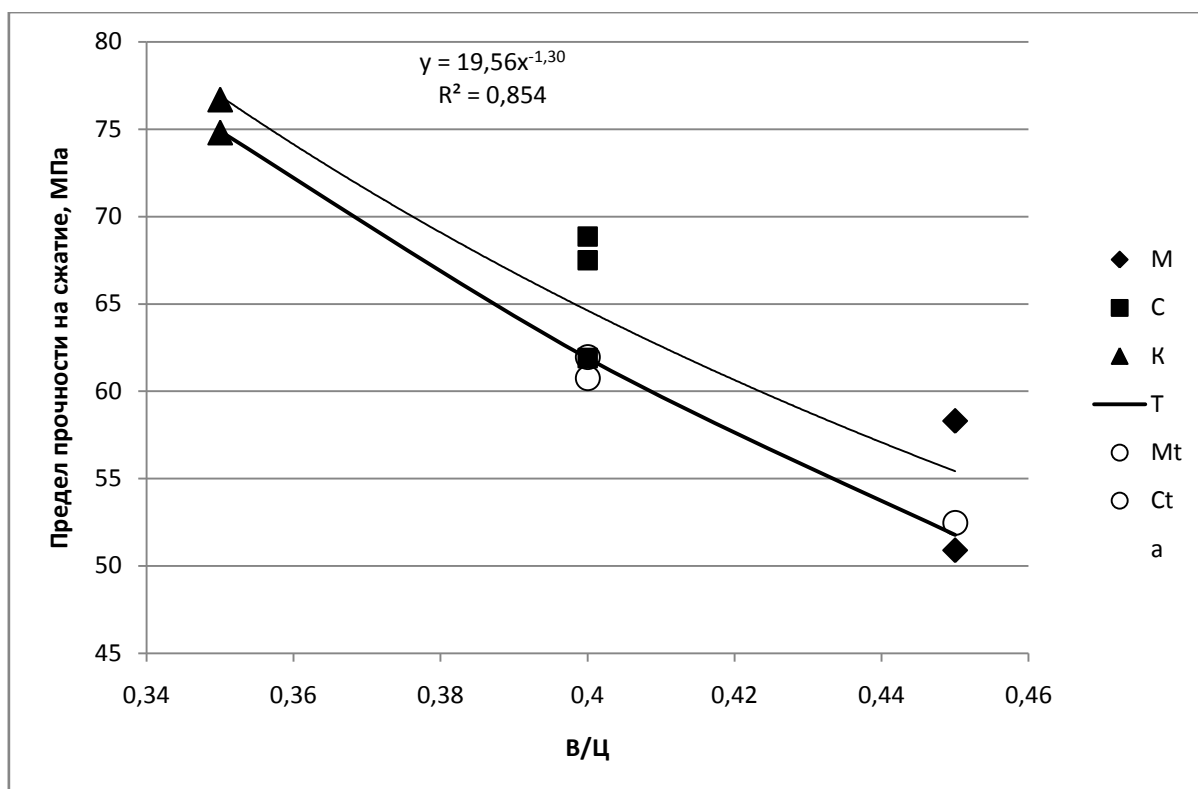


Рисунок 3.1–Зависимость предела прочности растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) от величины В/Ц и вида мелкого заполнителя:

К, С, М – соответственно песок с  $M_k = 2,82$ ; 50% К + 50% М; М – песок с модулем крупности 1,56; М<sub>t</sub>, С<sub>t</sub> – значения прочности, приведенные к 28 сут (фактический возраст – 35 сут, коэффициент приведения 0,9); Т – по формуле

$$R_p = 0,8 \cdot R_{ц} \left( \frac{Ц}{B} - 0,8 \right) [5] \text{ при } R_{ц} = 45,5 \text{ МПа; 4 – данные [44] (модуль крупности песка } M_k = 2,5)$$

Полученный вывод имеет важное практическое значение, поскольку, во-первых, расширяет сырьевую базу песков для применения в бетонах с каркасной структурой. Во-вторых, применение мелких песков для таких бетонов обеспечивает дополнительные технологические преимущества, поскольку облегчает заполнение пустот растворной смесью при ее нагнетании в крупный заполнитель, а также обеспечивает меньшую расслаиваемость смеси, что очень важно при изготовлении бетонов методом погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую.

### 3.1.3 Зависимость предела прочности растворной составляющей от ее пористости (вида песка)

На рисунке 3.2 представлена зависимость предела прочности растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) от полной расчетной пористости в состоянии фактической влажности в момент испытаний.

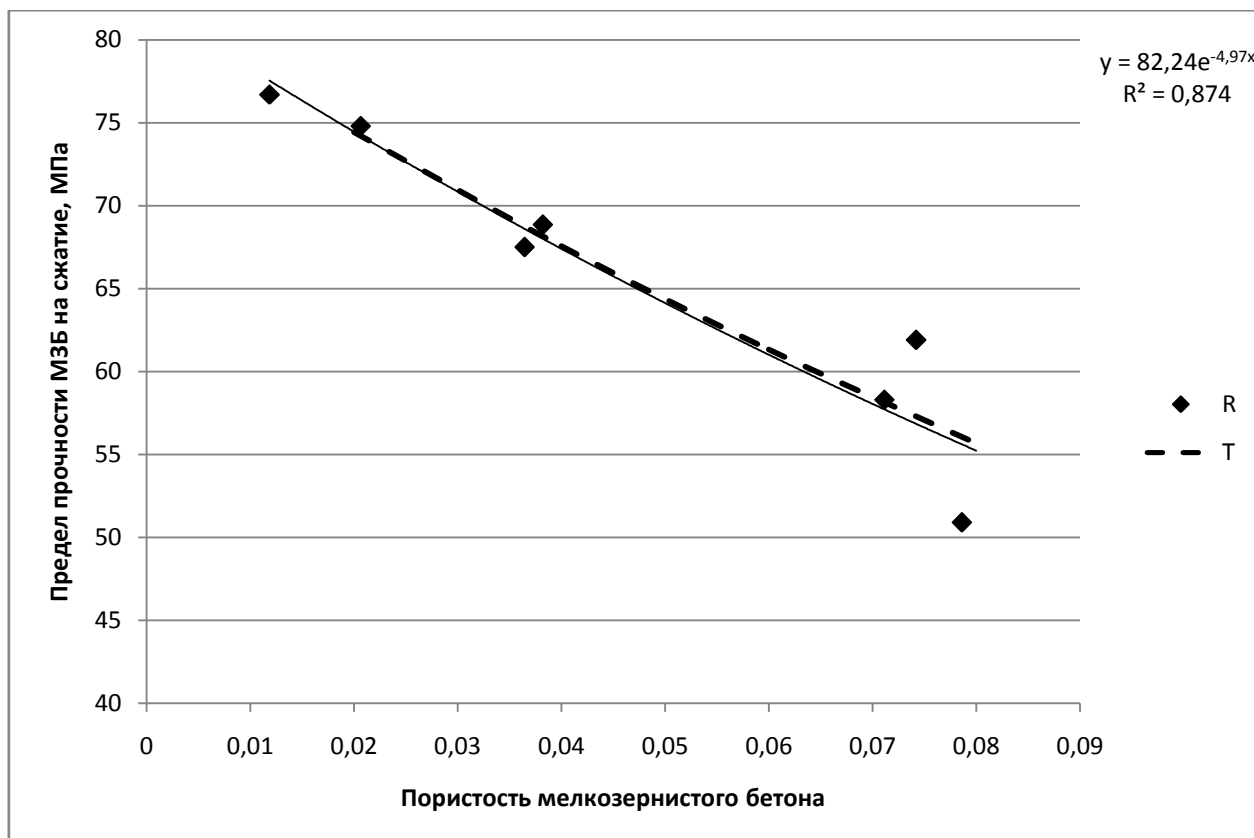


Рисунок 3.2 – Зависимость предела прочности мелкозернистого СУБ от пористости

T – по формуле  $R = R_0 \exp(-4,84 \cdot P)$  [64] при  $R_0 = 82$  МПа

Поскольку, как следует из представленных на рисунке 3.1 данных, предел прочности МЗБ определяется однозначно величиной пористости

$$R = 82 \cdot \exp(-4,98 \cdot P), \quad (3.12)$$

причем, зависимость ф.(3.10) практически совпадает с полученной в [64], можно утверждать, что влияние модуля крупности песка на предел прочности МЗБ проявляется через величину воздухововлечения при использовании конкретного песка с конкретным СП и величину В/Ц в связи с



изменением водопотребности бетонной смеси вследствие роста удельной поверхности песка при уменьшении его модуля крупности. В связи с этим использование мелких песков, обеспечивающих определенные технологические преимущества при производстве бетонов с каркасной структурой методами раздельного бетонирования целесообразно в сочетании с эффективными СП для максимального снижения величины В/Ц и добавок, подавляющих эффект воздухововлечения (СП с воздухоподавляющим эффектом, антивспениватели).

### **3.1.4 Соотношение пределов прочности на изгиб и сжатие растворной составляющей**

На рисунке 3.3 представлено соотношение пределов прочности на растяжении на изгиб и сжатие растворной составляющей (мелкозернистого СУБ).

Очевидно, что мелкозернистый СУБ характеризуется таким же соотношением пределов прочности на изгиб и сжатие, как и обычные бетоны. Это свидетельствует о том, что повышенная концентрация цементного камня в сочетании с СП в данном случае в принципе не должна оказывать негативного влияния на трещиностойкость, что предполагает обеспеченность усадочной трещиностойкости растворной составляющей и, в принципе, бетонов с каркасной структурой.

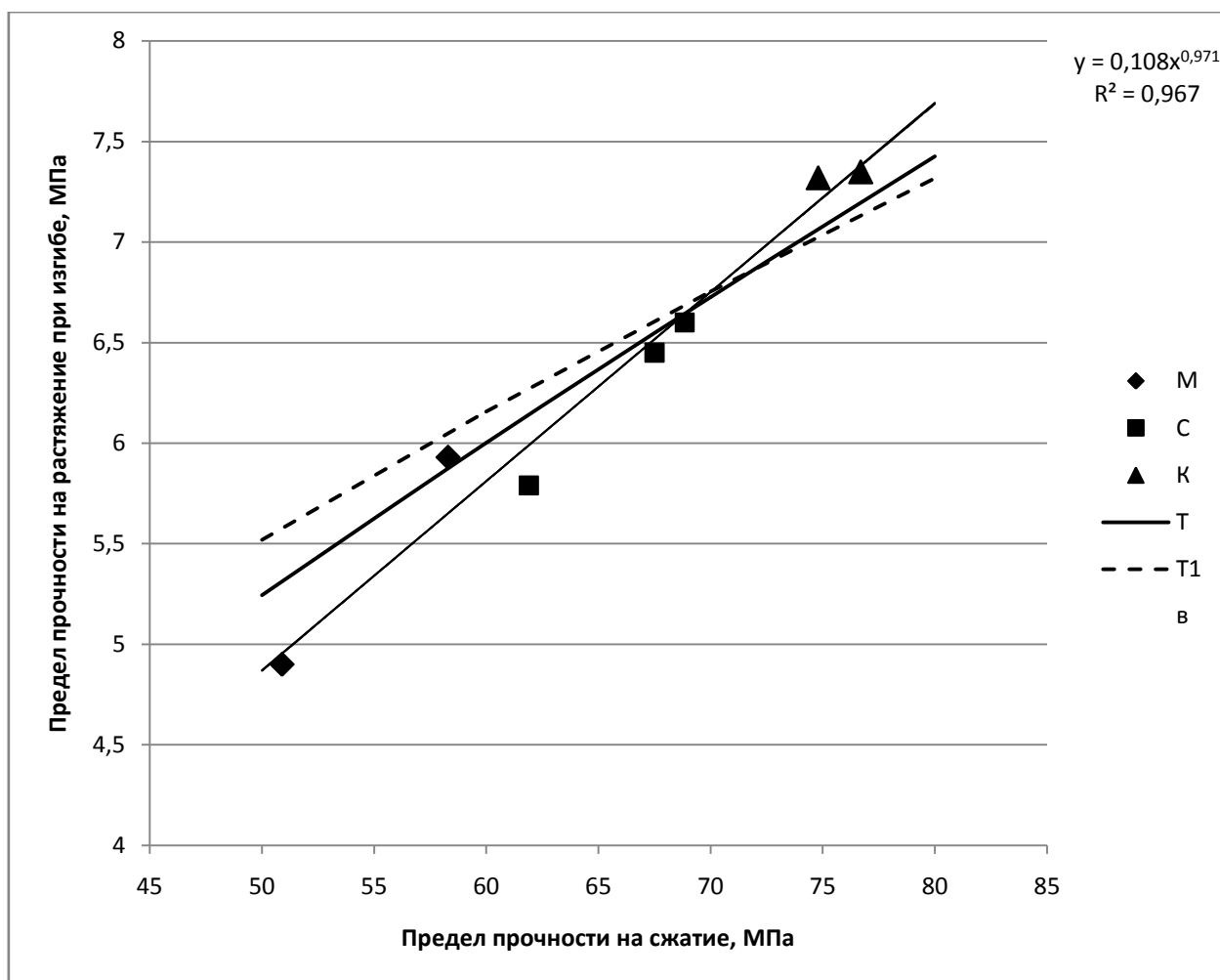


Рисунок 3.3 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе  $R_f$  от предела прочности на сжатие  $R$

M, C, K – то же, что и на рисунке 1; T – по формуле  $R_f = 0,29 \cdot R^{0,74}$  [79]; T1 – по формуле  $R_f = 1,82 \cdot R_t = 1,82 \cdot 0,29 \cdot R^{0,6}$  [64], 1,82 – по ГОСТ 10180

### 3.1.5 Связь между пределом прочности растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) на сжатие и скоростью ультразвукового импульса (УЗИ)

На рисунке 3.4 представлены данные, показывающие соотношение между пределом прочности на сжатие растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) и скоростью УЗИ.

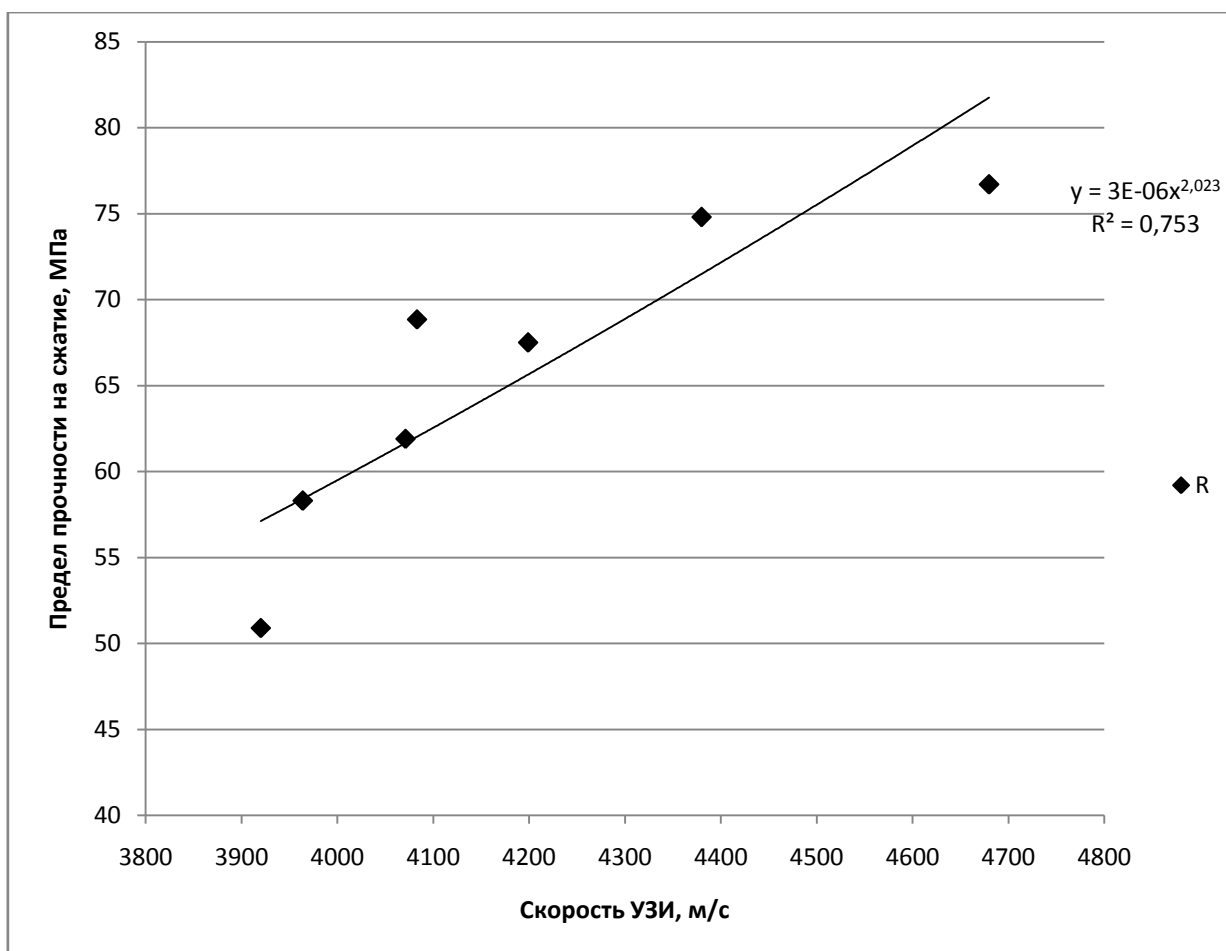


Рисунок 3.4 – Зависимость предела прочности на сжатие растворной составляющей (мелкозернистого СУБ) от скорости распространения ультразвукового импульса (УЗИ)

Предел прочности  $R$ , МПа, и скорость УЗИ,  $v$ , км/с, связаны зависимостью

$$R = 3 \cdot v^2. \quad (3.13)$$

Очевидно, что между рассматриваемыми параметрами существует некоторая корреляционная зависимость, инвариантная к модулю крупности песка. Это можно рассматривать как еще одно косвенное доказательство приведенного выше положения о том, что модуль крупности песка влияет на предел прочности мелкозернистого СУБ косвенно через водопотребность бетонной смеси и воздухововлечение, что позволяет обеспечивать требуемую прочность известными технологическими приемами.

### 3.1.6 Модуль упругости растворной составляющей

На рисунке 3.5 представлена зависимость модуля упругости самоуплотняющегося мелкозернистого бетона от предела прочности на сжатие. Значения модуля упругости получены согласно [64] по зависимости  $E_0 = 0,823 \cdot E_d$ . Значения предела прочности приведены к базовому образцу с применением коэффициента приведения 0,76.

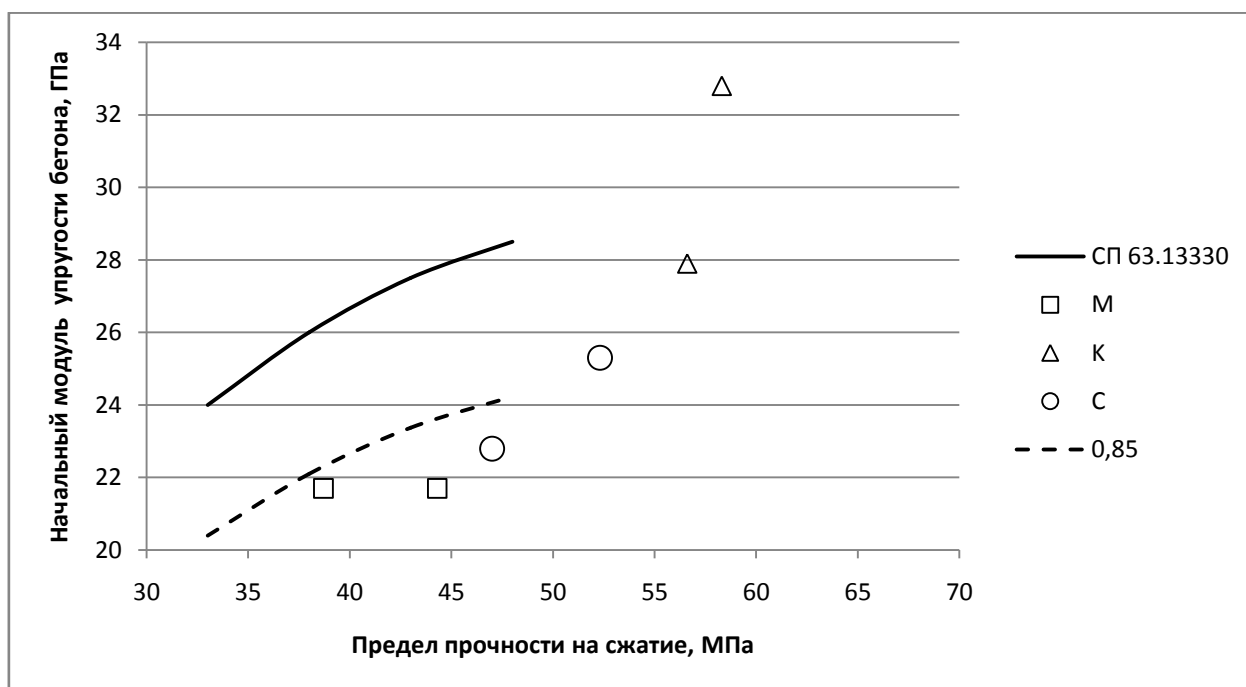


Рисунок 3.5 – Зависимость начального модуля упругости от предела прочности на сжатие СП 63.13330 – для МЗБ группы А; 0,85 – по СП 63.13330 с коэффициентом 0,85, учитывающем влияние СП на модуль упругости [67]

Из представленных на рисунке 3.5 данных следует, что модуль упругости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов несколько ниже в сравнении с нормируемыми СП 63.13330 значениями, что обусловлено, во первых, более высокой концентрацией цементного камня в таких бетонах и, во-вторых, влиянием СП на модуль упругости. Кроме того, сам характер зависимости модуля упругости мелкозернистого СУБ несколько отличается от закономерности в СП 63.13330 – просматривается тенденция к росту начального модуля упругости с повышением предела прочности бетона.

Нечто подобное отмечалось для высокопрочных мелкозернистых бетонов, например, в [44].

### **3.2 Влияние способа изготовления бетона и свойств растворной составляющей на предел прочности бетона**

В последние пятнадцать – двадцать лет одной из ведущих тенденций в технологии бетона является применение высокоподвижных, в т.ч. самоуплотняющихся бетонных смесей, преимущества которых неоднократно обосновывались [7,9, 42, 43, 45, 60,61, 67-69, 87 и др.]. Но бетонам, полученным из указанных смесей (СУБ), наряду с достоинствами, присущи недостатки, связанные с особенностью их макроструктуры, в частности, повышенной концентрацией растворной составляющей (цементного камня), т.е. пониженной концентрацией крупного заполнителя, которая в СУБ составляет обычно 0,34 – 0,36. Среди основных недостатков СУБ можно отметить пониженный начальный модуль упругости, повышенные усадку и ползучесть [67,80]. Напротив, бетоны, полученные из жестких смесей, характеризуются более высокой концентрацией крупного заполнителя, достигающей значений 0,53 и, в ряде случаев, более. Как следствие, такие бетоны обладают низкими показателями усадки и ползучести, однако жесткие бетонные смеси во многих случаях нетехнологичны, поскольку требуют интенсивного уплотнения при укладке. Одним из возможных направлений получения бетонов с высокой концентрацией крупного заполнителя является технология раздельного бетонирования, предусматривающая заполнение пустот в плотной упаковке (наброске) крупного заполнителя высокоподвижной растворной составляющей, в качестве которой может быть использованы цементные либо полимерные составы. Такие бетоны известны как «бетоны каркасной структуры» [111, 112]. Их эффективность подтверждена при применении различных вяжущих [111]. Далее представлены результаты исследования влияния свойств

крупного заполнителя и способа получения бетона каркасной структуры на предел прочности бетонов при сжатии и растяжении.

Бетоны каркасной структуры изготавливались по двум способам раздельного бетонирования:

- маловязкая растворная составляющая нагнетается в пустоты крупного заполнителя, наброска которого зафиксирована в объеме (далее – технология 1);

- погружение крупного заполнителя осуществляется в маловязкую растворную составляющую при необходимости в сочетании с вибрацией, что обеспечивает плотную упаковку крупного заполнителя (далее–технология 2).

Определяли такие свойства как предел прочности на сжатие  $R_c$  в возрасте 28 сут, средняя плотность бетонов, скорость распространения ультразвукового импульса (УЗИ), удельный расход цемента  $C/R_c$ . Результаты испытаний представлены в таблице 3.3. Для состава СС2 на щебне «Донской камень» определяли предел прочности на сжатие  $R_c$  и предел прочности на растяжение при раскалывании  $R_t$  в возрасте 2,7,15, 28 и 90 сут (таблице 3.4).

Таблица 3.3- Результаты определения прочностных свойств бетонов каркасной структуры

Серия	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Скорость УЗИ, м/с	Предел прочности на сжатие $R_c$ , МПа	Удельный расход цемента, $C/R_c$ кг/(м <sup>3</sup> ·МПа)
М1	2430	4420	30,25	8,34
К1	2480	4605	48,7	5,55
С1	2458	4620	31,9	6,61
К2	2475	4710	56,6	5,04
М2	2447	4551	38,2	5,85
С2	2465	4711	47,8	5,21
СС2	2488	4728	55,7	3,91

Примечание: М,С,К – соответственно мелкий, средний, крупный песок; 1,2 – технология 1 (нагнетание), технология 2 (погружение); СС – крупный заполнитель, содержащий фракции 5-10 и 20-40 40+60%

Таблица 3.4- Предел прочности на сжатие и растяжение в зависимости от времени твердения состава СС2 на щебне «Донской камень»

Время твердения, сут	Предел прочности на сжатие R, приведенный к базовому образцу МПа	Предел прочности на растяжение при раскалывании, R <sub>т</sub> , МПа	Расчетное значение предела прочности на осевое растяжение, R <sub>т</sub> , МПа
2	36,2	2,74	2,54
7	64,2	4	3,71
15	64,8	3,5	3,25
28	80,4	4,63	4,30
90	84,2	4,96	4,60

### 3.2.1 Влияние величины В/Ц (предела прочности растворной составляющей) на предел прочности на сжатие бетонов с каркасной структурой

Значение В/Ц исследованных бетонов принималось, как показано выше, в зависимости от модуля крупности песка и составляло 0,35; 0,4 и 0,45 соответственно на крупном, среднем и мелком песках. Представленные на рисунке 3.5 результаты показывают, что предел прочности бетона в принципе определяется величиной В/Ц, т.е. пределом прочности растворной составляющей, на которую крупность песка влияет через водопотребность смеси, а также способом приготовления бетона – технология 1 (нагнетание) или технология 2 (погружение).

Положительное влияние технологии 2 на предел прочности бетонов каркасной структуры очевидно. Предел прочности бетонов, полученных по технологии 1 (нагнетание) в зависимости от величины В/Ц описывается формулой

$$R_{Te1} = \frac{8,1}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,85}}, \quad (3.14)$$

или с учетом активности цемента R<sub>ц</sub>

$$R_{Te1} = \frac{0,16 \cdot R_{ц}}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,85}} \quad (3.15)$$

Предел прочности бетонов, полученных по технологии 2 (погружение) в зависимости от величины В/Ц описывается формулой

$$R_{Te2} = \frac{23,3}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,11}}, \quad (3.16)$$

или с учетом активности цемента  $R_{ц}$

$$R_{Te1} = \frac{0,46 \cdot R_{ц}}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,11}} \quad (3.17)$$

Соотношение пределов прочности  $R_{Te2}/R_{Te1}$ , определенных по ф.(3.14, 3.15) составляет от 1,32 при В/Ц = 0,35 до 1,59 при В/Ц = 0,45, т.е. более эффективно технология 2 проявляется в области бетонов средних классов, довольно широко распространенных. Лучшие результаты по прочности получены на щебне «Донской камень» с использованием крупного (К2) и среднего песков (СС2). Интересно отметить, что применение гранитного щебня (ГК2) не привело, вопреки ожиданию, к повышению прочности относительно состава на щебне «Донской камень» (К2). Зависимости предела прочности бетонов каркасной структуры в принципе подчиняются общеизвестной закономерности изменения предела прочности бетона от величины В/Ц  $R_B = 0,34 \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^{-1,3885}$  [64], но при этом зависимость для бетонов, полученных по технологии 2, показывает расчетные значения на 12 – 20% выше, а для бетонов, полученных по технологии 1 – на 15 – 25% ниже относительно формулы [64], что связано, вероятно, с различным сцеплением растворной составляющей с крупным заполнителем в бетонах.



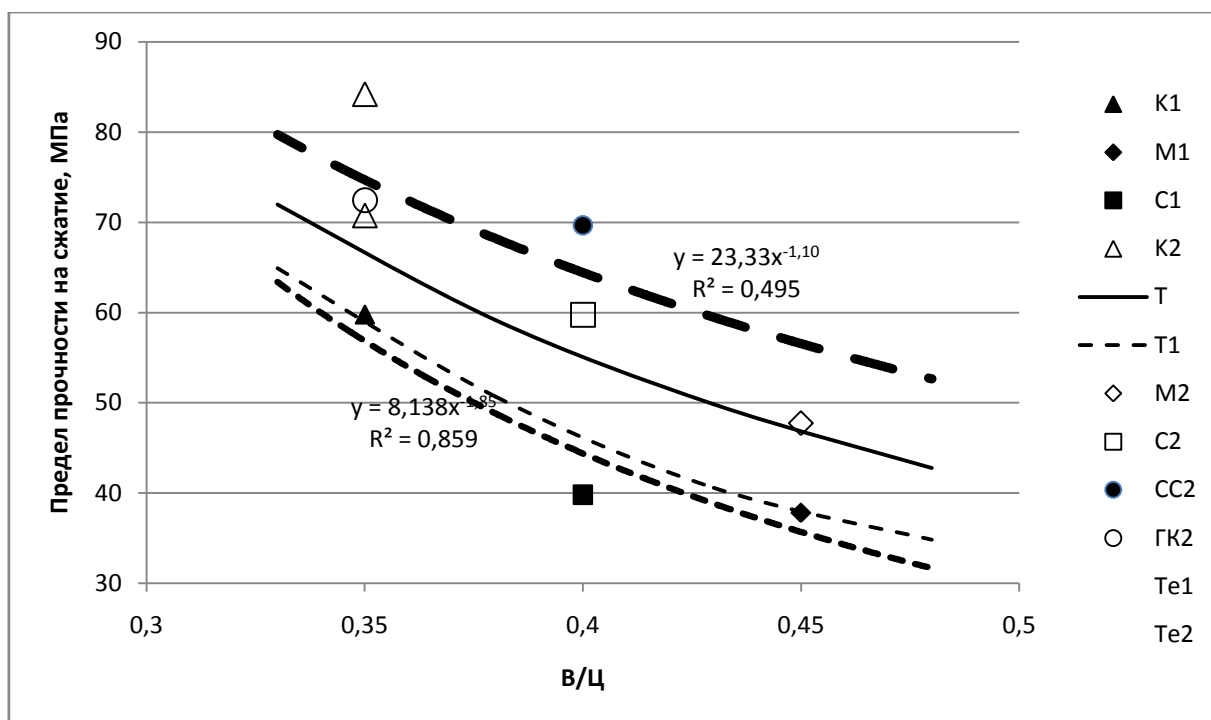


Рисунок 3.6 –Зависимость предела прочности бетона от В/Ц и вида мелкого и крупного заполнителя:

К, С, – соответственно песок с  $M_k = 2,78$ ; 50% К + 50% М; М – песок с модулем крупности 1,56; Т – по формуле  $R_B = 0,34 \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^{-1,3885}$  [64] при  $R_{ц} = 45,5$  МПа; Т1 – то же, с учетом технологической пористости 2%; Те1 – бетоны, полученные по технологии 1 (нагнетание); Те2 – бетоны, полученные по технологии 2 (погружение)

Представленные на рисунке 3.7 данные свидетельствуют о том, что предел прочности бетона может значительно превышать прочность растворной составляющей. При построении рисунка 3.7 использованы данные о прочности растворной составляющей и бетонов каркасной структуры в возрасте 2,7,15, 28 и 90 сут, в связи с этим можно утверждать, что зависимость «предел прочности бетона – предел прочности растворной составляющей» является инвариантной относительно возраста бетона.

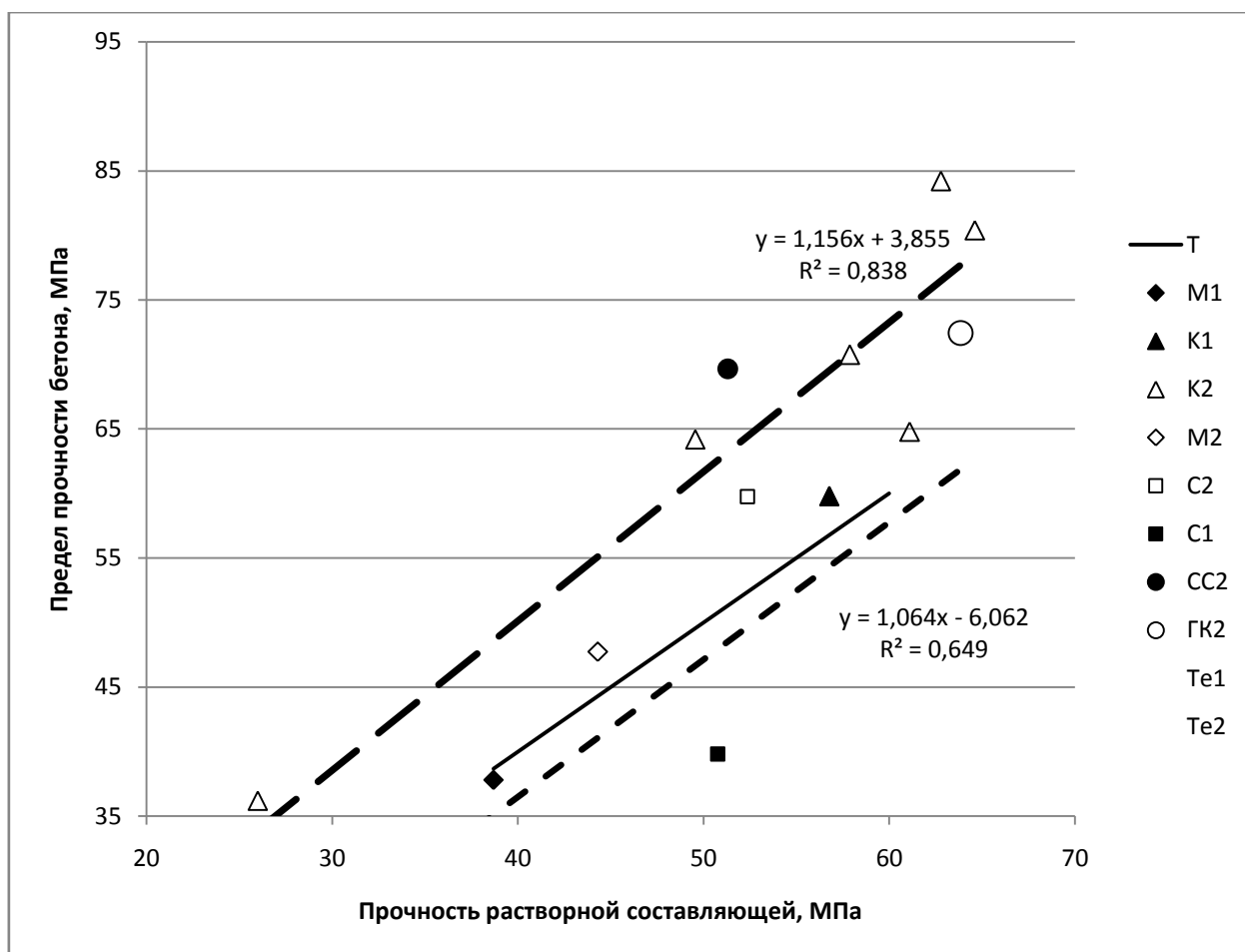


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности бетона на сжатие  $R$  от прочности растворной составляющей  $R_m$ , приведенной к базовому образцу (коэффициент приведения 0,76):

$M, C, K$  – то же, что на рисунке 1;  $GK$  – гранитный щебень; 1 – нагнетание растворной составляющей в наброску крупного заполнителя; 2 – погружение крупного заполнителя в растворную составляющую;  $CC$  – крупный заполнитель: 30% фракции 5-10 и 70% фракции 10-20;  $T - R = R_m$

Из представленных на рисунке 3.7 данных следует:

- предел прочности на сжатие  $R$  бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 1 (нагнетание) связан с пределом прочности растворной составляющей  $R_m$  зависимостью

$$R = 1,06 \cdot R_m - 6; (3.18)$$

- предел прочности на сжатие  $R$  бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 2 (погружение) связан с пределом прочности растворной составляющей  $R_m$  зависимостью

$$R = 1,16 \cdot R_m + 3,8; (3.19)$$

- предел прочности бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 1 (нагнетание) составляет от 97 до 82% от предела прочности растворной составляющей, причем меньшее значение соответствует бетонам низких классов;

- предел прочности бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 2 (погружение) составляет от 132 до 122% от предела прочности растворной составляющей;

- соотношение пределов прочности бетонов, полученных по технологии 2 и технологии 1 при равной прочности растворной составляющей изменяется от 1,26 (низкие классы) до 1,6 (высокопрочные).

Увеличение прочности бетона на сжатие относительно прочности растворной составляющей свидетельствует о включении в работу «каркаса» из крупного заполнителя при полном заполнении пустот и формировании качественной контактной зоны, причем, как следует из данных (рисунок 3.6), рост прочности бетона происходит пропорционально росту прочности растворной составляющей.

Уменьшение прочности на сжатие бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 1 (нагнетание) свидетельствует о дефектах в структуре, в т.ч. связанных с неполным заполнением и ослаблением контактной зоны (рисунок 3.8). В структуре представлены довольно толстые прослойки растворной составляющей, которые вследствие контракционной усадки могут претерпевать значительные деформации (стяжение) в пространстве между зернами крупного заполнителя, следствием чего является ослабление сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем, что может приводить к снижению прочности. Согласно [5], снижение сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем на 50% приводит к снижению предела прочности бетона на сжатие до 34%.

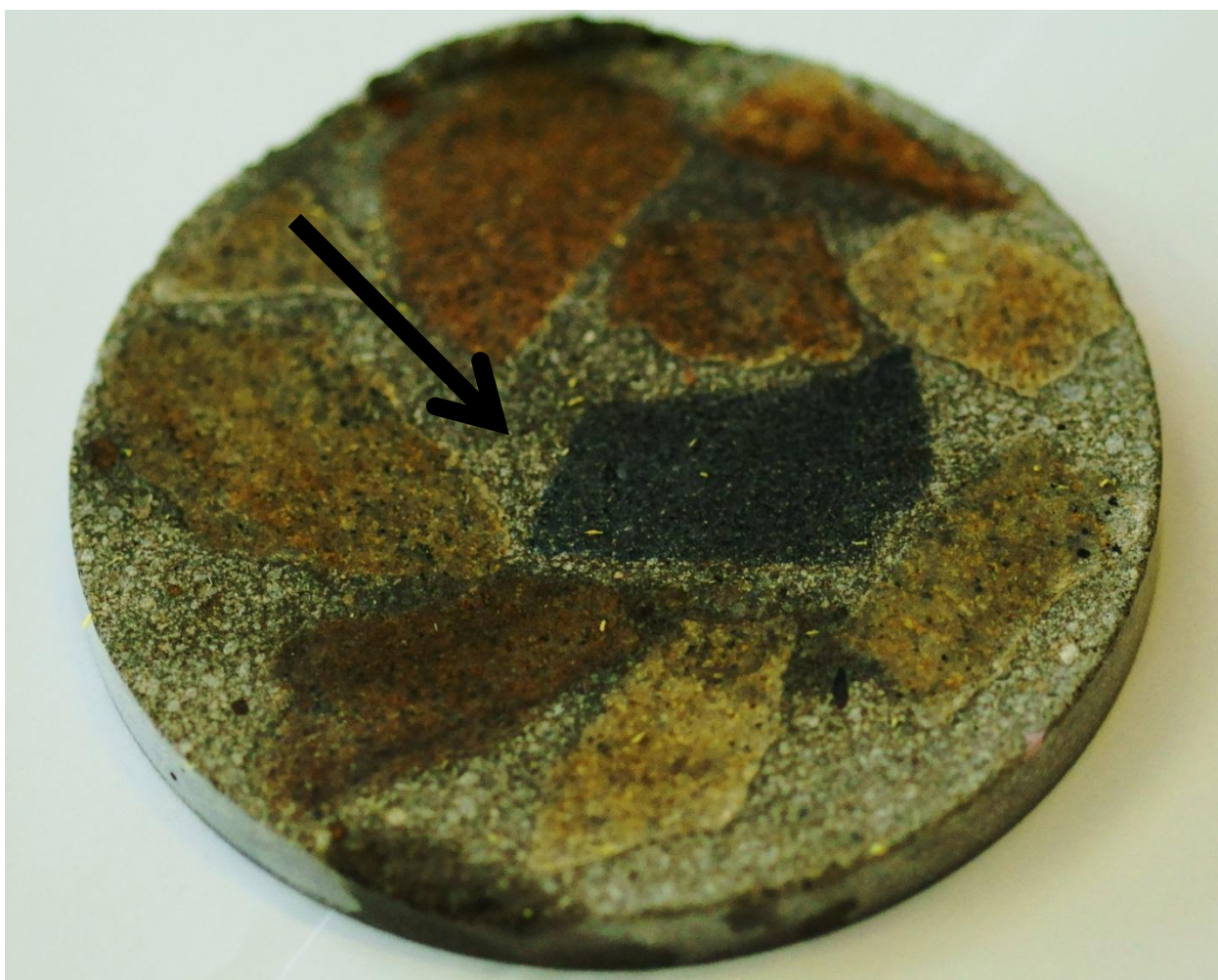


Рисунок 3.8 – Структура бетона, полученного по технологии 1 (нагнетание) с толстыми прослойками растворной составляющей (показано стрелкой); реальный диаметр образца 95 мм; крупный заполнитель фракции 20 – 40 мм

Ослабление контактной зоны проявляется в частности, в характере разрушения бетона, что проявляется в появлении и развитии характерных трещин на контакте растворной составляющей с крупным заполнителем (рисунок 3.9), причем эти трещины могут объединяться в магистральные. Такой характер разрушения бетона описан, например, в [10, 11, 28].

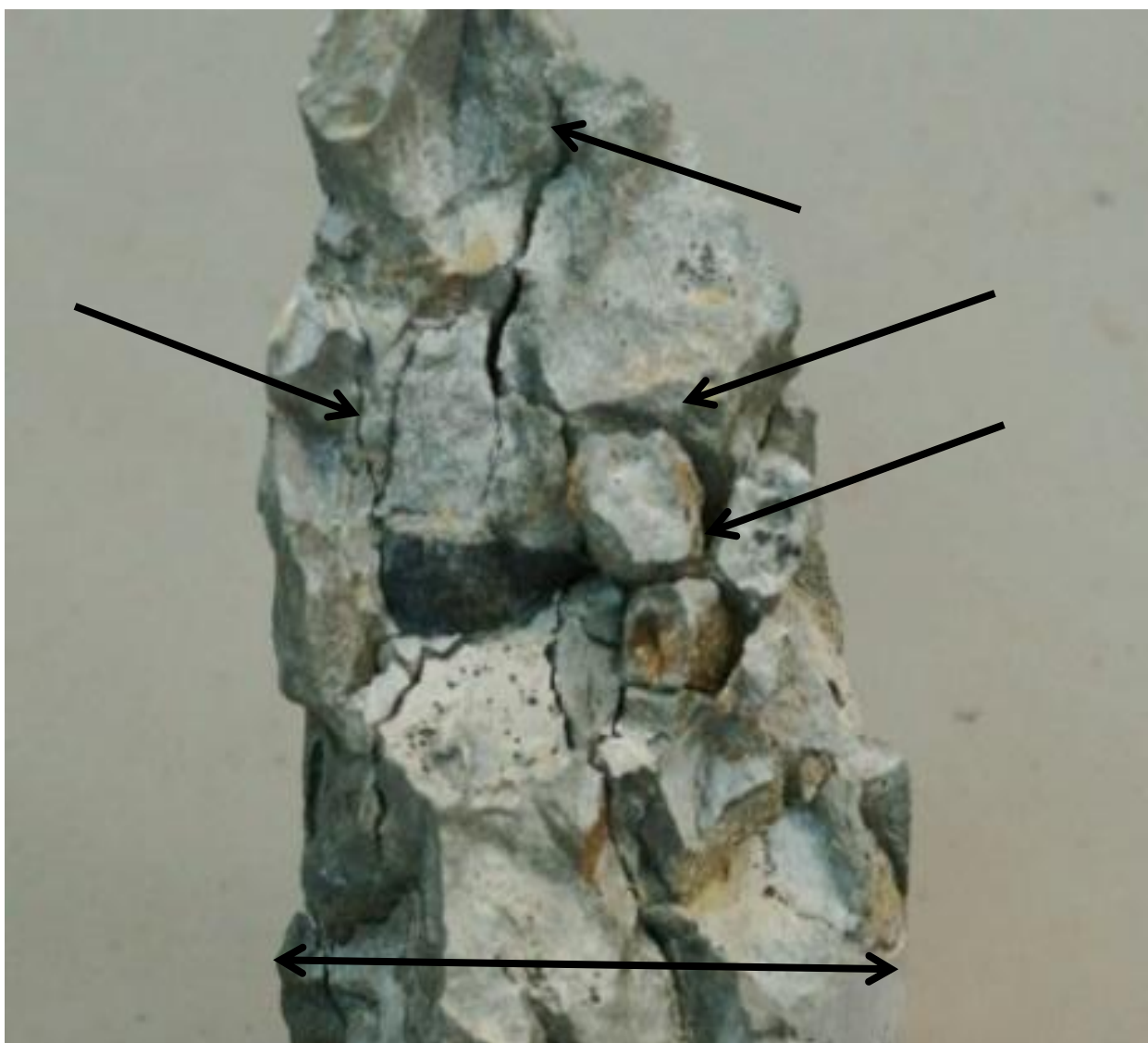


Рисунок 3.9 – Характер разрушения структуры бетона, полученного по технологии 1 (нагнетание) по зоне контакта между крупным заполнителем и растворной составляющей (показано стрелками); реальная ширина (диаметр) образца, обозначенная стрелкой – 95 мм; крупный заполнитель фракции 20 – 40 мм

В отличие от бетона каркасной структуры, полученного по технологии 1 (нагнетание), структура бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) характеризуется плотной контактной упаковкой крупного заполнителя в сочетании с тонкими прослойками растворной составляющей, обеспечивающей качественную «склеивку» крупного заполнителя (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Структура бетона, полученного по технологии 2 (погружение); реальный диаметр образца 95 мм; крупный заполнитель фракции 5 – 20 мм

При разрушении бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 2 (погружение), в частности, при испытании на растяжение при раскалывании практически не фиксируются случаи нарушения сцепления крупного заполнителя с растворной составляющей (рисунки 3.11, 3.12).



Рисунок 3.11 – Характер разрушения бетонного образца, полученного по технологии 2 (погружение) при испытании на растяжение при раскалывании – разрушение по заполнителю и растворной составляющей



Рисунок 3.12 – Характер разрушения бетонного образца, полученного по технологии 2 (погружение) при испытании на сжатие

### 3.2.2 Предел прочности на осевое растяжение

Представленные на рисунке 3.13 данные свидетельствуют о том, что бетон каркасной структуры в принципе характеризуется таким же соотношением пределов прочности при растяжении и сжатии, как и обычные бетоны. Следует отметить, что при использовании в качестве крупного заполнителя щебня производства «Донской камень» отмечается некоторое повышение прочности на растяжение, а у бетона с Павловским гранитом отмечается некоторое снижение прочности на растяжение.

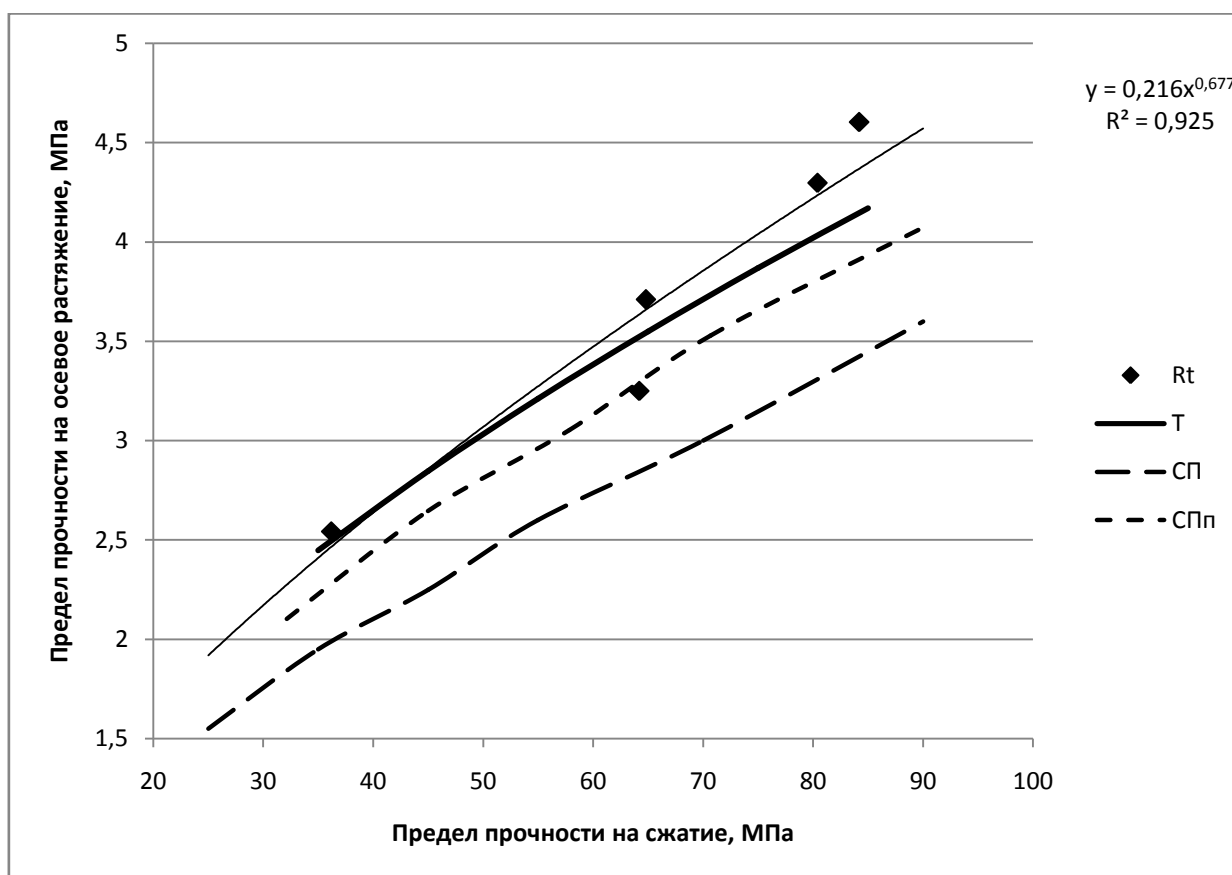


Рисунок 3.13 – Соотношение пределов прочности на осевое растяжение  $R_t$  и сжатие  $R_b$  бетонов каркасной структуры

T – по формуле  $R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}$  [64]; СП – по таблице 6.7 СП 63.13330 для тяжелого бетона  $R = B$ ,  $R_t = B_t$ ; СПп – значения приняты:  $R = B/0,778$  (коэффициент вариации прочности 0,13);  $R_t = B_t/0,737$  (коэффициент вариации прочности 0,16)

Из представленных на рисунке 3.13 данных следует, что соотношение пределов прочности на осевое растяжение и сжатие бетонов каркасной



структуры является инвариантным к возрасту бетона и определяется зависимостью

$$R_t = 0,22 \cdot R^{0,68}, \quad (3.20)$$

расхождение между расчетными значениями, определенными по ф. (3.16) и известной зависимостью  $R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}$  [64] не превышает 6%. Расхождение между значениями, полученными по ф.(3.18) и известной формуле Фере ( $R_t = 0,233 \cdot R^{2/3}$ ) не превышает 2% в диапазоне прочности от 20 до 100 МПа. Расхождение между расчетными значениями, полученными по ф.(3.18) и значениями, определенными по данным СП 63.13330 при условиях:

- $R = B/0,778$ , т.е. коэффициент вариации прочности 0,13;
  - $R_t = B_t/0,737$  коэффициент вариации прочности 0,16),
- не превышает 12%.

В связи с этим можно полагать, что сопротивление бетона каркасной структуры при осевом растяжении принципиально не отличается от традиционных бетонов. При расчете железобетонных конструкций на основе бетонов каркасной структуры можно пользоваться данными таблицы 6.7 СП 63.13330.

### 3.2.3 Кинетика твердения

На рисунке 3.14 представлены данные о кинетике прочности на сжатие бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) в сопоставлении с кинетикой прочности растворной составляющей (предел прочности растворной составляющей определен на образцах 40x40x160 мм и не приведен к базовому образцу). Очевидно, что рост прочности бетона определяется ростом прочности растворной составляющей. Некоторый сброс прочности бетона в третью неделю твердения, вероятно, связан с внутрискруктурными напряжениями вследствие собственных деформаций цементного камня. Дальнейшее полностью согласованное изменение прочности бетона и растворной составляющей свидетельствует об

отсутствии негативных последствий указанных собственных деформаций, т.е. о ликвидации возможных микротрещин, обусловленных внутрискруктурными напряжениями.

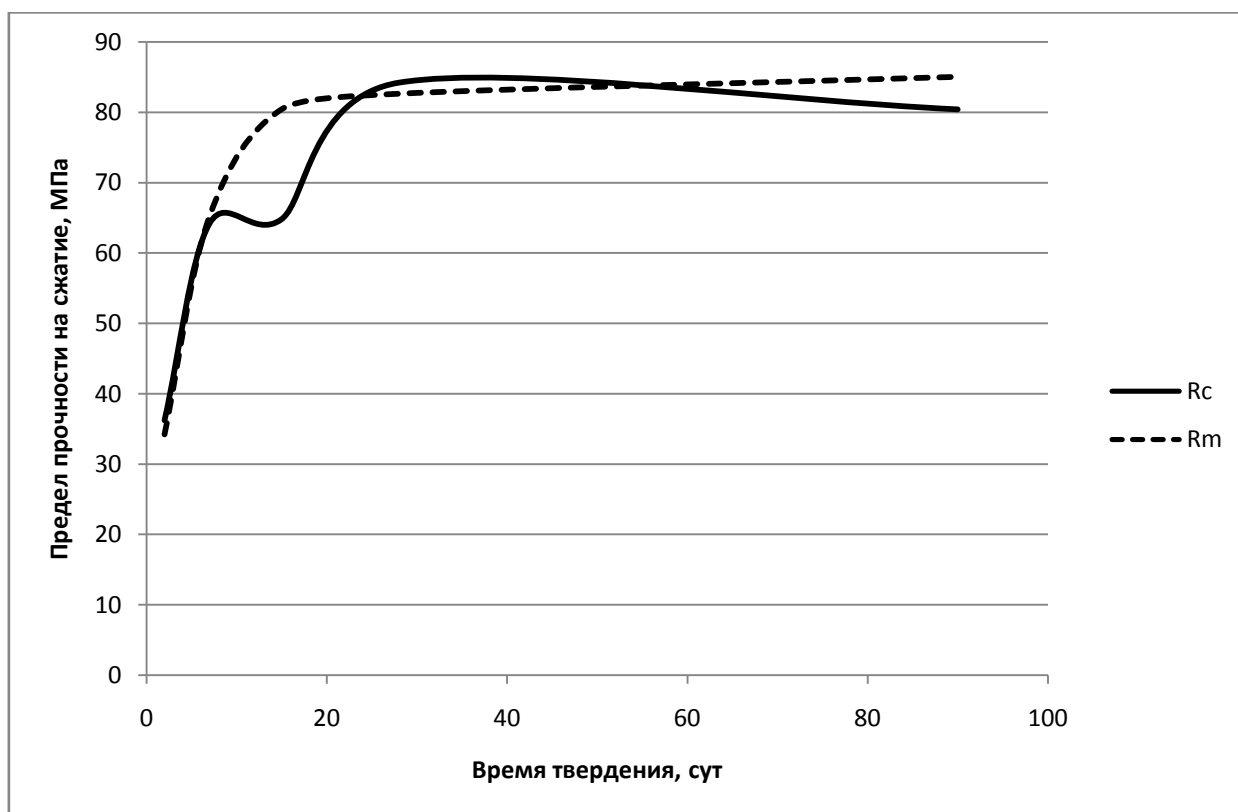


Рисунок 3.14 – Кинетика прочности бетона  $R_c$  и растворной составляющей  $R_m$

### 3.2.4 Удельный расход цемента

Одним из показателей экономической эффективности бетонов может рассматриваться величина удельного расхода цемента, численно равная отношению расхода цемента  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> к пределу прочности бетона на сжатие  $R$ , МПа [81]. Уменьшение показателя удельного расхода цемента в бетонах может быть следствием трех причин:

- уменьшение расхода цемента вследствие уменьшения расхода воды, например, за счет применения эффективных СП;
- уменьшения объема растворной составляющей вследствие уменьшения пустотности крупного заполнителя, например, при «идеальном» гранулометрическом составе крупного заполнителя;

- уменьшения объема растворной составляющей посредством увеличения концентрации крупного заполнителя в бетоне.

Очевидно, что последняя причина может быть обеспечена только при реализации технологии раздельного бетонирования посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую. Теоретически в этом случае возможно получение плотной упаковки крупного заполнителя с пустотностью до 28% [3], т.е. в этом случае объем растворной составляющей может составлять примерно 280 л/м<sup>3</sup>. Согласно [69], для обеспечения текучести растворной составляющей объем цементного теста в ней должен быть не менее 0,57. Принимая с некоторым запасом эту величину равной 0,6, получим объем цементного теста равным 0,6·280 = 168 л/м<sup>3</sup>. Поскольку объем цементного теста может быть представлен как

$$V_{\text{ЦТ}} = \text{Ц} \cdot \left( \frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{V}{\text{Ц}} \right), \quad (3.21)$$

при  $V/\text{Ц} = 0,35$  и  $\rho_{\text{Ц}} = 3,15$  получим величину  $\text{Ц}$  равной 252 кг/м<sup>3</sup>.

Выше было показано, что в рамках настоящей работы при  $V/\text{Ц} = 0,35$  получен бетон с пределом прочности 80,4 МПа. Тогда теоретически показатель удельного расхода цемента 3,13 кг/м<sup>3</sup>. По данным [16], удельный расход цемента в современных высокотехнологичных бетонах может составлять 3,48 – 5,5 кг/м<sup>3</sup>. В настоящем исследовании получена структура бетона с концентрацией растворной составляющей 0,33 с объемом цементного теста 0,58·330 = 191,5 л/м<sup>3</sup> и расходом цемента 287 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует удельному расходу цемента 3,57 кг/(МПа·м<sup>3</sup>).

Представленные на рисунке 3.15 данные свидетельствуют о высокой эффективности бетонов каркасной структуры по критерию удельного расхода цемента, особенно при применении заполнителя с минимальной пустотностью (СС2), что связано с минимальным количеством растворной составляющей и максимальным включением в сопротивление разрушению «каркаса» из крупного заполнителя.

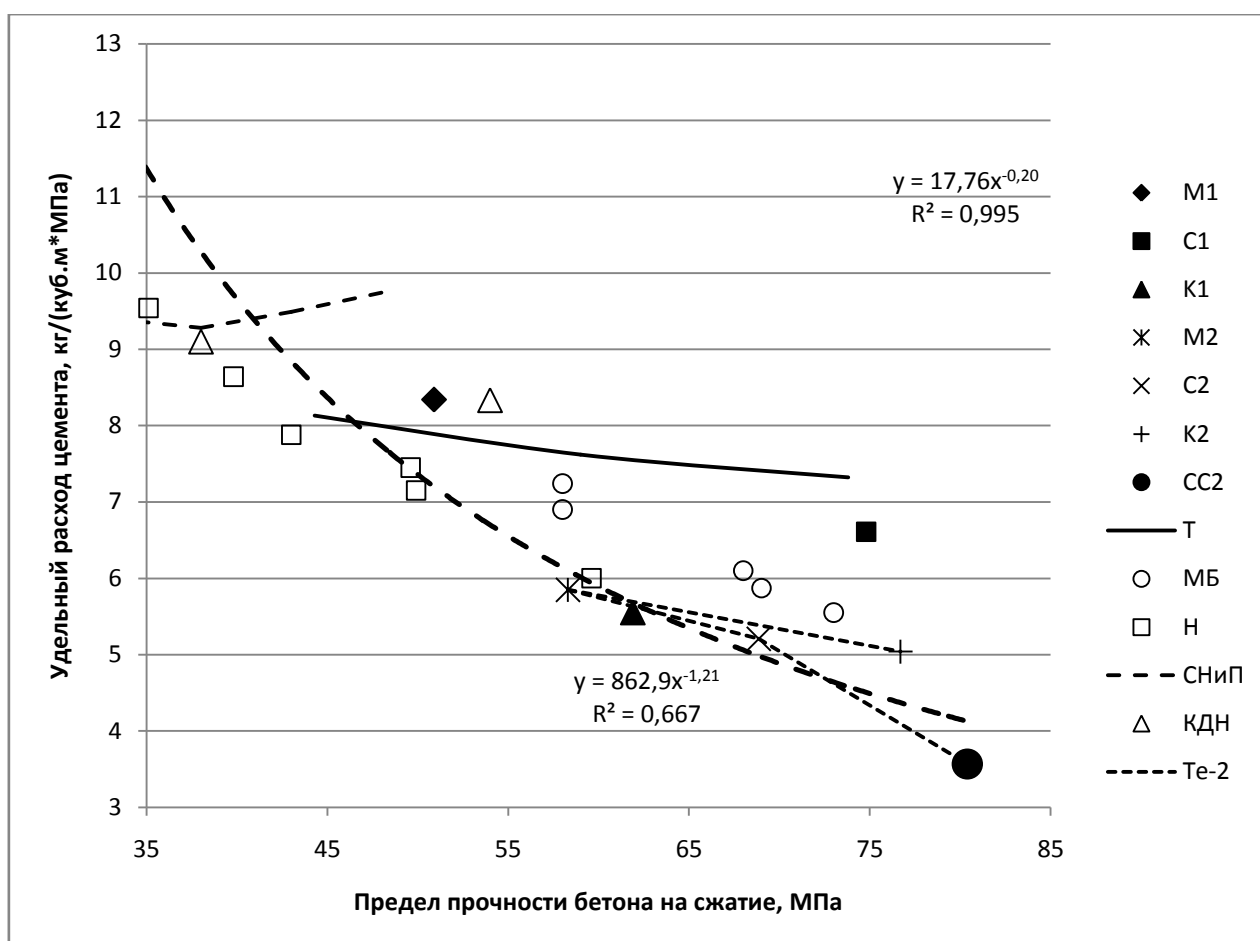


Рисунок 3.15 – Зависимость удельного расхода цемента от предела прочности бетона: М, С, К, 1,2, СС – то же, что на рисунке 3; МБ – данные [9], Н – данные Несветаева Г.В., КДН – данные [47]; СНиП - по СНиП 82-02-95; Т – из зависимости  $R = 0,65 \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{B} - 0,5\right)$  при  $B = 180$  и  $R_{ц} = 45,5$  МПа

Удельный расход цемента для бетонов каркасной структуры, полученных по технологии 2 (погружение) связан с пределом прочности бетона зависимостью

$$\frac{Ц}{R} = \frac{863}{R^{1,22}} \cdot (3.22)$$

Таким образом, бетоны, полученные из высокотехнологичных самоуплотняющихся бетонных смесей на основе современных СП, наряду с рядом преимуществ технологического характера при оценке конструктивных свойств, проявляют некоторые недостатки, в частности, пониженный модуль упругости, повышенные усадка и ползучесть, что обусловлено особенностью макроструктуры, а именно повышенной

концентрацией растворной составляющей. Улучшение деформационных показателей качества бетона предопределяет необходимость минимизации объема растворной составляющей, который в пределе должен быть равен объему пустот крупного заполнителя. Получение таких бетонов, известных как бетоны каркасной структуры, возможно только по отдельной технологии, либо нагнетанием растворной составляющей в пустоты наброски крупного заполнителя, зафиксированной в объеме, либо посредством погружения в растворную составляющую крупного заполнителя, при этом применение СП обеспечивает получение маловязкой растворной составляющей для обоих вариантов. Предел прочности растворной составляющей, полученной из маловязких смесей, однозначно определяется величиной В/Ц и не зависит от модуля крупности песка. Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии соответствует среднестатистической для тяжелых бетонов. Предел прочности бетонов каркасной структуры зависит от степени заполнения пустот, пустотности крупного заполнителя и прочности растворной составляющей. Технология погружения крупного заполнителя обеспечивает получение более качественной структуры и высокой прочности бетона. Применение современных эффективных СП, обеспечивающих получения маловязкой растворной составляющей без ее расслоения, позволяет реализовать новый метод отдельного бетонирования посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую. Удельный расход цемента в бетонах каркасной структуры, полученных по указанной технологии, до двух раз ниже в сравнении с равнопрочными бетонами, полученными по традиционной технологии и составляет менее  $4 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$ .

На рисунке 3.16 сопоставлены данные о зависимости удельного расхода цемента от предела прочности бетона, полученные в настоящем исследовании (ф.(3.19) и в [81] для самоуплотняющихся бетонов в виде

зависимости  $\frac{Ц}{R} = \frac{349}{R^{0,974}}$  в сравнении с бетонами, полученными по традиционной технологии ( $\frac{Ц}{R} = \frac{17,8}{R^{0,21}}$ ).

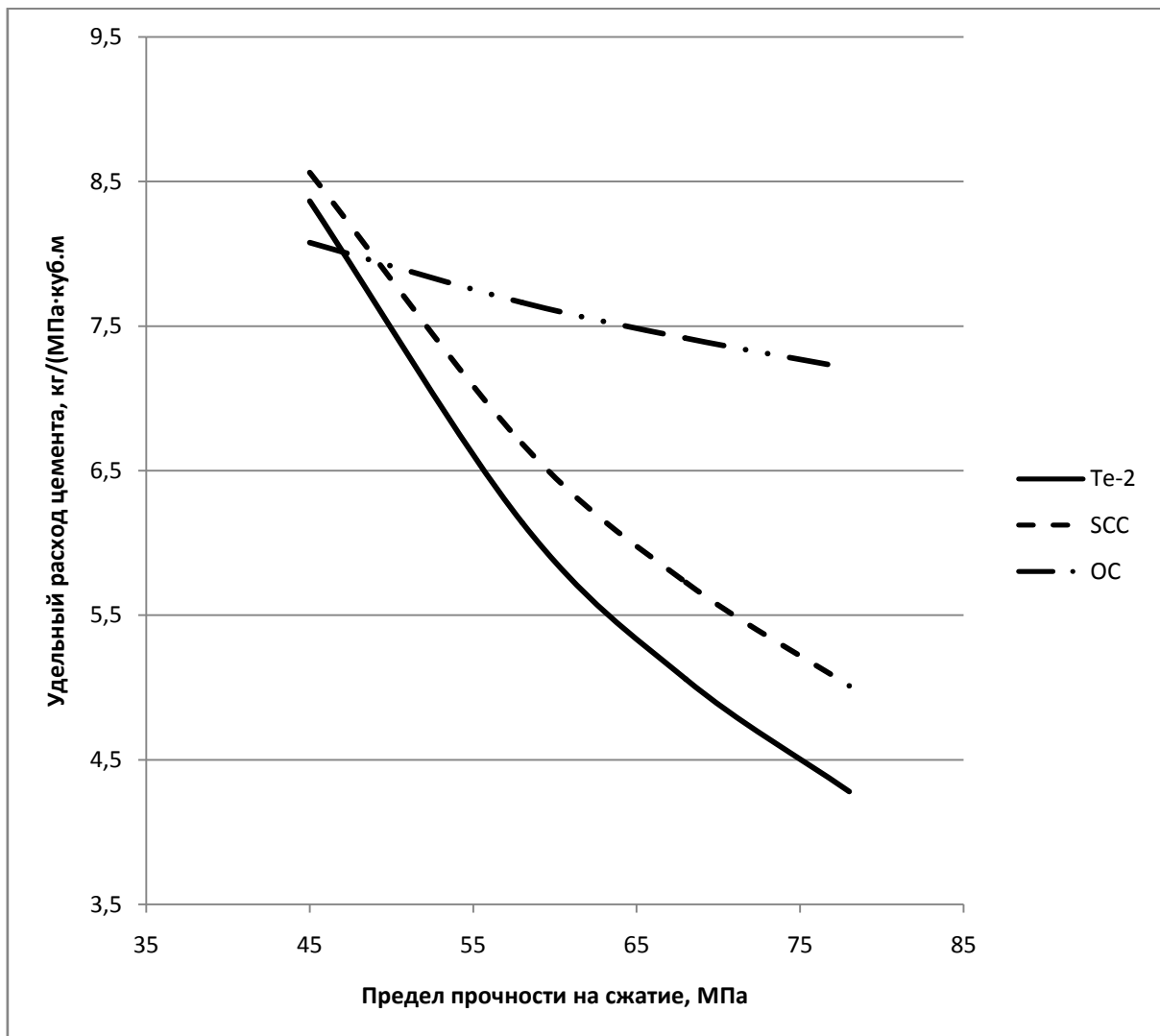


Рисунок 3.16 – Зависимость удельного расхода цемента от предела прочности бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) и СУБ по данным [81]

### 3.2.5 Оценка себестоимости материалов в бетонах каркасной структуры

Из представленных на рисунке 3.15 данных следует, что различие в удельном расходе цемента между бетонами каркасной структуры и СУБ составляет от 0,5 до 0,7 кг/(МПа·м<sup>3</sup>), между традиционными бетонами и СУБ от 0,7 до 2 кг/(МПа·м<sup>3</sup>), между традиционными бетонами и бетонами каркасной структуры от 1,19 до 2,78 кг/(МПа·м<sup>3</sup>), для бетонов с пределом

прочности порядка 50 – 80 МПа (классы В40 – В70) расчеты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Расчет себестоимости материалов  
на 1 м<sup>3</sup> бетона классов В40 – В80

Вид затрат	Бетон		
	ОС	SCC	КС
Цемент, кг/м <sup>3</sup> руб/м <sup>3</sup> (4000 руб./т)	445 – 619 1778 – 2474	389 – 392 1551 – 1568	356 – 325 1424 – 1300
Мелкий заполнитель, кг/м <sup>3</sup> руб/м <sup>3</sup> (300 руб/т)	730 – 560 256 – 196	960 336	460 – 420 161 – 147
Крупный заполнитель, кг/м <sup>3</sup> руб/м <sup>3</sup> (480 руб/т)	1060 509	880 422	1700 816
Итого:	2543 – 3179	2310 – 2326	2436 – 2258
Суперпластификатор 0,8% Ц (55 руб/кг) 0,4% Ц (286 руб/кг)	3,56 – 4,95 196 – 272	1,57 449	1,42 – 1,3 406 - 372
Итого:	2739 – 3451	2759 – 2775	2842 – 2630
Наполнитель, кг/м <sup>3</sup> руб/м <sup>3</sup> (700 руб/т)		150 105	
Всего материалы:	2739 – 3451	2864 – 2880	2842 – 2630
Разность себестоимости, руб/м <sup>3</sup> :	0	-125... 571	-103 ... 821

Представленные в таблице 3.5 данные показывают, что экономическая эффективность применения бетонов фиксированной структуры повышается с ростом класса бетона по прочности на сжатие.

По данным [81], себестоимость состава бетона будет определяться его составом и стоимостью компонентов смеси и может быть представлена в виде

$$C_b = C_c \cdot C \cdot (1 + n \cdot p + m \cdot c + d \cdot D), \quad (3.23)$$

где  $C_b$ ,  $C_c$  – соответственно себестоимость материалов в бетоне, стоимость цемента;

$\text{Ц}$  – расход цемента в бетоне;

$$n = \frac{\text{П}}{\text{Ц}}; m = \frac{\text{Щ}}{\text{Ц}}; d = \frac{\text{Д}}{\text{Ц}}; p = \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{ц}}}; c = \frac{C_{\text{щ}}}{C_{\text{ц}}}; D = \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{ц}}};$$

$\text{П}$ ,  $\text{Щ}$ ,  $\text{Д}$  – соответственно расход мелкого заполнителя, крупного заполнителя, добавки в бетоне;

$C_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{щ}}$ ,  $C_{\text{д}}$  – соответственно стоимость мелкого заполнителя, крупного заполнителя, добавки.

Поскольку, как показано выше, удельный расход цемента в бетоне связан с пределом прочности бетона зависимостью общего вида:

$$\frac{\text{Ц}}{R_{\text{б}}} = \frac{k}{R_{\text{б}}^x} \quad (3.24)$$

из которой следует:

$$\text{Ц} = \frac{R_{\text{б}} \cdot k}{R_{\text{б}}^x} = \frac{k}{R_{\text{б}}^{x-1}}, \quad (3.25)$$

то ф. (3.121) можно представить в виде:

$$C_{\text{б}} = C_{\text{ц}} \cdot \frac{k}{R_{\text{б}}^{x-1}} \cdot (1 + n \cdot p + m \cdot c + d \cdot D), \quad (3.26)$$

из которой следует, что себестоимость материалов в бетоне зависит от 9 факторов ( $k$ ,  $x$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $D$ ,  $C_{\text{ц}}$ ). Очевидно, что минимальное значение ф.(3.26) будет обеспечиваться при минимальном значении выражения в скобках, причем, в зависимости от вида бетона (обычный, самоуплотняющийся, каркасной структуры), поскольку значения  $k$  и  $x$  этих бетонов различны, минимальные значения выражения в скобках ф.(3.26) могут иметь место при разных значениях входящих в ф. (3.26) параметров.

На рисунке 3.17 представлена зависимость стоимости материалов в бетонах различных структур при некоторых фиксированных значениях параметров, входящих в ф. (3.26), а именно:  $C_{\text{ц}} = 4000$  руб/т;  $C_{\text{д}} = 180$  руб/кг;  $C_{\text{щ}} = 550$  руб/т;  $C_{\text{п}} = 350$  руб/т;  $d = 0,4\%$  от  $\text{Ц}$ . При расчетах приняты значения параметров  $k$  и  $x$  по ф.(3.22) и данным [81].



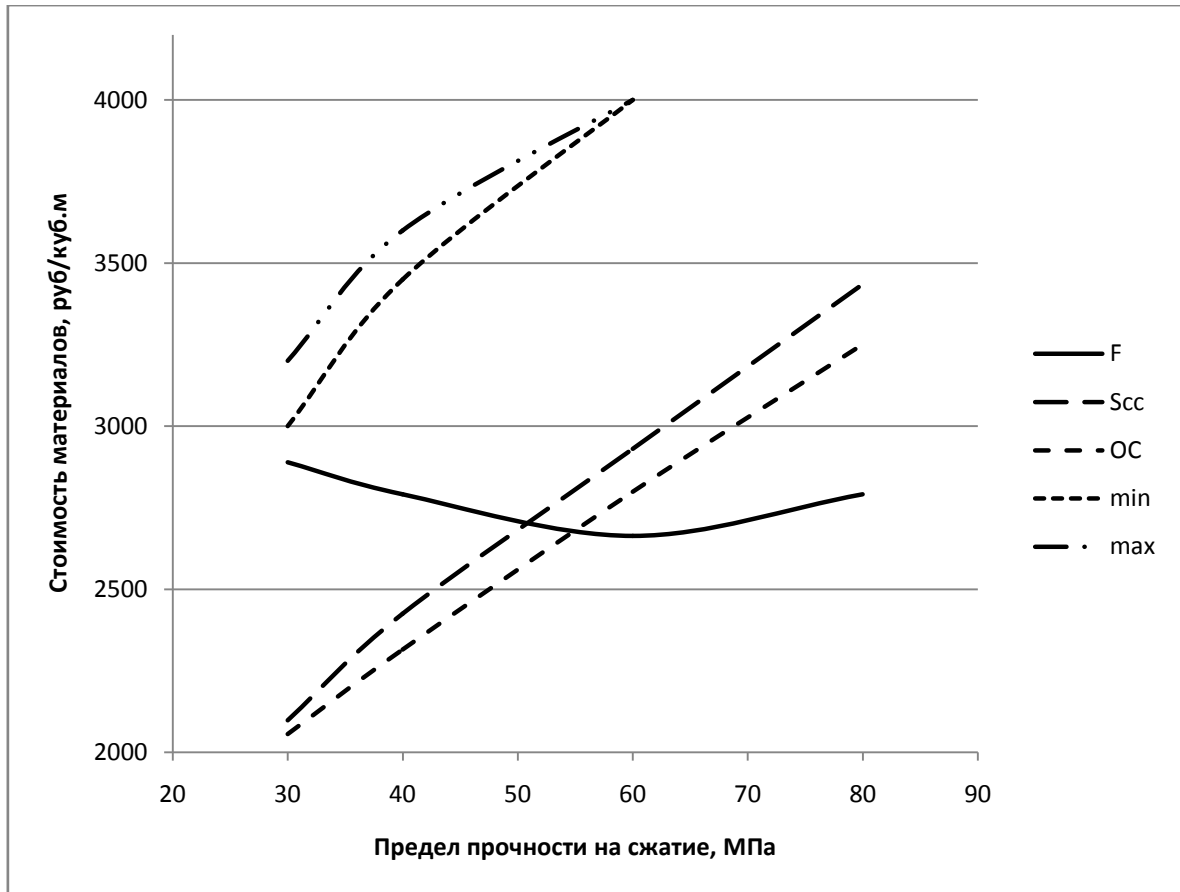


Рисунок 3.17 – Зависимость стоимости материалов в бетоне от его состава F – бетон каркасной структуры; Scc – СУБ; OC – традиционный бетон из умеренно подвижных смесей с виброуплотнением, min – минимальное значение стоимости товарной бетонной смеси (OC) по данным 5 производителей Ростова-на-Дону (февраль 2017), max – максимальное значение стоимости товарной бетонной смеси (OC) по данным 5 производителей Ростова-на-Дону (февраль 2017)

Из рисунка 3.17 очевидно, что целесообразной областью применения бетонов каркасной структуры следует рассматривать получение бетонов классов В50 и выше, т.е. в основном, высокопрочных. Понятно, что в зависимости от изменения соотношения стоимостей компонентов бетонной смеси конкретные значения стоимости материалов в бетоне могут несколько изменяться. Решающее влияние будут оказывать соотношение стоимости цемента и заполнителей и соотношение стоимостей крупного и мелкого заполнителя.

Для выявления основных закономерностей формирования стоимости материалов в бетоне реализован численный эксперимент на основе ф.(3.26) с варьированием 5 факторов на 3 уровнях по плану На-5 (Хартли-5 [5]):

- фактор «X1» вид бетона, традиционный (ОС), СУБ (SCC) и бетон каркасной структуры (F) посредством применения соответствующих значений величин “k” и “x” в ф. (3.22), соответственно 15,5 и 0,205 для ОС, 17,8 и 0,21 для СУБ и 863 и 1,22 для бетонов каркасной структуры.

- фактор «X2» - класс бетона по прочности на сжатие В30, В55, В80;

- фактор «X3» - стоимость суперпластифицирующей добавки 100, 160 и 220 руб/кг;

- фактор «X4» - стоимость крупного заполнителя (щебня) соответственно 0,1; 0,15 и 0,2 от стоимости 1 т портландцемента;

- фактор «X5» - стоимость мелкого заполнителя (песка) соответственно 0,08; 0,12 и 0,16 от стоимости 1 т портландцемента.

Стоимость портландцемента принята 4000 руб/т.

В соответствии с матрицей планирования эксперимента для каждой точки плана по ф. (3.21) вычисляли расход цемента Ц, далее определяли расходы заполнителей в зависимости от вида бетона:

- для ОС расход крупного заполнителя принимался  $1150 \text{ кг/м}^3$ , расход мелкого заполнителя определяли как  $\Pi = 2250 - \text{Ц} - \text{Щ}$ ;

- для СУБ расход крупного заполнителя принимался  $880 \text{ кг/м}^3$ , расход мелкого заполнителя определяли как  $\Pi = 2250 - \text{Ц} - \text{Щ}$ ;

- для бетонов каркасной структуры расход мелкого заполнителя принимался равным  $\Pi = 1,3\text{Ц}$ , расход крупного заполнителя определяли как  $\text{Щ} = 2350 - \text{Ц} - \Pi$ .

Расход добавки принимали 0,4; 0,7 и 1,0 % от Ц для В30; В55 и В80. Результаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Матрица планирования эксперимента в натуральных переменных

№	Факторы в натуральных переменны					Стоимость материалов в бетоне <sup>7</sup>
	x1, бетон	x2, класс бетона	x3, стоимость добавки <sup>4</sup>	x4, стоимость щебня <sup>5</sup>	x5, стоимость песка <sup>6</sup>	
1	F <sup>1</sup>	80	220	0,2	0,16	0,897
2	OC <sup>2</sup>	30	220	0,2	0,16	0,651
3	OC	80	100	0,1	0,08	0,794
4	F	30	100	0,1	0,08	0,632
5	OC	80	100	0,2	0,16	0,956
6	F	30	100	0,2	0,16	0,816
7	F	80	220	0,1	0,08	0,704
8	OC	30	220	0,1	0,08	0,467
9	OC	80	220	0,2	0,08	1,06
10	F	30	220	0,2	0,08	0,823
11	F	80	100	0,1	0,16	0,639
12	OC	30	100	0,1	0,16	0,509
13	OC	80	220	0,1	0,16	0,993
14	F	30	220	0,1	0,16	0,724
15	F	80	100	0,2	0,08	0,764
16	OC	30	100	0,2	0,08	0,554
17	F	55	160	0,15	0,12	0,742
18	OC	55	160	0,15	0,12	0,745
19	SCC <sup>3</sup>	80	160	0,15	0,12	1,023
20	SCC	30	160	0,15	0,12	0,568
21	SCC	55	220	0,15	0,12	0,83
22	SCC	55	100	0,15	0,12	0,742
23	SCC	55	160	0,2	0,12	0,83
24	SCC	55	160	0,1	0,12	0,742
25	SCC	55	160	0,15	0,16	0,824
26	SCC	55	160	0,15	0,08	0,748
27	SCC	55	160	0,15	0,12	0,786

Примечания: 1 – бетон каркасной структуры; 2 – традиционный виброуплотняемый бетон; 3 – СУБ; 4 – руб/кг; 5-7 – в долях от стоимости 1 т портландцемента (4000 руб/т)

Уравнение регрессии, описывающее зависимость стоимости материалов в бетоне (по отношению к стоимости 1 т портландцемента) имеет вид (показаны только значимые коэффициенты):

$$C_b = 0,786 + 0,116 \cdot X_2 + 0,04 \cdot X_3 + 0,064 \cdot X_4 + 0,026 \cdot X_5 - 0,043 \cdot X_1^2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,022 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_4 \cdot X_5 \quad (3.27)$$

На рисунке 3.18 представлены данные о стоимости материалов в бетоне в зависимости от класса и способа получения бетона, стоимости добавки, полученные из ф. (3.27) при  $X_4 = 0$  и  $X_5 = 0$ . Из представленных на рисунке 3.18 данных очевидно, что для традиционных бетонов и СУБ отмечается совершенно логичное повышение стоимости материалов в бетоне с ростом класса бетона, обусловленное повышением количества цемента. Для бетонов каркасной структуры такая зависимость отсутствует, стоимость материалов в бетоне незначительно зависит от класса бетона, что связано с особенностью структуры таких бетонов, заключающейся в том, что объем растворной составляющей практически одинаков, но несколько уменьшается с повышением класса бетона.

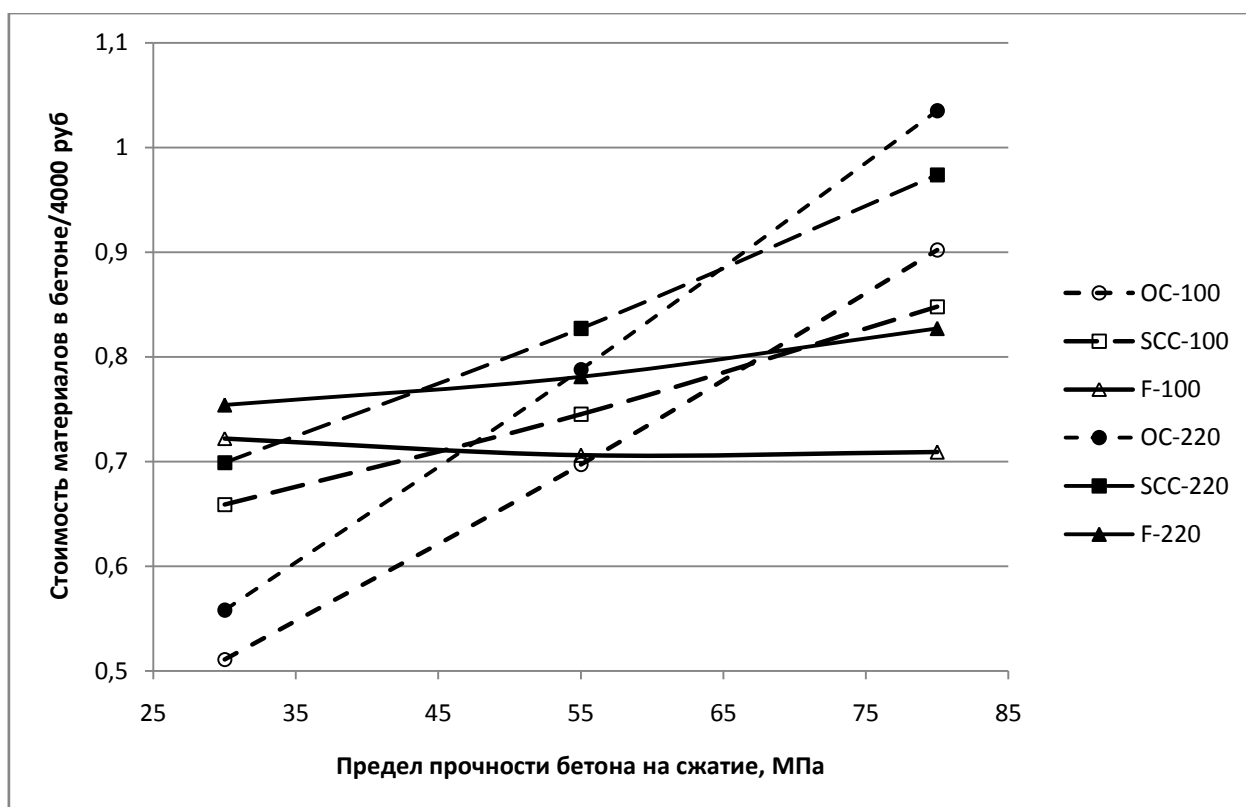


Рисунок 3.18–Зависимость стоимости материалов в бетоне от класса и способа получения бетона, стоимости добавки ОС, SCC, F– соответственно бетон, полученный по традиционной технологии с вибрационным уплотнением, СУБ, бетон каркасной структуры

## Выводы

1. Для обеспечения плотной укладки и максимальной концентрации крупного заполнителя разработан способ отдельного бетонирования посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую, при необходимости в сочетании с вибрацией, для получения бетонов каркасной структуры. Доказано преимущество предложенного способа перед способом нагнетания растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя, заключающееся в превышении предела прочности на сжатие от 1,26 для бетонов низких классов до 1,6 для высокопрочных бетонов.

2. Растворная составляющая с концентрацией вяжущего теста более 0,58 в сочетании с суперпластификатором обеспечивает необходимую вязкость для изготовления бетонов каркасной структуры методом погружения крупного заполнителя, ее предел прочности на сжатие и другие свойства не зависят от модуля крупности песка и определяются величиной В/Ц и количеством вовлеченного воздуха, причем модуль крупности песка мало влияет на величину воздухововлечения.

3. Предел прочности  $R_C$  бетонов каркасной структуры, полученных погружением в растворную составляющую, зависит от величины В/Ц  $R_C = \frac{23,3}{\left(\frac{B}{C}\right)^{1,11}}$  связан с пределом прочности растворной составляющей  $R_m$  зависимостью  $R_C = 1,16 \cdot R_m + 3,8$ .

4. Соотношение пределов прочности на осевое растяжение  $R_t$  и сжатие  $R_C$  бетонов каркасной структуры является инвариантным к возрасту бетона и определяется зависимостью  $R_t = 0,22 \cdot R_C^{0,68}$ , и до 12% превышает соотношение по СП 63.13330.

5. Удельный расход цемента в бетонах каркасной структуры, полученных по технологии 2 (погружение) связан с пределом прочности бетона зависимостью  $\frac{C}{R} = \frac{863}{R^{1,22}}$  вследствие низкой концентрации растворной составляющей может составлять менее 4 кг/(м<sup>3</sup>·МПа), или до двух раз ниже в

сравнении с бетонами, полученными по традиционной технологии, при этом с ростом класса бетона снижение себестоимости материалов на 1 м<sup>3</sup> возрастает.

6. Рациональной областью применения бетонов каркасной структуры является получение бетонов классов В50 и выше, т.е. в основном, высокопрочных. Снижение стоимости материалов может составлять до 800 руб/м<sup>3</sup>.

## **ГЛАВА 4. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ КАРКАСНОЙ СТРУКТУРЫ**

Бетоны, полученные из высокоподвижных, в т.ч. самоуплотняющихся бетонных смесей, наряду с рядом преимуществ, которые неоднократно обсуждались и обосновывались [7,14,31,34,42,45 и др.], как правило, имеют недостатки, обусловленные повышенной концентрацией растворной составляющей и, следовательно, цементного камня. В частности, к недостаткам СУБ можно отнести повышенные усадку и ползучесть, пониженный модуль упругости [67,80], что приводит к росту прогибов конструкций, снижению усадочной трещиностойкости, росту потерь предварительного напряжения арматуры в преднапряженных железобетонных конструкциях. В отличие от СУБ, бетоны, полученные из жестких смесей, характеризуются более низкими показателями усадки и ползучести, более высокими значениями модуля упругости вследствие более высокой в сравнении с СУБ концентрацией крупного заполнителя. Но жесткие бетонные смеси при бетонировании большинства монолитных конструкций недостаточно технологичны, поскольку требуют более интенсивного уплотнения, что связано с повышенными трудозатратами, особыми требованиями к опалубке. Получения бетонов с высокой концентрацией крупного заполнителя в сочетании с преимуществами высокоподвижных смесей возможно, как уже отмечалось, по технологии раздельного бетонирования посредством заполнения пустот в плотной упаковке крупного заполнителя высокоподвижной растворной составляющей. Такие бетоны известны как «бетоны каркасной структуры» [111], и их эффективность подтверждена в случаях применения различных вяжущих [111,112]. В [88] показана эффективность производства бетонов по раздельной технологии посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую.

В настоящей главе представлены результаты исследований таких деформационных свойств бетонов каркасной структуры, как начальный

модуль упругости  $E_0$ , относительная деформация  $\varepsilon_R$ , соответствующая пределу прочности, коэффициент упругости  $\lambda_R$  (отношение упругой деформации к полной), соответствующий пределу прочности. Указанные величины относятся к параметрам деформирования при кратковременном нагружении и используются, в т.ч., для аналитического описания диаграмм «напряжения – деформации» при расчете железобетонных конструкций с использованием диаграмм деформирования. Также рассмотрены деформационные свойства бетонов каркасной структуры при длительном действии нагрузки, в частности, коэффициент ползучести бетона.

## 4.1 Начальный модуль упругости бетона

### 4.1.1 Моделирование влияния рецептурных факторов на начальный модуль упругости бетона

Согласно [64,125], для оценки влияния на начальный модуль упругости бетона свойств его компонентов и их концентрации может быть использована трехкомпонентная модель структуры бетона «матрица – контактная зона – заполнитель», которая при объеме контактной зоны  $V_{tz} = 0$  трансформируется в известную модель Хирча – Доугилла с параметром  $x = 0,5$ . Поскольку рассмотренная в [64,86,94,125] модель в принципе может включать любое число элементов, то для моделирования зависимости величины начального модуля упругости бетона  $E_0$  и, как будет показано далее, коэффициента ползучести бетона  $\phi_b$ , целесообразно применить четырехэлементную модель, включающую крупный и мелкий заполнители, цементный камень и контактную зону между цементным камнем и заполнителями:

$$E_{C,0} = \frac{2}{\frac{1}{E_{0,CS}V_{CS} + E_{0,CA}V_{CA} + E_{FA}V_{FA} + E_{0,TZ}V_{TZ}} + \frac{V_C}{E_{0,C}} + \frac{V_{CA}}{E_{0,CA}} + \frac{V_{FA}}{E_{FA}} + \frac{V_{TZ}}{E_{0,TZ}}}, \quad (4.1)$$



где  $E_{0,CS}$ ;  $E_{0,CA}$ ;  $E_{0,FA}$ ;  $E_{0,TZ}$  – соответственно начальный модуль упругости цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетоне;

$V_{CS}$ ;  $V_{CA}$ ;  $V_{FA}$ ;  $V_{TZ}$  – соответственно относительный объем цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетоне;

Для реализации численного эксперимента, целью которого является уточнение количественных зависимостей между начальным модулем упругости бетона и входящими в ф.(4.1) параметрами с учетом особенностей макроструктуры бетонов каркасной структуры значения входящих в ф.(4.1) величин принимались:

- начальный модуль упругости цементного камня  $E_{0,CS}$  от 15000 до 28000 МПа, что в соответствии с зависимостью  $E_{0,CS} = 1480 \cdot R_{CS}^{0,613}$  [63] соответствует пределу прочности цементного камня от 45 до 125 МПа, т.е. охватывает широкий диапазон прочности, характерный для бетонов средних классов и высокопрочных;

- начальный модуль упругости крупного заполнителя  $E_{0,CA}$  от 40000 (некоторые песчаники) до 80000 МПа (граниты) [113,125];

- начальный модуль упругости мелкого заполнителя  $E_{0,FA}$  от 60000 до 70000 МПа (кварцевые и полевошпатовые пески) [113,125];

- начальный модуль упругости контактной зоны  $E_{0,TZ}$  от 0,9 до 0,5 величины начального модуля упругости цементного камня  $E_{0,CS}$  [63];

- относительный объем цементного камня в бетоне  $V_{CS}$  от 0,2 (бетоны каркасной структуры) до 0,4 (СУБ), причем вместе с объемом контактной зоны  $V_{TZ}$  относительный объем цементного камня  $V_{CS}$  принимался равным 0,6 от объема растворной составляющей  $V_{CS} + V_{FA} + V_{TZ}$ ;

- относительный объем крупного заполнителя в бетоне от 0,35, что характерно для СУБ, до 0,65, что характерно для бетонов каркасной структуры [88];

- относительный объем контактной зоны  $V_{TZ}$  в бетоне 0,04 – 0,05 объема цементного камня  $V_{CS}$ .

Численный эксперимент реализован с использованием метода математического планирования с применением пятифакторного плана Хартли-5 (Ha-5) с варьированием факторов ( $X_1$  - объем контактной зоны;  $X_2$  – модуль упругости цементного камня;  $X_3$  – влияние суперпластификатора на ползучесть цементного камня;  $X_4$  – модуль упругости крупного заполнителя;  $X_5$  – объем (концентрация) крупного заполнителя) на трех уровнях. Поскольку численный эксперимент был реализован в т.ч. и для определения влияния указанных факторов на коэффициент ползучести бетона, в план включен фактор  $X_3$ , учитывающий влияние СП на ползучесть цементного камня. Очевидно, что этот фактор никак не влияет на модуль упругости бетона, т.е. в данном плане он «мнимый», но позволил косвенно оценить достоверность модели, поскольку значения коэффициента при слагаемых в полиноме функции выхода, содержащих  $X_3$  в любой степени оказались равными 0. План эксперимента в натуральных переменных и результаты значений начального модуля упругости бетона представлены в таблице 4.1.

В результате реализации численного эксперимента получено уравнение регрессии в кодированных переменных в виде (указаны только значимые коэффициенты):

$$E_0 = 47784 + 6566 \cdot X_2 + 6957 \cdot X_4 + 3464 \cdot X_5, (4.2)$$

из которого следует, что значимыми факторами, определяющими величину начального модуля упругости бетона из рассмотренных выше являются:

- модуль упругости цементного камня;
- модуль упругости крупного заполнителя;
- концентрация крупного заполнителя (или концентрация растворной составляющей), что вполне логично. Как отмечено выше, ползучесть

цементного камня не влияет на модуль упругости бетона, что подтверждено нулевыми коэффициентами для фактора X3.

Таблица 4.1 - Результаты численного эксперимента по выявлению зависимости начального модуля упругости

№	Факторы в натуральных переменны					Начальный модуль упругости бетона $E_0$ , МПа
	x1, $V_{TZ}$	x2, $E_{0,CS}$	x3, $\phi_{CS}$	x4, $E_{0,CA}$	x5, $V_{CA}$	
1	0,06	35000	3,7	80000	0,66	65880
2	0,04	15000	7,3	80000	0,66	50730
3	0,04	35000	1,85	40000	0,34	44290
4	0,06	15000	3,65	40000	0,34	31990
5	0,04	35000	3,70	80000	0,66	66100
6	0,06	15000	3,65	80000	0,66	52700
7	0,06	35000	3,7	40000	0,34	43950
8	0,04	15000	7,3	40000	0,34	32330
9	0,04	35000	3,7	80000	0,34	55790
10	0,06	15000	7,3	40000	0,34	31990
11	0,06	35000	1,85	40000	0,66	42010
12	0,04	15000	3,65	40000	0,66	35640
13	0,04	35000	3,7	40000	0,66	42190
14	0,06	15000	3,65	40000	0,66	35430
15	0,06	35000	3,7	80000	0,34	55410
16	0,04	15000	3,65	80000	0,34	39220
17	0,06	25000	3,65	60000	0,5	47590
18	0,04	25000	3,65	60000	0,5	47890
19	0,05	35000	2,78	60000	0,5	52610
20	0,05	15000	5,47	60000	0,5	40110
21	0,05	25000	4,85	60000	0,5	47740
22	0,05	25000	2,45	60000	0,5	47740
23	0,05	25000	3,64	80000	0,5	54560
24	0,05	25000	3,64	40000	0,5	39420
25	0,05	25000	3,64	60000	0,66	51200
26	0,05	25000	3,64	60000	0,34	44610
27	0,05	25000	3,64	60000	0,5	47740

В [63] показано, что модуль упругости контактной зоны практически не влияет на модуль упругости, в связи с этим закономерно получен и в

настоящем исследовании результат о незначимости объема контактной зоны в исследованном диапазоне как фактора, влияющего на величину начального модуля упругости бетона.

Для уточнения влияния некоторых особенностей структуры бетона ф.(4.2) трансформирована в зависимость начального модуля упругости бетона от модуля упругости цементного камня  $E_{0,CS}$ , модуля упругости крупного заполнителя  $E_{0,CA}$  и концентрации крупного заполнителя  $V_{CA}$ :

$$E_0 = 0,66 \cdot E_{sp} + 0,35 \cdot E_{ca} + 21650 \cdot V_{ca} - 325 . (4.3)$$

Для выявления закономерностей влияния на модуль упругости бетона таких факторов, как концентрация крупного заполнителя в бетоне  $\varphi_{CA}$ , модуль упругости крупного заполнителя в бетоне  $E_{0,CA}$ , модуль упругости цементного камня  $E_{0,CS}$  и контактной зоны  $E_{0,TZ}$ , а также возможного влияния СП с применением ф.(4.1-4.3) реализован численный эксперимент, некоторые результаты которого представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Влияние СП, концентрации и модуля упругости крупного заполнителя на модуль упругости бетона

№	Модуль упругости крупного заполнителя, ГПа	СП	Модуль упругости бетона, ГПа, при модуле упругости цементного камня			
			15 ГПа		28 ГПа	
			Концентрация крупного заполнителя			
			0,35	0,65	0,35	0,65
1	40	Нет	30,3	34,1	39,2	39,6
		Есть	28,8	33,1	37,6	38,7
2	70	Нет	35,5	46,7	47,3	56,2
		Есть	33,7	45,0	45,2	54,7

Из представленных в таблице 4.2 результатов следует:

- при повышении модуля упругости крупного заполнителя от 40 до 70 ГПа повышение модуля упругости бетона составляет от 17 до 42%, при этом в большей степени повышение модуля упругости бетона отмечается при концентрации крупного заполнителя 0,65, что вполне закономерно, и более высоком значении модуля упругости цементного камня;

- повышение концентрации крупного заполнителя от 0,35 до 0,65 приводит к повышению модуля упругости бетона от 1% в случае низкого модуля крупного заполнителя в сочетании с высоким модулем упругости цементного камня, что вполне закономерно, до 33% в случае высокого модуля упругости крупного заполнителя в сочетании с низким модулем упругости цементного камня, что также вполне закономерно;

- при возможном снижении модуля упругости цементного камня на 10% вследствие применения СП снижение модуля упругости бетона составляет от 2,5 до 5%, т.е. с практической точки зрения малозначительно;

- модуль упругости контактной зоны практически не влияет на модуль упругости бетона, что согласуется с данными [135].

На рисунке 4.1 показано влияние модуля упругости цементного камня и модуля упругости крупного заполнителя на модуль упругости бетона. Очевидно, что начальный модуль упругости бетона возрастает с ростом модуля упругости цементного камня и крупного заполнителя.

На рисунке 4.2 показано влияние концентрации крупного заполнителя, модуля упругости крупного заполнителя и цементного камня на модуль упругости бетона.

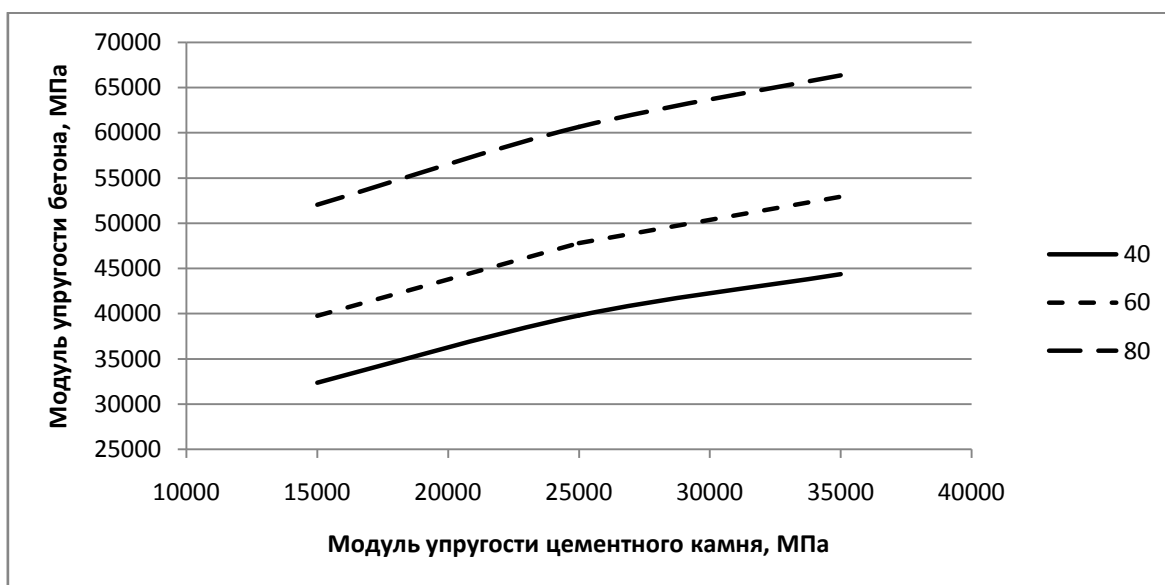


Рисунок 4.1 – Влияние модуля упругости цементного камня и модуля упругости крупного заполнителя на модуль упругости бетона  
40, 60, 80 – модуль упругости крупного заполнителя, ГПа

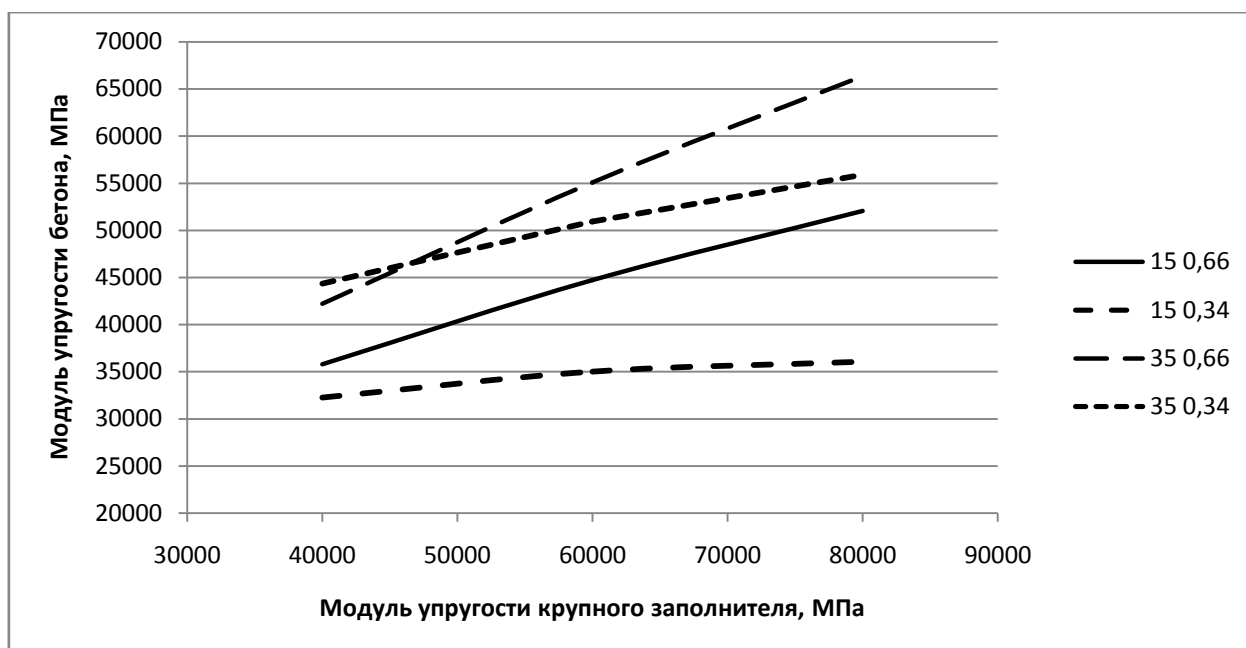


Рисунок 4.2 – Влияние модуля упругости крупного заполнителя, концентрации крупного заполнителя и модуля упругости цементного камня на модуль упругости бетона 15 0,66 – первая цифра (15) – модуль упругости цементного камня, ГПа; вторая цифра (0,66) – концентрация крупного заполнителя

Из представленных на рисунке 4.2 данных очевидно, что влияние концентрации крупного заполнителя на модуль упругости бетона проявляется неодинаково в зависимости от величин модулей упругости крупного заполнителя и цементного камня. Так, в бетонах с низко модульным цементным камнем (15000 МПа, ориентировочная прочность цементного камня 45 МПа), при повышении концентрации крупного заполнителя от 0,34 (самоуплотняющиеся бетонные смеси) до 0,66 (бетоны с фиксированной структурой) при использовании низко модульного крупного заполнителя (40000 МПа) модуль упругости бетона возрастает примерно на 11 %. В случае применения более высоко модульного заполнителя (80000 МПа) повышение модуля упругости бетона составит в этом случае 44%.

В бетонах с высоко модульным цементным камнем, т.е. высокопрочных, с повышением концентрации крупного низко модульного заполнителя модуль упругости бетона практически не возрастет, а при использовании высоко модульного заполнителя возрастет только на 18%.

Влияние модуля упругости крупного заполнителя, как следует из представленных на рисунке 4.2 данных, также неодинаково. В бетонах с фиксированной структурой и низко модульным цементным камнем применение высоко модульного заполнителя (80000 МПа) повышает модуль упругости бетона на 45%, а в СУБ – только на 12%. В случае высоко модульного цементного камня (высокопрочные бетоны) соответственно на 57% и 26%.

При модуле упругости цементного камня 20000 МПа (предел прочности цементного камня порядка 70 МПа), модуле упругости крупного заполнителя 50000 и 70000 МПа соотношение модулей упругости бетона с фиксированной структурой в соответствии с ф. (4.3) составит 1,21. Экспериментально определенные значения модуля упругости бетонов с фиксированной структурой с пределом прочности на сжатие порядка 58 МПа составили:

- на граните – 47800 МПа;
- на песчанике – 40500 МПа,

т.е. повышение модуля упругости бетона на более высоко модульном заполнителе составило 1,18, что очень хорошо согласуется с результатами, полученными при анализе модели ф.(4.1).

#### **4.1.2 Экспериментальные исследования модуля упругости бетона с фиксированной структурой**

##### **4.1.2.1 Деформационные свойства растворной составляющей**

Поскольку, согласно [64,72,125] и приведенных выше результатов, модуль упругости бетона зависит от свойств и концентрации крупного заполнителя и растворной составляющей, изучено влияние вида мелкого заполнителя на свойства растворной составляющей бетонов (таблица 4.3). Начальный модуль упругости растворной составляющей бетонов определен через динамический модуль упругости.

Таблица 4.3 - Результаты определения начального модуля упругости растворной составляющей бетонов с каркасной структурой

Серия	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость УЗИ, м/с	Модуль упругости, ГПа		R, ** МПа
			Ed	Eo	
M1	2098	3920	25,6	20,9	38,7
K1	2230	4380	33,9	28,1	56,8
C1	2108	4071	27,73	22,82	47,1
K2	2250	4680	39,95	32,88	57,9
M2	2115	3964	26,37	21,7	44,3
C2	2190	4083	28,95	23,83	52,4
CC2	2194	4199	30,69	25,26	51,3

Примечание: \*\* - приведенная к базовому образцу прочность на сжатие

На рисунке 4.3 представлена зависимость начального модуля упругости растворной составляющей бетонов от предела прочности на сжатие.

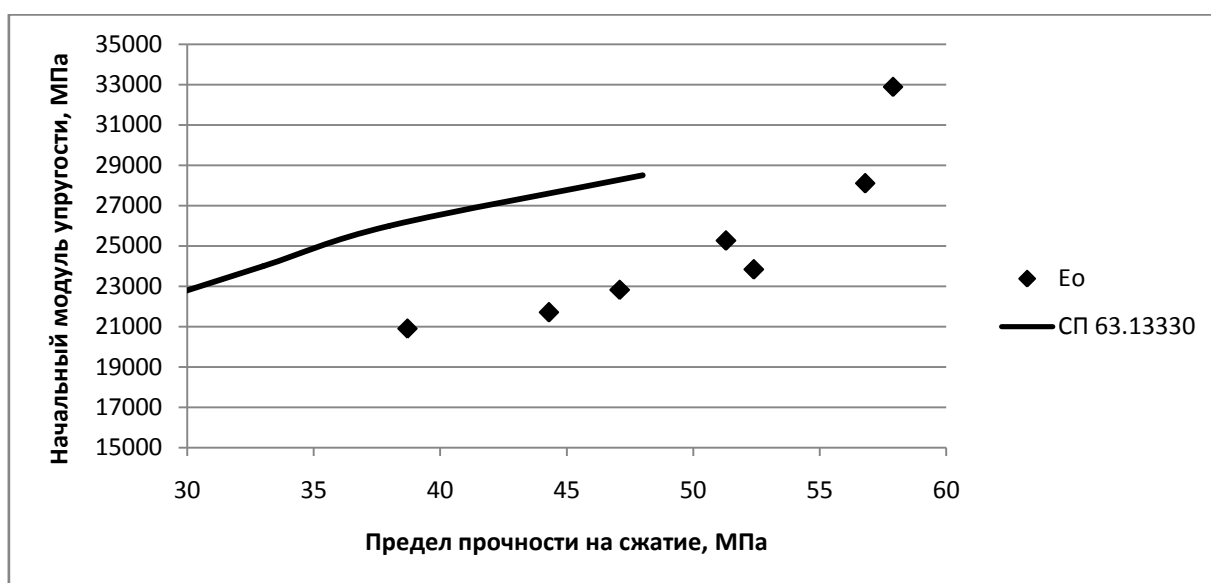


Рисунок 4.3 – Зависимость начального модуля упругости МЗБ от предела прочности на сжатие СП 63.13330 – по своду правил для мелкозернистого бетона группы А

Из рисунка 4.3 следует, что измеренное значение начального модуля упругости ниже значений, приведенных в СП 63.13330 для бетонов группы А на 11 – 27%. Это может быть связано со следующими причинами:



- в СП 63.13330 приведены значения модуля упругости МЗБ без учета возможного влияния СП на модуль упругости бетона, в эксперименте использован СП, а, согласно [14,43-46,59,67,71,72,77], СП могут снижать модуль упругости бетона;
- в СП 63.13330 нормирование начального модуля упругости бетона задано в зависимости от класса бетона, при построении рисунка 4.3 для перехода от класса к текущему значению прочности использована зависимость  $R = B + 8$ , что может вносить некоторую погрешность;
- значения начального модуля упругости МЗБ в экспериментальных исследованиях определены через динамический модуль упругости с использованием зависимости  $E_0 = 0,823 \cdot E_d$ , что также может вносить некоторую погрешность.

В целом можно констатировать, что начальный модуль упругости растворной составляющей бетонов в основном определяется пределом прочности растворной составляющей.

#### **4.1.2.2 Диаграмма «напряжения – деформации» при кратковременном центральном осевом сжатии бетонов фиксированной структуры**

На рисунках 4.4 - 4.6 представлены диаграммы «напряжения – деформации» исследованных бетонов. Вид диаграмм свидетельствует о том, что и вид использованных материалов и, особенно, технология отдельного бетонирования (нагнетание растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя или погружение крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую) оказывают существенное влияние на характер зависимости «напряжения – деформации» исследованных бетонов. Очевидно, что ряд составов имеет значительно большую крутизну диаграммы, в т.ч. на ранних этапах нагружения, в сравнении с диаграммой СУБ класса В40. Характер представленных на рисунках 4.4-4.6 диаграмм свидетельствует о том, что бетоны, полученные по отдельной технологии, особенно посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую

растворную составляющую, будут обладать более высоким значением начального модуля упругости бетона.

Это вполне закономерно, поскольку в составах, полученных по отдельной технологии, модуль упругости заполнителя превышает модуль упругости растворной составляющей, при этом бетоны с каркасной структурой обладают более высокой концентрацией крупного заполнителя, а, согласно результатам, полученным выше при анализе модели, в этом случае повышение модуля упругости бетона может составлять от 11 до 44%.

Хорошо видно, что диаграммы бетонов, полученных по отдельной технологии, имеют S – образный вид, что возможно обусловлено особенностью включения каркаса из крупного заполнителя в работу на ранних этапах нагружения. Этот факт подробно описан в [3,4,10,11,111,112,123].

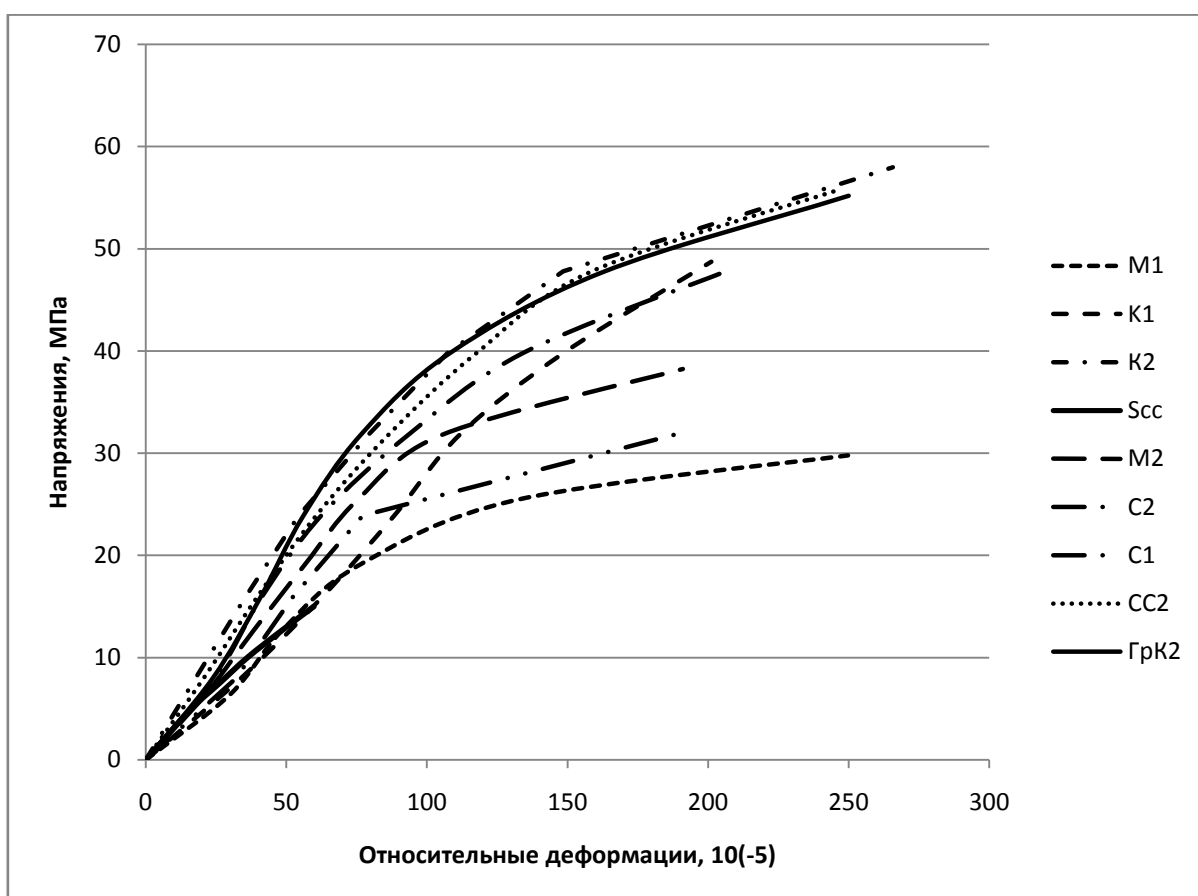


Рисунок 4.4 – Диаграммы «напряжения – деформации» бетонов при кратковременном центральном осевом сжатии  $S_{cc}$  – самоуплотняющийся бетон класса В40

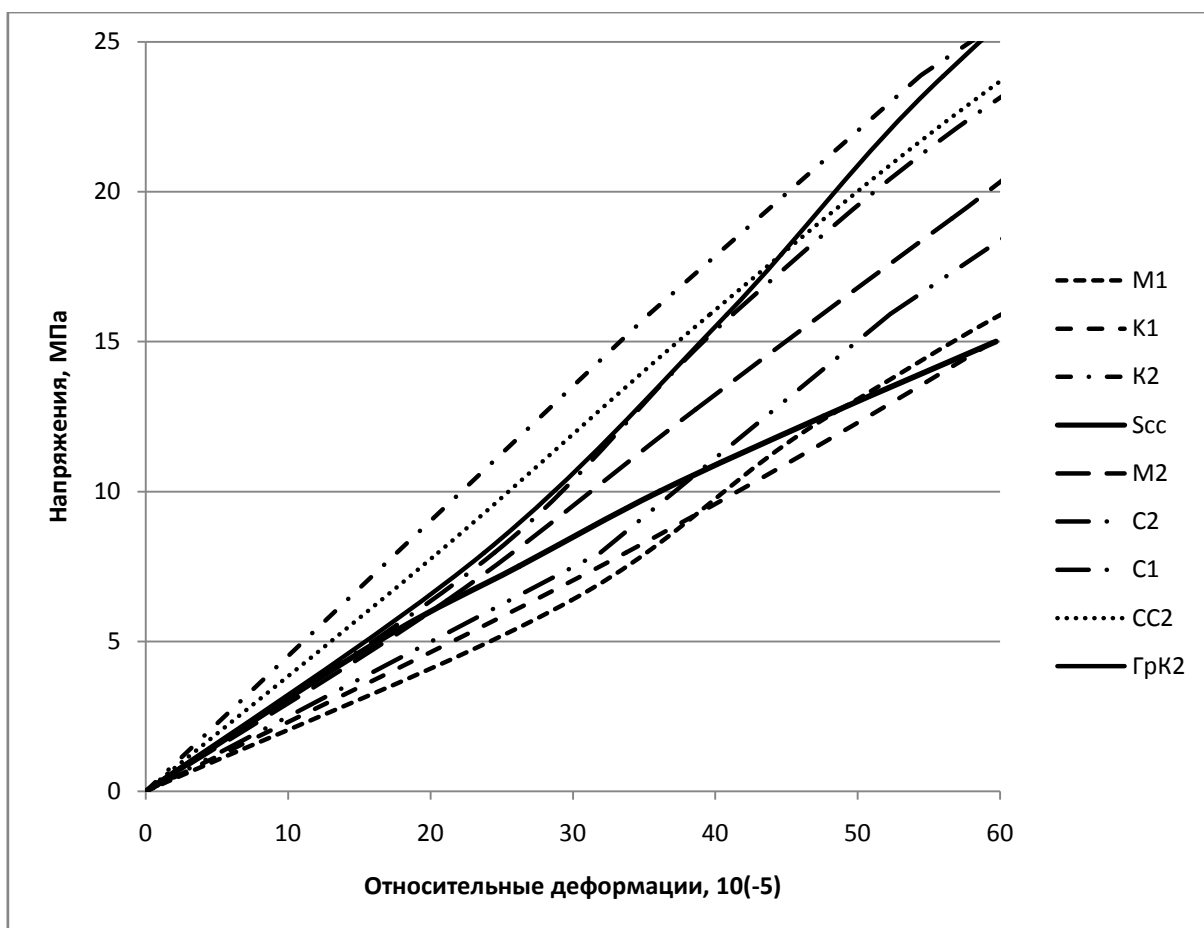


Рисунок 4.5 – Диаграммы «напряжения – деформации» бетонов при кратковременном центральном осевом сжатии при уровне нагружения до 0,3 предела призмочной прочности  $S_{cc}$  – самоуплотняющийся бетон класса В40

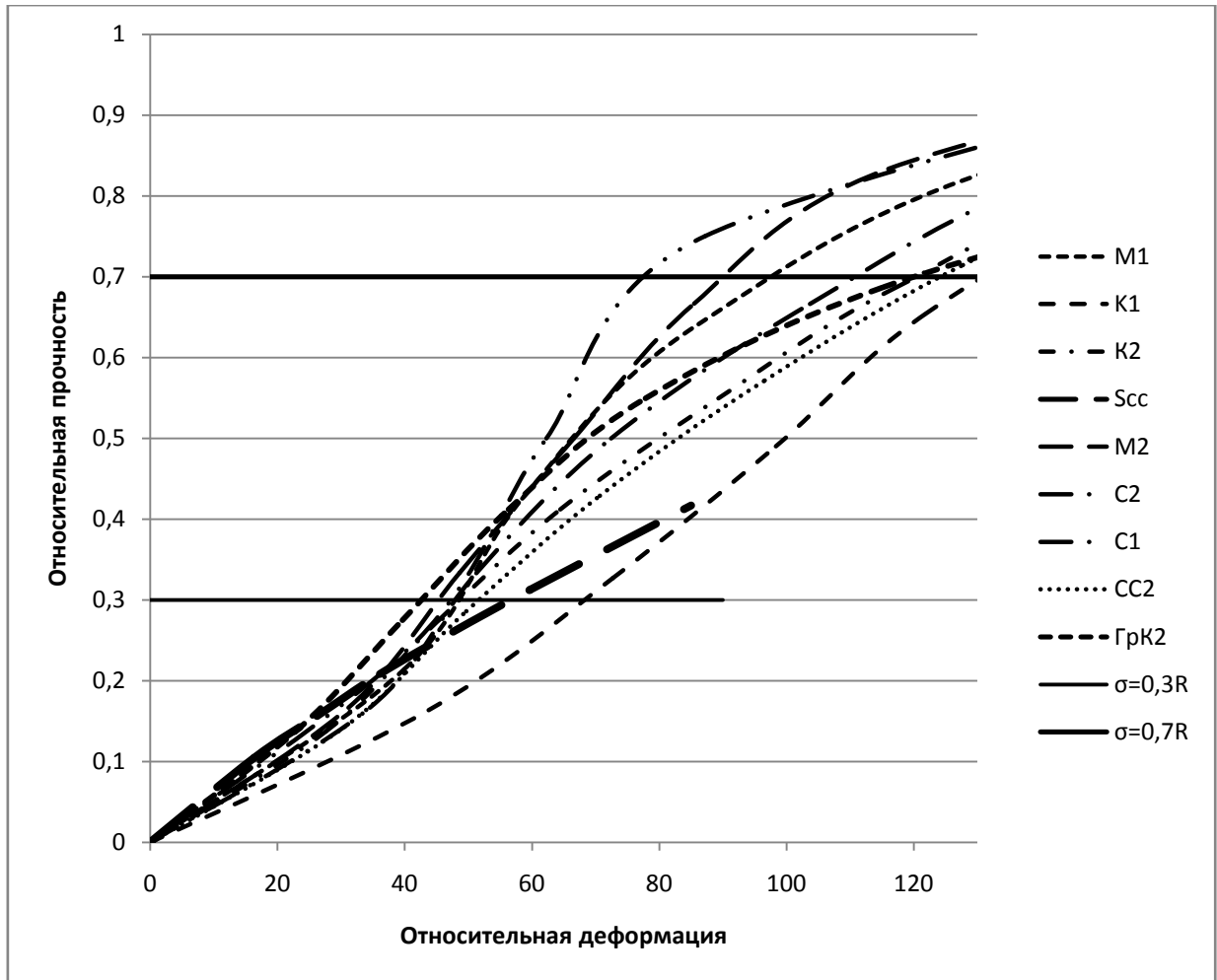


Рисунок 4.6 – Диаграммы «напряжения – деформации» бетонов при кратковременном центральном осевом сжатии  
 М,С,К – соответственно мелкий, средний и крупный песок; 1,2 – соответственно изготовление бетона по технологии 1 (нагнетание) и 2 (погружение); Гр – крупный заполнитель – гранитный щебень; SCC– СУБ класса В40

#### 4.1.2.3 Динамический модуль упругости бетонов с фиксированной структурой

На рисунке 4.7 представлено соотношение начального и динамического модулей упругости бетона. Поскольку динамический модуль упругости определяется как [64,72,125]

$$V = \sqrt{\frac{E_D}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} = \sqrt{b \frac{E_D}{\rho}} \quad (4.4)$$

ИЛИ

$$E_D = c\rho V^2, \quad (4.5)$$

то очевидно, что значение величины «с» в ф.(4.5) будет зависеть от величины коэффициента Пуассона бетона  $\mu$ . Эта зависимость имеет вид

$$c = 1,12 \cdot \exp(-1,18 \cdot \mu). \quad (4.6)$$

Из ф.(4.6) следует, что величина «с» изменяется от 0,978 при  $\mu = 0,1$  до 0,8 при  $\mu = 0,27$ . В связи с этим можно предположить, что отмечаемое на рисунке 4.6 различие между расчетными и фактическими значениями связано с различием коэффициентов Пуассона, причем эти значения, как правило, будут меньше относительно обычно принимаемого значения 0,2. Отсутствие явной однозначной связи между динамическим и начальным модулями упругости бетонов с каркасной структурой вероятно связано с особенностью прохождения ультразвукового импульса через структуру бетона. Поскольку звук имеет более высокую скорость в более плотной среде, т.е. в крупном заполнителе, а в бетонах каркасной структуры возможна такая система контактов между зернами крупного заполнителя, при которой прохождение ультразвукового импульса возможно только через крупный заполнитель.

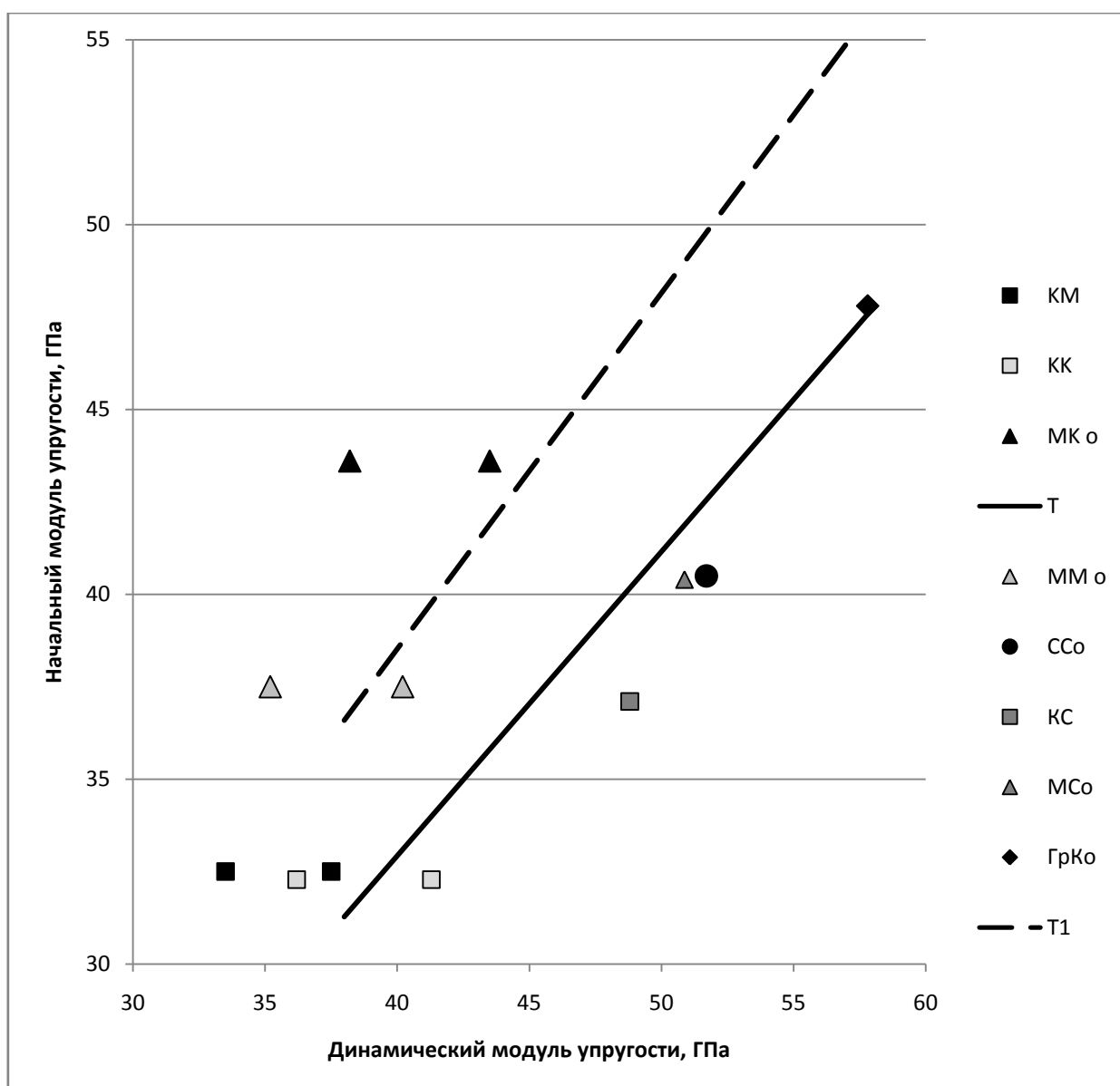


Рисунок 4.7 – Зависимость между динамическим  $E_d$  и начальным  $E_0$  модулем упругости бетона

$T$ ,  $T1$  – по формуле  $E_0 = k \cdot k_1 \cdot E_d$  соответственно при  $k = 0,823$  [64,72,125],  $k_1 = 1,0$ ;  $k = 0,823$ ,  $k_1 = 1,17$  (соответствует повышению динамического модуля упругости при снижении  $\mu$  от 0,25 до 0,1 из ф.(4.6))

На рисунке 4.8 представлена зависимость начального и динамического модулей упругости бетонов каркасной структуры от предела прочности.

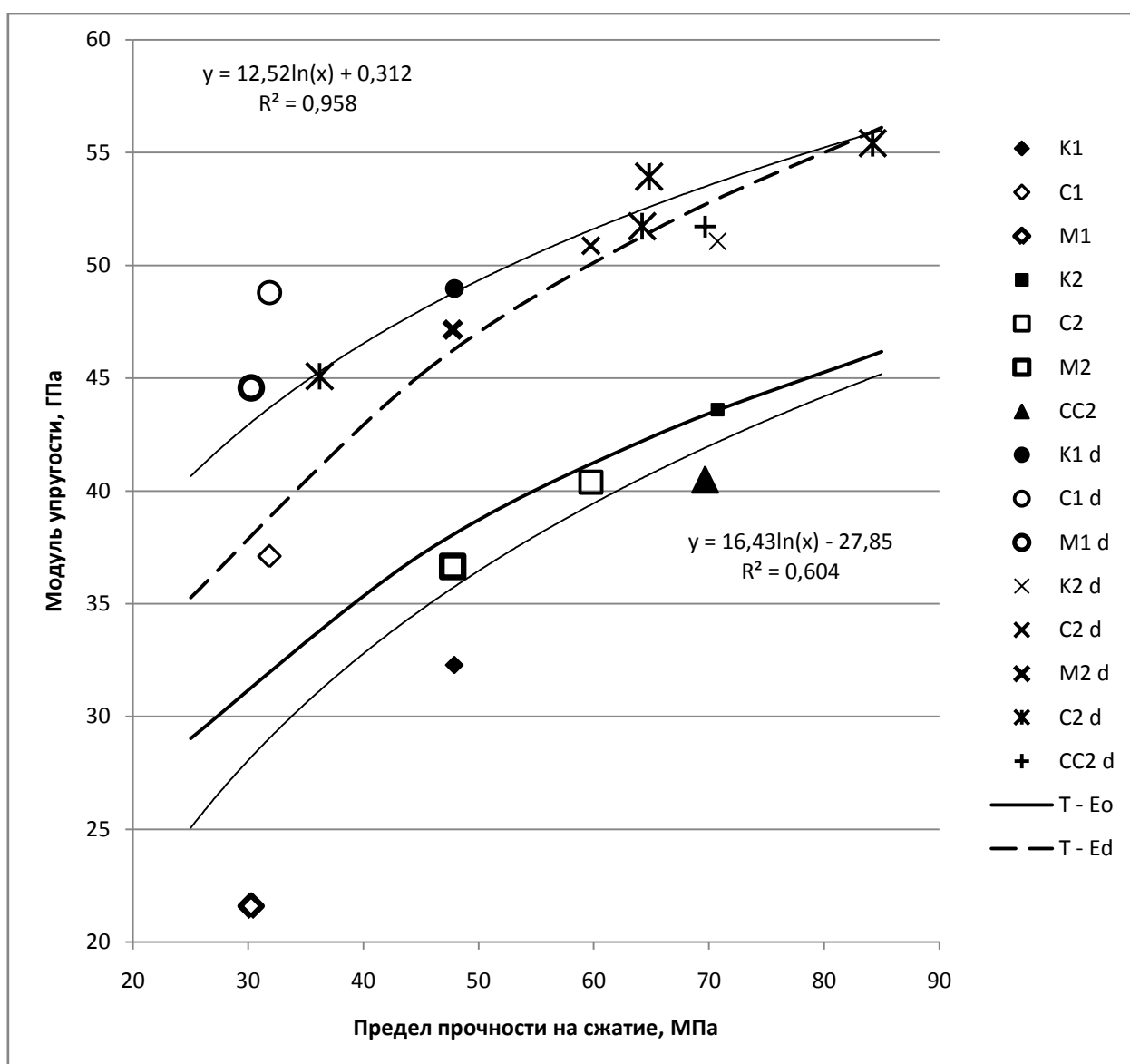


Рисунок 4.8 – Зависимость динамического  $E_d$  и начального  $E_0$  модуля упругости бетона от предела прочности на сжатие  $M, C, K$  – соответственно мелкий, средний и крупный песок; 1, 2 – соответственно изготовление бетона по технологии 1 (нагнетание) и 2 (погружение);  $Гр$  – крупный заполнитель – гранитный щебень;  $SCC$  – СУБ класса  $B40$ ;  $T - E_0$  – по формуле  $E_0 = \frac{0,05 \cdot R + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + R}} [64,72,125]$ ;  $T - E_d$  – по формуле

$$E_d = \frac{E_0}{0,823} [64,72,125]$$

Из представленных на рисунке 4.7 данных следует:

- начальный модуль упругости бетона  $E_0$ , ГПа, связан с пределом прочности  $R$ , МПа, зависимостью

$$E_0 = 16,44 \cdot \ln(R) - 27,86; (4.7)$$

- динамический модуль упругости бетона  $E_d$ , ГПа, связан с пределом прочности  $R$ , МПа, зависимостью

$$E_d = 12,53 \cdot \ln(R) + 0,31; (4.8)$$

- соотношение между начальным и динамическим модулем упругости бетона зависит от предела прочности бетона

$$\frac{E_0}{E_d} = 0,15 \cdot \ln(R) + 0,15 (4.9)$$

и изменяется от 0,65 при прочности 30 МПа до 0,8 при прочности 80 МПа.

Очевидно, что для бетонов каркасной структуры связь между динамическим и начальным модулем упругости несколько отличается от известной зависимости для бетонов, полученных по традиционной технологии. Это обусловлено тем, что в бетонах каркасной структуры вследствие более высокой концентрации крупного заполнителя и возможного контакта между его зернами прохождение ультразвука имеет иной характер по сравнению с бетонами, полученными по традиционной технологии, что и вызывает повышение динамического модуля упругости бетона каркасной структуры при низком уровне прочности в сравнении с бетонами, полученными по традиционной технологии.

#### **4.1.2.4 Модуль упругости бетонов с каркасной структурой по диаграмме «напряжения-деформации»**

В таблице 4.4 представлены результаты исследований модуля деформаций, в т.ч. модуля упругости бетонов каркасной структуры, полученных по различным технологиям на различных крупных и мелких заполнителях.

На рисунках 4.9, 4.10 представлены данные о соотношении величин модулей деформаций, определенных по диаграмме «напряжения – деформации» следующими способами (таблица 4.4):



-  $E_o$  ( $\sigma=0,3R$ ) – секущий модуль деформаций при уровне нагружения, равном 30% предела кратковременной прочности (по ГОСТ 24452);

-  $E_{o, \max}$  – наибольший секущий модуль деформаций на практически линейном участке диаграммы «напряжения – деформации» при уровне нагружения от 30 до 70% предела кратковременной прочности;

-  $E_o$  ( $\sigma=0,7R$ ) - секущий модуль деформаций при уровне нагружения, равном 70% предела кратковременной прочности;

-  $E_o$  - касательный модуль деформаций, определенный по соотношению приращений напряжений и деформаций на линейном участке диаграммы.

Таблица 4.4 - Модуль упругости бетонов с каркасной структурой

Состав	Модуль деформаций, ГПа					
	по скорости УЗ		по « $\sigma$ - $\epsilon$ » диаграмме			
	$E_d^1$	$E_o = 0,823E_d$	$E_o^2$ ( $\sigma=0,3R$ )	$E_{o, \max}^2$	$E_o^2$ ( $\sigma=0,7R$ )	$E_o^3$
Бетоны, полученные нагнетанием растворной составляющей в крупный заполнитель фракции 20 – 40 мм						
КК <sup>4</sup>	49,03(39,83) <sup>5</sup>	40,35(32,78) <sup>6</sup>	21,7	27,0	26,77	32,28
КМ	44,3(29,99)	36,46(24,68)	20,5	22,81	19,62	21,59
КС	48,79(32,52)	40,16(26,76)	26,63	27,96	18,2	37,11
Бетоны, полученные погружением крупного заполнителя фракции 5 – 20 мм в растворную составляющую						
МКо <sup>4</sup>	51,07(46,85)	42,03(38,56)	36,52	44,96	34,57	43,61
ММо	47,15(30,93)	38,81(25,45)	27,13	32,87	29,37	36,66
МСо	50,87(33,95)	41,87(27,94)	31,12	33,52	30,81	40,4
ССо	51,72(35,99)	42,56(29,62)	22,07	35,61	25,78	40,5
ГрКо	57,83(36,86)	47,59(30,34)	41,94	43,59	36,89	47,83

Примечания: 1 – динамический модуль упругости; 2 – секущий модуль (модуль деформаций); 3 – касательный модуль (определен по соотношению приращений напряжений и деформаций на линейном участке диаграммы); 4 – вторая буква указывает вид мелкого заполнителя (К – крупный; М – мелкий; С - смесь песков К и М в соотношении 50/50; 5 – при коэффициенте кв формуле  $E_d = k \cdot \rho_B \cdot V^2$  равном 0,93, в скобках – расчетное значение начального модуля упругости бетона по формуле  $E_o = 0,823 \cdot E_d$ ; 6 – то же, 0,793.

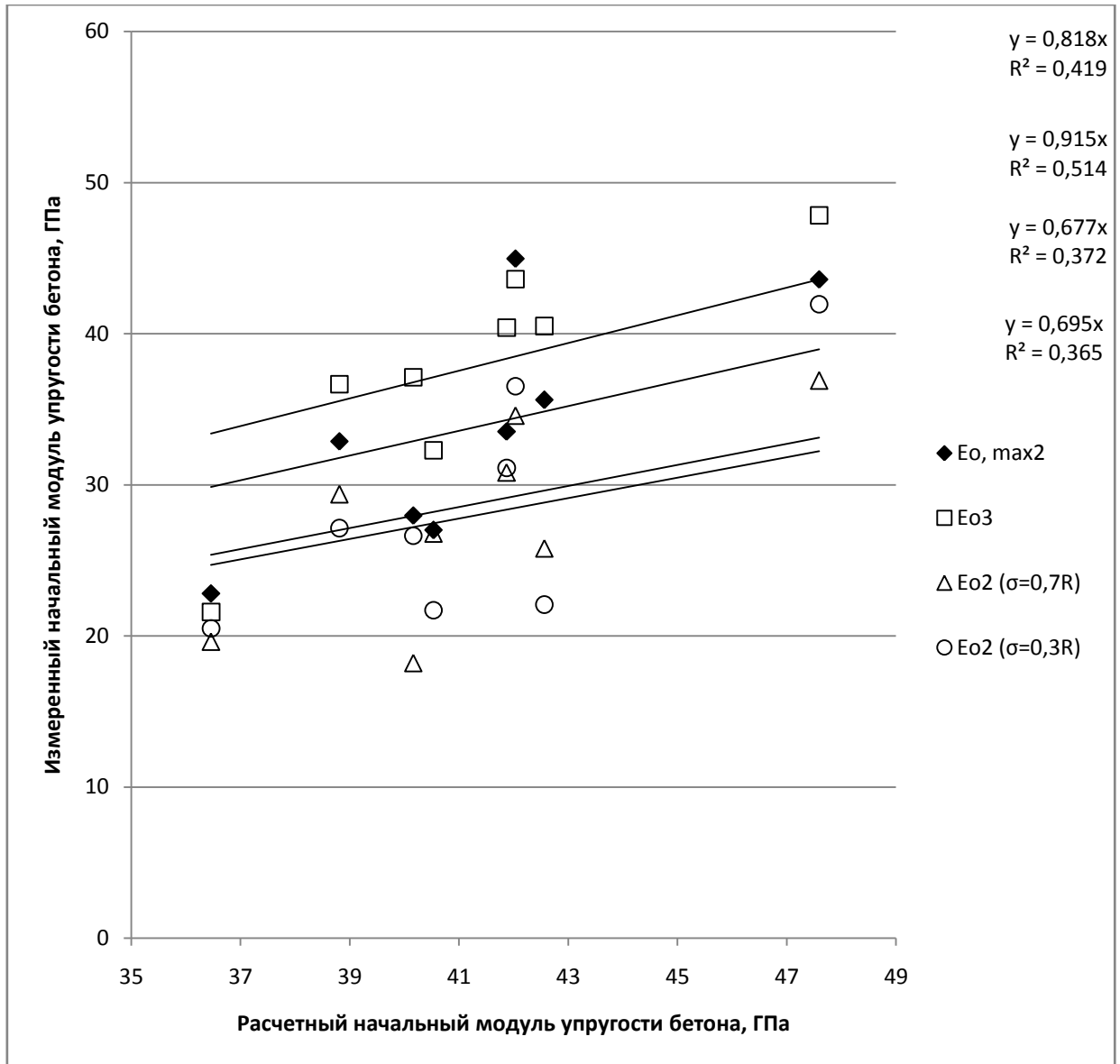


Рисунок 4.9 – Соотношение между расчетными и измеренными значениями начального модуля упругости бетонов с каркасной структурой при коэффициенте  $k$  в формуле  $E_d = k \cdot \rho_B \cdot V^2$  равном 0,93

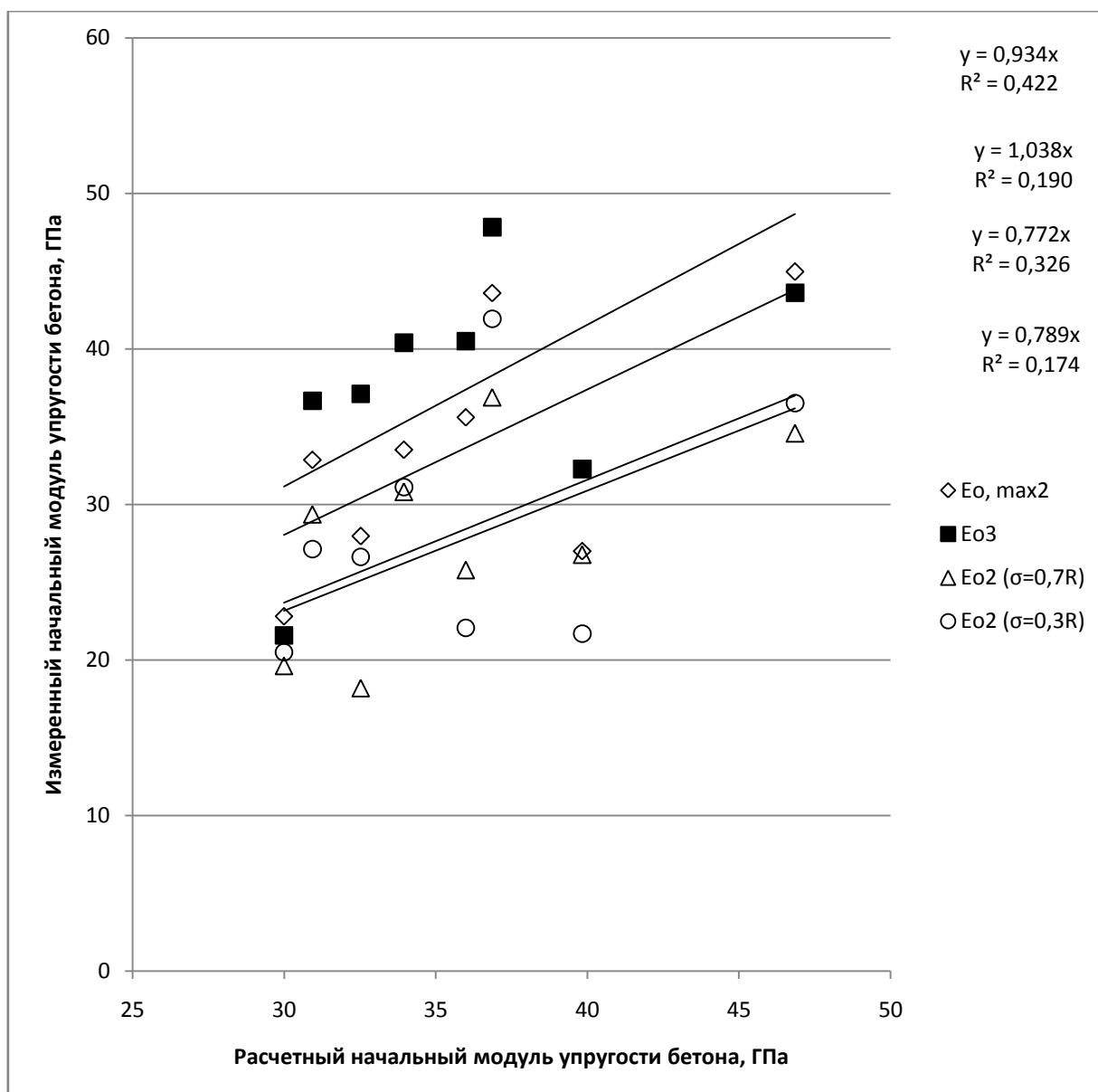


Рисунок 4.10 – Соотношение между расчетными и измеренными значениями начального модуля упругости бетонов с каркасной структурой при коэффициенте  $k$  в формуле  $E_d = k \cdot \rho_B \cdot V^2$  равном 0,793

Заслуживает внимания тот факт, что величины модуля упругости бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) при уровне нагружения 0,3 и 0,7 практически равны.

В таблице 4.5 представлены итоговые значения зависимостей между расчетными и измеренными значениями начального модуля упругости бетона с каркасной структурой.

Таблица 4.5 - Зависимости между расчетными и измеренными значениями начального модуля упругости бетона с каркасной структурой

№	Модуль упругости измеренный по таблице 4.	Значение коэффициента С в зависимости между модулем упругости расчетным при кв формуле $E_d = k \cdot \rho_B \cdot V^2$ и измеренным $E_p = c \cdot E_{и}$	
		0,93	0,793
1	$E_{o, \max}^2$	0,83	0,945
2	$E_o^3$	0,92	1,04
3	$E_o^2 (\sigma=0,7R)$	0,68	0,77
4	$E_o^2 (\sigma=0,3R)$	0,7	0,79

Соотношение между расчетными и измеренными (касательный модуль  $E_o^3$  по таблице 4.4, определен по соотношению приращений напряжений и деформаций на линейном участке диаграммы) значениями модулей упругости при величине коэффициент  $k$  в формуле  $E_d = k \cdot \rho_B \cdot V^2$  равном 0,82 практически равны. В связи с этим можно сформулировать положение о том, что, поскольку лучшее соотношение между модулем упругости, определенным через величину динамического модуля упругости, и измеренным по диаграмме «напряжения-деформации» как касательный модуль, именно эту величину следует принять за начальный модуль упругости бетона с каркасной структурой. Но, поскольку деформации конструкций будут определяться по величине секущего модуля, определенного при соответствующем уровне напряжения, за модуль упругости бетона с каркасной структурой следует принять секущий модуль деформаций, измеренный при уровне нагружения конструкций, т.е. ориентировочно при значении  $\sigma/R \sim 0,7$ . Следует отметить, что значения измеренного начального модуля упругости бетонов с каркасной структурой при уровне нагружения 0.3 и 0,7 различаются менее чем на 5%.

Как известно, прогиб железобетонных изгибаемых элементов  $f$  связан с кривизной  $1/r$  зависимостью [СП 52-101]

$$f = s \cdot L^2 \cdot \left(\frac{1}{r}\right), (4.10)$$

$L$  – пролет изгибаемого элемента;

$s$  – коэффициент, зависящий от расчетной схемы и вида нагрузки.

Кривизна, по п.4.27 [26] при двухзначной эпюре деформации по сечению принимается равной

$$\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_b}{x}. \quad (4.11)$$

Принимая  $x = k \cdot h_0$ , получим

$$\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_b}{k \cdot h_0}, \quad (4.12)$$

$$f = s \cdot L^2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_b}{k \cdot h_0} \right). \quad (4.13)$$

Из представленных на рисунках 4.6, 4.9, 4.10 данных следует, что в диапазоне уровня напряжений до 0,7 от предела кратковременной прочности (ориентировочно при нагружении нормативной нагрузкой) величина деформаций бетона  $\varepsilon_b$  бетона каркасной структуры значительно меньше, чем у СУБ, что, в соответствии с ф.(4.13) означает меньшую величину прогиба.

#### **4.1.2.5 Модуль упругости бетонов с каркасной структурой по модели Хирча в сопоставлении с измеренным по диаграмме «напряжения-деформации»**

В таблице 4.6 представлены значения начального модуля упругости бетона, определенные по модели Хирча, включающей два элемента структуры – растворную составляющую и крупный заполнитель [64,72,125]:

$$E_{c,0} = \frac{2}{\frac{1}{E_{0,M} V_M + E_{0,CA} V_{CA}} + \frac{V_M}{E_{0,M}} + \frac{V_{CA}}{E_{0,CA}}}. \quad (4.14)$$

Значения модуля упругости растворной составляющей принимались по таблице 4.3.

Таблица 4.6 - Сопоставление расчетных по модели Хирча и измеренных значений начального модуля упругости бетонов с каркасной структурой

№	Модуль упругости растворной составляющей, ГПа	Расчетные значения модуля упругости бетонов по модели Хирча при концентрации крупного заполнителя		Измеренные значения модуля упругости бетонов с каркасной структурой, ГПа по таблице 4.4	
		0,62	0,7	$E_o^2$ ( $\sigma=0,3R$ )	$E_{o, \max}^2$
1	20,9	28,48 <sup>1</sup>	31,65	20,5	22,81
2	28,1	32,87 <sup>1</sup>	34,69	21,7	27,0
3	22,82	<b>29,72<sup>1</sup></b>	32,53	26,63	<b>27,96</b>
4	32,88	<b>35,97</b>	<b>36,38</b>	<b>36,52</b>	44,96
5	21,7	30,64	<b>32,02</b>	27,13	<b>32,87</b>
6	23,83	<b>31,78</b>	<b>32,98</b>	<b>31,12</b>	<b>33,52</b>
7	25,26	32,51	<b>33,58</b>	22,07	<b>35,61</b>
8	32,88	49,95	52,69	41,94	43,59

Примечание: 1 – концентрация крупного заполнителя 0,52; выделенные значения различаются менее, чем на 10%

Возможное различие расчетных и измеренных начальных модулей упругости бетонов с каркасной структурой, полученных нагнетанием растворной составляющей в крупный заполнитель может быть связано с наличием пустот (рисунок 4.11) вследствие неполного заполнения растворной составляющей пространства между зернами заполнителя при бетонировании, которые оказывают влияние на деформационные свойства бетона, но влияние которых не учитывает ф.(4.14).



Рисунок 4.11 – Структура бетона, полученного нагнетанием растворной составляющей в крупный заполнитель

#### **4.1.2.6 Анализ модуля упругости бетонов с каркасной структурой**

На рисунке 4.12 представлена зависимость начального модуля упругости бетонов от предела прочности бетона.

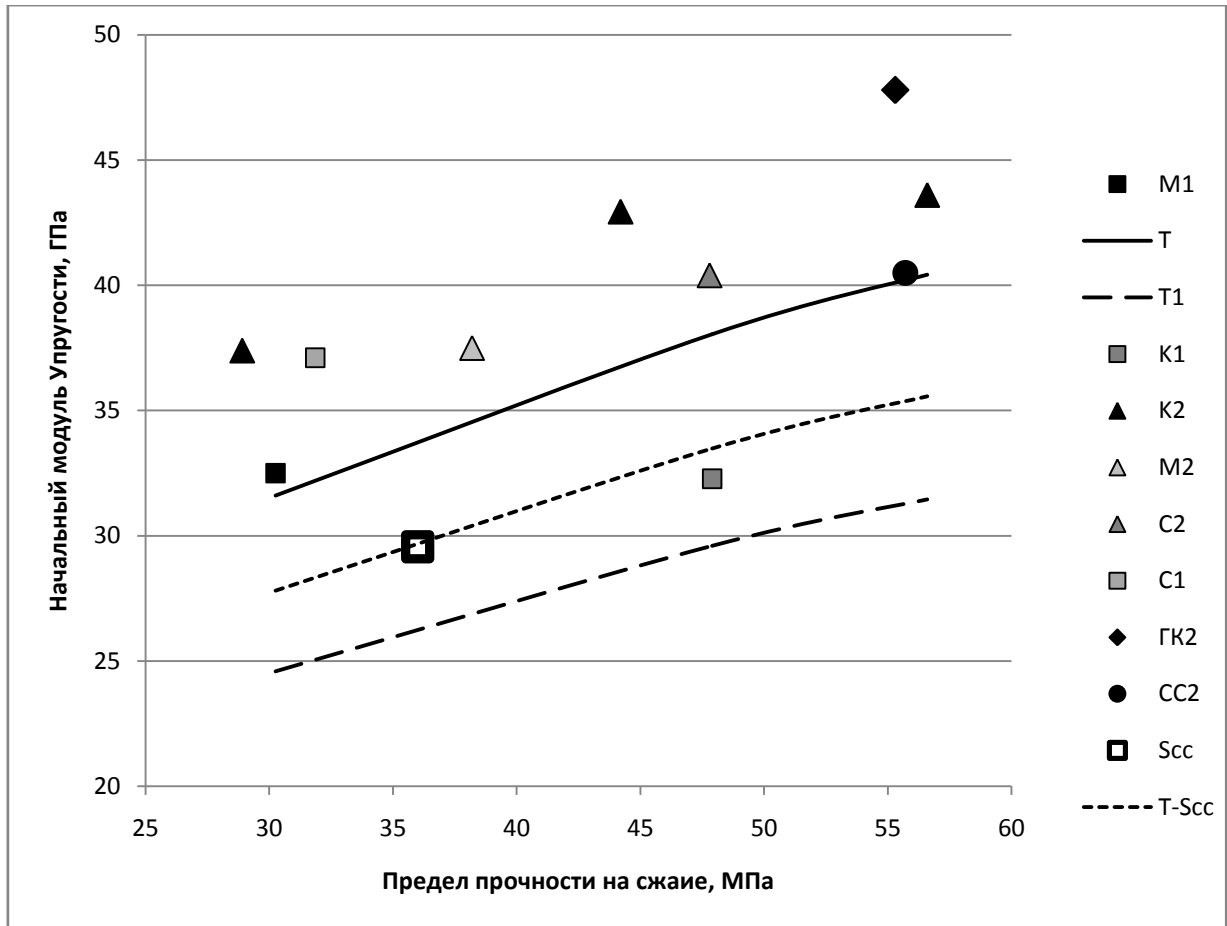


Рисунок 4.12 – Зависимость начального модуля упругости бетона  $E_0$  от предела цилиндрической прочности

$$T, T1, T-S_{cc} - \text{ по формуле } E_0 = k \frac{0,05R_{pr}^2 + 57,2R_{pr} + 217}{32,8 + R_{pr}} [64,72,125]$$

соответственно при  $k = 1$  (без учета влияния СП на модуль упругости),  $k = 0,778$  (выраженное негативное влияние СП на модуль упругости),  $k = 0,88$  (реальное значение для самоуплотняющегося бетона по традиционной технологии)

Из представленных на рисунке 4.12 данных следует, что все бетоны, за исключением состава (K1), имеют более высокий модуль упругости относительно самоуплотняющегося бетона при равной прочности (относительно линии T- $S_{cc}$ ). Это превышение достигает максимального значения 1,56 – 1,59 в составах (K2), (CC2), (GK2). При анализе влияния концентрации крупного заполнителя по модели, рассмотренной в разделе 4.1. было получено возможное повышение начального модуля упругости бетона с



каркасной структурой на 44% относительно СУБ, что неплохо согласуется с экспериментальными значениями.

В составе на гранитном щебне основной «вклад» в повышение модуля упругости бетона вносит высокий модуль упругости крупного заполнителя, в составах К2 и СС2 это связано с максимальной концентрацией крупного заполнителя за счет рациональной гранулометрии.

#### 4.1.2.7 Влияние вида крупного заполнителя на модуль упругости бетона с фиксированной структурой

Влияние модуля упругости заполнителя на модуль упругости бетона наглядно демонстрируют данные на рисунке 4.13.

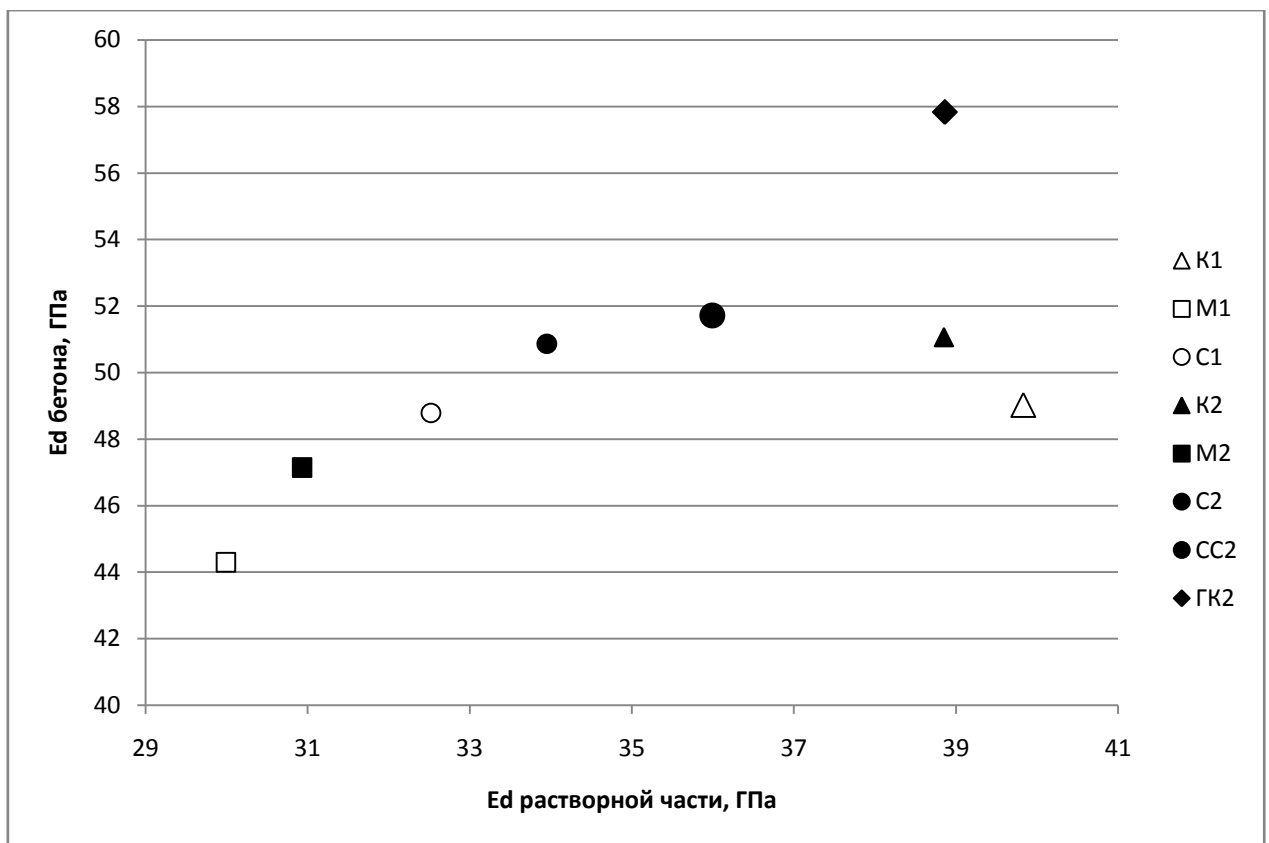


Рисунок 4.13 – Соотношение между динамическим модулем упругости растворной составляющей и бетона

Очевидно, что бетон на гранитном заполнителе с модулем упругости 70 ГПа имеет динамический модуль упругости на 14% выше в сравнении с бетоном на песчанике с модулем упругости 45 ГПа. Согласно [64,72,125], влияние модуля упругости крупного заполнителя на модуль упругости бетона может быть учтено коэффициентом

$$k_A = 0,456 \frac{E_a}{67} + 0,544. \quad (4.15)$$

Из ф.(4.15) следует, что модуль упругости бетона на граните ( $E_a = 70$  ГПа) может превышать модуль упругости бетона на песчанике ( $E_a = 40$  ГПа) в 1,2 раза, что достаточно близко к значению 1,14. Наличие экстремума у зависимости модуля упругости бетона на песчанике вероятно связано с влиянием контактной зоны, которая у некоторых составов ослаблена [88]. Максимальным значением модуля упругости на песчанике обладает бетон СС2, полученный на заполнителе с минимальной пустотностью и обладающий, как было показано в главе 3, минимальным значением показателя удельного расхода цемента Ц/Р менее 4 кг/(м<sup>3</sup>·МПа) [88].

#### **4.2 Относительная деформация, соответствующая пределу кратковременной прочности**

На рисунке 4.14 представлена зависимость относительной деформации  $\epsilon_R$  при напряжении, равном пределу прочности, от соотношения  $R_c/E_0$ . Из представленных на рисунке 4.14 данных следует, что бетоны каркасной структуры способны к развитию неупругих деформаций, что приводит к значительному (до 45%) росту величины  $\epsilon_R$ , которая практически у всех составов выше в сравнении со среднестатистическими значениями, т.е. бетоны каркасной структуры не могут быть отнесены к хрупким. Способность к развитию неупругих деформаций предопределяет пониженное значение коэффициента упругости, что подтверждает представленная на

рисунке 4.15 зависимость коэффициента упругости бетона при напряжении, равном пределу прочности, от соотношения  $R_c/E_0$ .

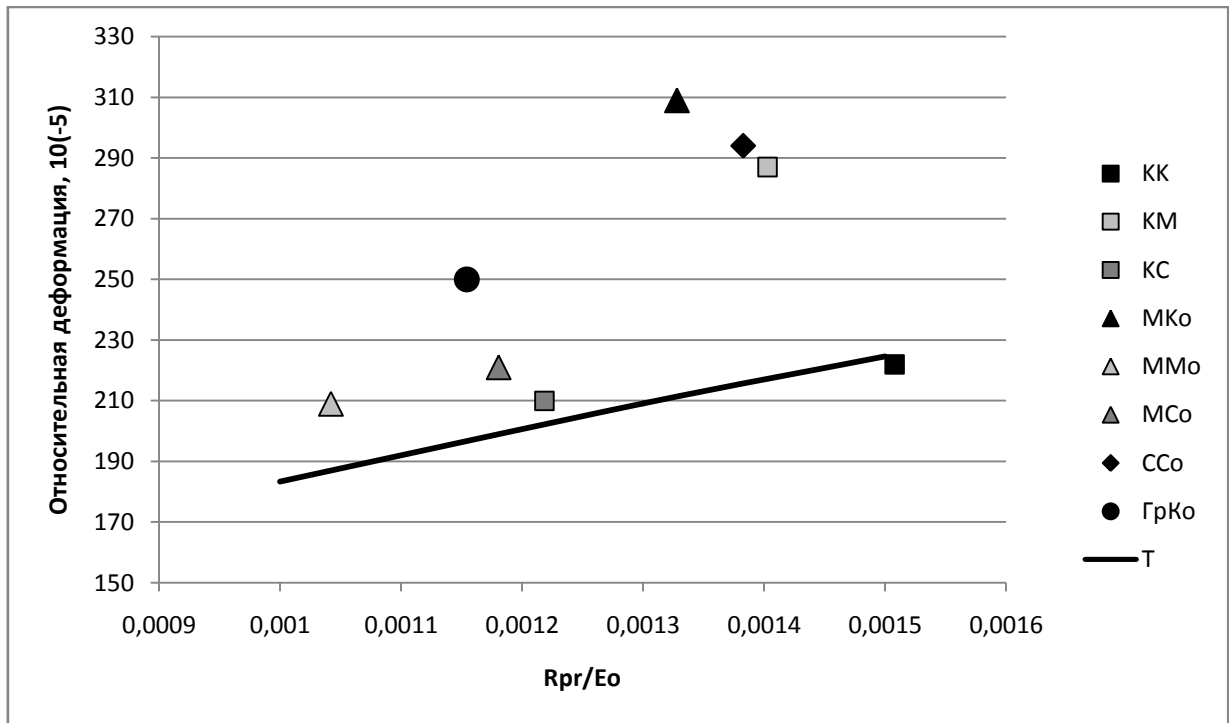


Рисунок 4.14 – Зависимость относительной деформации при напряжении, равном пределу прочности, от соотношения  $R_c/E_0$

$$T - \text{ по формуле } \varepsilon_R = 0,058 \cdot \left(\frac{R_c}{E_0}\right)^{0,5} [64,72,125]$$

Поскольку повышение начального модуля упругости приводит к росту жесткости сечений, влияет на момент трещинообразования, характеристики приведенного сечения, а увеличение величины  $\varepsilon_R$  сопровождается возможным ростом предельных напряжений в арматуре сжатой зоны сечений, особенности диаграммы «напряжения – деформации» бетонов с каркасной структурой обуславливают особенности напряженно-деформированного состояния сечений [1,53,54,105]. Этот вопрос заслуживает специального исследования.

Бетоны, полученные из высокотехнологичных самоуплотняющихся бетонных смесей на основе современных СП наряду с рядом преимуществ технологического характера, с точки зрения конструкционных свойств, обладают рядом недостатков обусловленных повышенной концентрацией

растворной составляющей, что приводит к понижению начального модуля упругости, повышению усадки и ползучести. Для улучшения деформационных показателей качества бетона необходимо минимизировать объем растворной составляющей, который в идеале должен быть равен объему пустот крупного заполнителя. Такие бетоны каркасной структуры получают по отдельной технологии нагнетанием маловязкой растворной составляющей в пустоты наброски крупного заполнителя, зафиксированной в объеме, либо посредством погружения в маловязкую растворную составляющую крупного заполнителя. Диаграмма «напряжения – деформации» бетонов каркасной структуры имеет S-образный характер, а начальный модуль упругости может в 1,59 раза превышать модуль упругости самоуплотняющихся бетонов при равной прочности.

### **4.3 Коэффициент упругости**

На рисунке 4.15 представлена зависимость коэффициента упругости бетона при величине напряжения, равного пределу кратковременной прочности, от соотношения прочности и модуля упругости  $R_c/E_0$ .

Очевидно, что бетоны каркасной структуры, несмотря на высокое значение начального модуля упругости и практически упругую работу до высокого уровня нагружения, вплоть до 0,7, характеризуются довольно низким значением коэффициента упругости, что предполагает «спокойный» характер разрушения. Это связано, вероятно, с постепенным выключением из работы контактов между зернами крупного заполнителя при высоких уровнях напряжений.

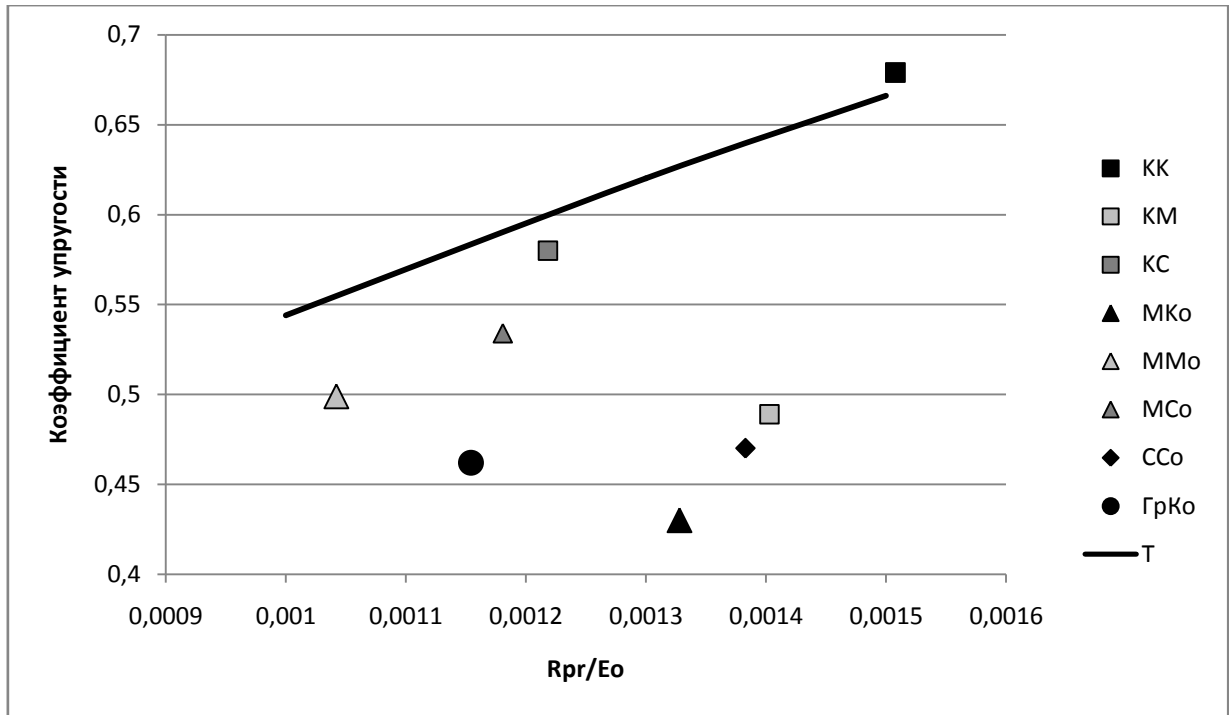


Рисунок 4.15 – Зависимость коэффициента упругости бетона при напряжении, равном пределу прочности, от соотношения  $R_{pr}/E_0$

$$T - \text{ по формуле } \lambda_R = 17,2 \cdot \left(\frac{R_c}{E_0}\right)^{0,5} \quad [64,72,125]$$

Таким образом, поскольку бетоны каркасной структуры характеризуются пониженными значениями коэффициента Пуассона и коэффициента упругости, повышенным значением деформации при разрушении, это можно рассматривать как благоприятный фактор для работы железобетонных конструкций, изготовленных из бетонов каркасной структуры.

#### 4.4 Коэффициент ползучести

Как известно, бетон можно рассматривать как упруговязкопластичное тело, поведение которого при «мгновенном» загрузении в принципе подчиняется обобщенному закону Гука, но у которого при длительном действии нагрузки проявляются реологические свойства, в частности, деформации ползучести [2,3,11,15,16,-18,24-26,52,56,64,99-104,120-123,125-127 и др.]. Во всех теориях ползучести бетона одним из ключевых моментов

можно рассматривать определение величины, количественно характеризующей деформации ползучести, т.е. коэффициента ползучести или меры ползучести, в некоторый момент времени (28 или 180 суток, в момент загрузки, в момент «стабилизации» и т.п.). Указанные величины определяются рецептурными факторами, в частности, зависят от вида цемента, свойств заполнителя, величины В/Ц, расхода воды, предела прочности бетона и др. [2,3,11,15,16,-18,24-26,52,56,64,99-104,120-123,125-127 и др.].

Нормирование ползучести в СП 63.13330 устанавливает зависимость между коэффициентом ползучести бетона  $\phi$  (соотношение деформаций ползучести и упругих деформаций при одной и той же величине приложенного напряжения), классом бетона по прочности на сжатие  $B$  и относительной влажностью среды. В EN 196-1-1 нормирование предельного значения коэффициента ползучести бетона предусмотрено в зависимости от влажности среды, класса бетона по прочности на сжатие, сроков и уровня загрузки конструкции. В СНБ 5.03.01, помимо указанных факторов, ползучесть бетона нормируется также в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости. Таким образом, только в СНБ 5.03.01 учитывается влияние на ползучесть бетона такого важного фактора, как технологические свойства бетонной смеси, причем различие коэффициента ползучести бетонов из высокоподвижных и жестких смесей составляет до  $1,2/0,7 = 1,7$  раза. Однако в СНБ 5.03.01 нет разделения этого результата на влияние макроструктуры и возможное влияние СП.

Многие теории ползучести, как и основные закономерности, устанавливающие зависимость параметров простой линейной ползучести от состава и предела прочности бетона, были предложены, когда применение СП в технологии бетона не носило массовый характер [125]. Широкое применение СП в последние десятилетия, появление новых групп добавок, в т.ч. на основе эфиров поликарбоксилатов, предопределяют актуальность исследований их влияния на свойства бетона, в т.ч. на ползучесть. Согласно

[125], СП на основе эфиров поликарбоксилатов могут изменять коэффициент ползучести цементного камня до 4 раз в зависимости от вида цемента. По данным [71,86] между ползучестью цементного камня, бетона, горных пород и их модулями упругости существует инвариантная к виду материала зависимость, согласно которой, вследствие введения в состав бетонной смеси СП, вызывающего возможное изменение модуля упругости бетона [71, 86] в пределах от 0,76 до 1,1 относительно эталонного состава без СП, возможно изменение меры ползучести бетона в пределах от 1,64 до 0,84 относительно эталонного состава. Причем в [86] высказано предположение о том, что изменение ползучести цементного камня с СП обусловлено не только изменением пористости цементного камня, но и другими факторами. Наряду с этими результатами имеются данные о том, что высокопрочные, в т.ч. самоуплотняющиеся бетоны, характеризуются коэффициентом ползучести, не отличающимся принципиально от его значений у бетонов, полученных из смесей с умеренной подвижностью [44, 134]. Таким образом, влияние СП и макроструктуры бетона на коэффициент ползучести может проявляться по-разному в зависимости от используемых материалов.

Учитывая то обстоятельство, что в России имеется порядка 60 цементных заводов, выпускающих цементы различного химико-минералогического состава и тонкости помола, а также огромное количество появившихся в последние 15 – 20 лет СП на различной химической основе, становится очевидным, что, с учетом продолжительности и трудоемкости экспериментальных исследований параметров ползучести бетона в сочетании с многообразием факторов, влияющих на его ползучесть, создание модели, позволяющей оценивать влияние различных факторов на коэффициент ползучести бетона, представляет актуальную задачу. Одним из направлений в этой области может быть создание модели, позволяющей выявить закономерности изменения коэффициента ползучести бетона от концентрации (объемов), модулей упругости и коэффициентов ползучести цементного камня, мелкого и крупного заполнителей, контактной зоны

«цементный камень – заполнитель» с учетом возможного влияния СП на деформационные свойства цементного камня и контактной зоны. Такие модели иногда называют «структурными».

#### 4.4.1 Моделирование влияния на коэффициент ползучести бетона рецептурных факторов

Согласно [94] известная модель Хирча для определения модуля упругости бетона как двухкомпонентной системы «матрица (цементный камень) – заполнитель» может быть, после некоторых преобразований, использована для определения модуля деформаций при длительном нагружении бетона. При этом число элементов (компонентов) структуры бетона в модели может быть практически любым, что выгодно отличает рассматриваемую модель от известных [125] аналогов. Реализация указанных положений позволяет предложить для записи зависимости модуля деформаций бетона при длительном нагружении  $E_{C,\tau}$  формулу вида:

$$E_{C,\tau} = \frac{1}{\frac{E_{0,CS}}{1+\varphi_{CS}}V_{SC} + \frac{E_{0,CA}}{1+\varphi_{CA}}V_A + \frac{E_{0,FA}}{1+\varphi_{FA}}V_{FA} + \frac{E_{0,TZ}}{1+\varphi_{TZ}}V_{TZ}} + \frac{2}{\frac{V_{CS}(1+\varphi_{CS})}{E_{0,CS}} + \frac{V_{CA}(1+\varphi_{CA})}{E_{0,CA}} + \frac{V_{FA}(1+\varphi_{FA})}{E_{FA}} + \frac{V_{TZ}(1+\varphi_{TZ})}{E_{0,TZ}}}, \quad (4.16)$$

где:

$E_{0,CS}$ ;  $E_{0,CA}$ ;  $E_{0,FA}$ ;  $E_{0,TZ}$  – соответственно начальный модуль упругости цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне;

$V_{CS}$ ;  $V_{CA}$ ;  $V_{FA}$ ;  $V_{TZ}$  – соответственно относительный объем цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне;

$\varphi_{CS}$ ;  $\varphi_{CA}$ ;  $\varphi_{FA}$ ;  $\varphi_{TZ}$  – соответственно коэффициент ползучести цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне.



Поскольку при  $\varphi_i = 0$  ф.(1) трансформируется в зависимость для определения начального модуля упругости  $E_{C,0}$  бетона как четырехкомпонентной структуры вида:

$$E_{C,0} = \frac{2}{\frac{1}{E_{0,CS}V_{CS} + E_{0,CA}V_{CA} + E_{FA}V_{FA} + E_{0,TZ}V_{TZ}} + \frac{V_C}{E_{0,C}} + \frac{V_{CA}}{E_{0,CA}} + \frac{V_{FA}}{E_{FA}} + \frac{V_{TZ}}{E_{0,TZ}}}}, \quad (4.17)$$

а коэффициент ползучести бетона  $\varphi_C$  связан с модулем деформаций при длительном нагружении  $E_{C,\tau}$  и начальным модулем упругости бетона  $E_0$  зависимостью

$$\varphi_C = \frac{E_0}{E_{C,\tau}} - 1, \quad (4.18)$$

то возможно, используя ф. (4.16-4.18), оценить влияние на коэффициент ползучести бетона его макроструктуры, под которой понимается соотношение относительных объемов цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне. При этом, поскольку ф.(4.16, 4.17) учитывают деформационные свойства элементов структуры при кратковременном (начальный модуль упругости цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне) и длительном (коэффициент ползучести цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне) действии нагрузки, ф.(4.16-4.18) можно рассматривать как структурную модель, описывающую изменение коэффициента ползучести бетона в зависимости от концентрации и свойств его составляющих.

При реализации численного эксперимента в рамках данной работы [89] значения входящих в ф.(4.16, 4.17) величин принимались:

- начальный модуль упругости цементного камня  $E_{0,CS}$  от 15000 до 28000 МПа, что примерно соответствует пределу прочности цементного камня от 45 до 125 МПа;

- начальный модуль упругости крупного заполнителя  $E_{0,CA}$  от 40000 (некоторые песчаники) до 120000 МПа (базальт);

- начальный модуль упругости мелкого заполнителя  $E_{0,FA}$  от 60000 до 70000 МПа (кварцевые и полевошпатовые пески);
- начальный модуль упругости контактной зоны  $E_{0,TZ}$  от 0,9 до 0,5 величины начального модуля упругости цементного камня  $E_{0,CS}$ ;
- относительный объем цементного камня в бетоне  $V_{CS}$  от 0,2 до 0,4, причем вместе с объемом контактной зоны  $V_{TZ}$  относительный объем цементного камня  $V_{CS}$  принимался равным 0,6 от объема растворной составляющей  $V_{CS} + V_{FA} + V_{TZ}$ ;
- относительный объем крупного заполнителя в бетоне от 0,35, что характерно для бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей, до 0,65, что характерно для бетонов с каркасной структурой [88];
- относительный объем контактной зоны  $V_{TZ}$  в бетоне 0,05 объема цементного камня  $V_{CS}$ .

Величины коэффициентов ползучести цементного камня  $\varphi_{CS}$ , крупного заполнителя  $\varphi_{CA}$ , мелкого заполнителя  $\varphi_{FA}$  и контактной зоны  $\varphi_{TZ}$  в бетоне принимались в зависимости от соответствующих величин начальных модулей упругости указанных компонентов структуры  $E_{0,CS}$ ;  $E_{0,CA}$ ;  $E_{0,FA}$ ;  $E_{0,TZ}$  по формуле [71]

$$\varphi_i \approx \frac{8 \cdot 10^3}{E_{0,i}^{0,8}}. \quad (4.19)$$

Поскольку по данным [44-46,59,67,71,92,93,115,118,134] СП может оказывать, в т.ч., значительное влияние на коэффициент ползучести цементного камня, например, по данным [67] – до 5 раз, по [71,82,86] – до 3 раз, для моделирования этого эффекта при реализации численного эксперимента в ряде случаев величины коэффициента ползучести цементного камня  $\varphi_{CS}$  и коэффициента ползучести контактной зоны  $\varphi_{TZ}$  принимались с коэффициентами 2 и 3 относительно значений, полученных по ф.(4.19).

План эксперимента в натуральных переменных и результаты значений начального модуля упругости бетона представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Результаты численного эксперимента по выявлению зависимости коэффициента ползучести бетона

№	Факторы в натуральных переменных					Коэффициент ползучести бетона $\varphi$ ,
	x1, $V_{TZ}$	x2, $E_{0,CS}$	x3, $\phi_{CS}$	x4, $E_{0,CA}$	x5, $V_{CA}$	
1	0,06	35000	3,7	80000	0,66	1,68
2	0,04	15000	7,3	80000	0,66	3,11
3	0,04	35000	1,85	40000	0,34	1,48
4	0,06	15000	3,65	40000	0,34	2,67
5	0,04	35000	3,70	80000	0,66	1,53
6	0,06	15000	3,65	80000	0,66	2,17
7	0,06	35000	3,7	40000	0,34	2,12
8	0,04	15000	7,3	40000	0,34	3,81
9	0,04	35000	3,7	80000	0,34	1,94
10	0,06	15000	7,3	40000	0,34	3,9
11	0,06	35000	1,85	40000	0,66	1,65
12	0,04	15000	3,65	40000	0,66	2,16
13	0,04	35000	3,7	40000	0,66	1,87
14	0,06	15000	3,65	40000	0,66	2,94
15	0,06	35000	3,7	80000	0,34	1,98
16	0,04	15000	3,65	80000	0,34	2,56
17	0,06	25000	3,65	60000	0,5	2
18	0,04	25000	3,65	60000	0,5	1,95
19	0,05	35000	2,78	60000	0,5	1,64
20	0,05	15000	5,47	60000	0,5	2,98
21	0,05	25000	4,85	60000	0,5	2,27
22	0,05	25000	2,45	60000	0,5	1,68
23	0,05	25000	3,64	80000	0,5	1,95
24	0,05	25000	3,64	40000	0,5	2,09
25	0,05	25000	3,64	60000	0,66	1,76
26	0,05	25000	3,64	60000	0,34	2,17
27	0,05	25000	3,64	60000	0,5	1,98

В результате реализации численного эксперимента получено уравнение регрессии в кодированных переменных в виде:

$$\varphi_b = 1,97 - 0,58 \cdot X_2 + 0,32 \cdot X_3 - 0,21 \cdot X_5 + 0,34 \cdot X_2^2 - 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,11 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,06 \cdot X_3 \cdot X_5 \quad (4.20)$$

из которого следует, что значимыми факторами, определяющими величину коэффициента ползучести бетона из рассмотренных, являются:

- модуль упругости цементного камня, что связано с тем, что в модели заложена зависимость коэффициента ползучести цементного камня от его модуля упругости в соответствии с ф. (4.19);

- влияние СП на коэффициент ползучести цементного камня;

- концентрация крупного заполнителя, т.е., фактически – концентрация цементного камня.

Влияние упругих свойств крупного заполнителя и концентрации контактной зоны менее значительно.

Таким образом, из анализа предложенной модели следует, что коэффициент ползучести бетона в основном зависит от коэффициента ползучести цементного камня с учетом влияния СП на его ползучесть и от количества цементного камня, что вполне логично.

В результате реализации численного эксперимента с использованием предложенной модели ф.(4.16-4.18) получены зависимости коэффициента ползучести бетона  $\varphi_b$  от его модуля упругости, которые в общем виде могут быть представлены в виде формулы

$$\varphi_b = \frac{k}{E_0^x}, \quad (4.21)$$

в которой значения параметров  $k$  и  $x$  меняются в зависимости от принятых начальных условий при расчете по ф. (4.16-4.18) и представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Значения параметров  $k$  и  $x$  в ф.(4.21)

№	Модуль упругости контактной зоны	Наличие СП	Параметры	
			$k$	$x$
1	$E_{0,TZ}=0,7E_{0,CS}$	Нет	2139	0,669
2	$E_{0,TZ}=0,5E_{0,CS}$	Нет	1930	0,658
3	$E_{0,TZ}=0,7E_{0,CS}$	Да	1443	0,575

Анализ представленных в таблице 4.8 данных показывает, что модуль упругости контактной зоны между цементным камнем и заполнителем оказывает незначительное влияние на зависимость между коэффициентом ползучести бетона и его модулем упругости, поскольку значения параметров  $k$  и  $x$  в ф.(4.21) практически не отличаются, тогда как наличие СП в значительной степени влияет на указанную зависимость. Это влияние может быть учтено введением в ф. (4.21) соответствующих коэффициентов:

$$\varphi_b = \frac{k_{sp} \cdot k_{tz}}{E_0^{k_{sp} \cdot x}}, \quad (4.22)$$

где  $k_{sp}$  и  $k_{sp1}$  – коэффициенты, учитывающие влияние СП на ползучесть цементного камня (бетона), соответственно равные 0,67 и 0,85.

Значения коэффициента ползучести бетона, полученные по ф.(4.21), сопоставлялись с некоторыми экспериментальными данными, нормативными значениями и расчетными по ф. (4.19) значениями (рисунок 4.16).

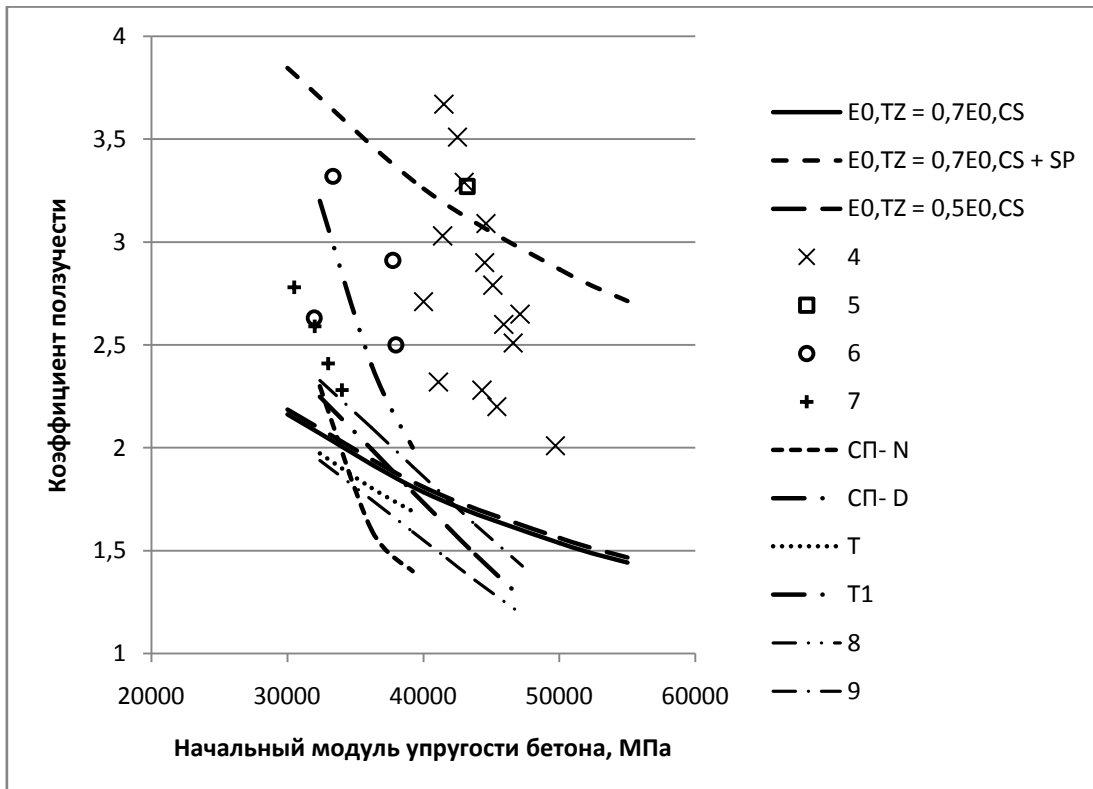


Рисунок 4.16 – Зависимость коэффициента ползучести бетона от начального модуля упругости

$E_{0,TZ}=0,7E_{0,CS}$ ;  $E_{0,TZ}=0,7E_{0,CS} + SP$ ;  $E_{0,TZ}=0,5E_{0,CS}$  – по ф.(4.5); 4-7 по [71,82,92,93]; СП – N, СП – D – по СП 63.13330 соответственно для нормальных и сухих условий выдерживания; T – по ф.(4.19); T1 – формуле

$\varphi = \frac{0,00322 \cdot E_0}{R^z}$  ( $z = 1,04$ ), полученной из формулы Вёльми (Voellmy)  $C_0 = \frac{0,0025}{R}$  [64,125], 8,9 – по формуле  $\varphi = C_0 \cdot E_0$ , где  $C_0$  определено по формуле Щербакова Е.Н.  $C_{28}^* = (0,13 + \frac{1545}{R}) \frac{10^{-6} B}{100}$  [64,125], 9 при расходе воды 150 и 200 л/м<sup>3</sup>

соответственно

Из представленных на рисунке 4.16 данных очевидно:

- закономерности изменения коэффициента ползучести бетона по ф.(4.4) и по ф.(4.21) подобны, т.е. ф.(4.16-4.18) позволяют получать данные, аналогичные значениям, полученным по ф.(4.19), но при этом учитывают влияние СП на ползучесть бетона, что очень важно для практического применения результатов;

- значения коэффициента ползучести бетона, полученные по формуле  $\varphi = \frac{0,00322 \cdot E_0}{R^z}$ , в диапазоне изменения модуля упругости бетона от 30000 до 42000 МПа (классы бетона по прочности на сжатие В25 – В80), неплохо коррелируют с результатами, полученными по ф. (4.16-4.18) без учета влияния СП на ползучесть бетона. Это вполне закономерно, поскольку эмпирическая формула  $\varphi = \frac{0,00322 \cdot E_0}{R^z}$ , устанавливающая связь между коэффициентом ползучести бетона и его пределом прочности, была получена в результате статистической обработки огромного массива данных, не включающего бетоны с СП;

- нормируемые значения коэффициента ползучести бетона по СП 63.13330 несколько отличаются от значений, полученных по ф. (4.6-4.21), формулам Щербакова Е.Н. и Вёльми (Voellmy);

- экспериментальные значения [82,92,93] и рекомендуемые в [56] значения коэффициента ползучести бетона с СП не противоречат результатам, полученным по ф.(4.16-4.18);

- модуль упругости контактной зоны между цементным камнем и заполнителем практически не оказывает влияния на зависимость между коэффициентом ползучести бетона и его модулем упругости;

- при повышении коэффициента ползучести цементного камня и контактной зоны в 2 раза за счет введения в состав бетона СП коэффициент ползучести бетона возрастает почти вдвое.

Таким образом, можно утверждать, что ф.(4.16-4.18) позволяют выявить закономерности изменения коэффициента ползучести бетона от параметров его макроструктуры (относительный объем цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне), деформационных свойств элементов структуры при кратковременном (начальный модуль упругости цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне) и длительном (коэффициент ползучести цементного камня, крупного заполнителя, мелкого заполнителя и контактной зоны в бетоне) действии нагрузки. Некоторое несоответствие расчетных значений по ф.(4.16-4.18) с нормируемыми по СП 63.13330 может быть связано, во-первых, с тем фактом, что в СП 63.13330 никак не учтено возможное влияние СП на ползучесть бетона. Во-вторых, ф.(4.16-4.18) на данном этапе исследования содержат не достаточно полную и обоснованную информацию по входящим в них параметрам (объем и модуль упругости контактной зоны) и предназначены в основном для выявления тенденций изменения коэффициента ползучести бетона от рецептурных факторов, а не для получения численных значений параметров ползучести для конкретных бетонов. Кроме того, нормируемые в СП 63.13330 значения коэффициента ползучести бетона не совсем согласуются со значениями, полученными по формулам Щербакова Е.Н. и Вельми (Voelmy), которые являются результатом анализа огромного количества экспериментальных данных, что вызывает сомнение относительно целесообразности использования нормируемых в СП 63.13330 значений в качестве эталона.

Для выявления закономерностей влияния на коэффициент ползучести бетона таких факторов, как концентрация крупного заполнителя в бетоне  $\varphi_{CA}$ , модуль упругости крупного заполнителя в бетоне  $E_{0,CA}$ , модуль упругости

цементного камня  $E_{0,CS}$  и контактной зоны  $E_{0,TZ}$ , а также возможного влияния СП с применением ф.(4.16-4.18) реализован численный эксперимент, некоторые результаты которого представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Влияние СП, концентрации и модуля упругости крупного заполнителя на коэффициент ползучести бетона

№	Модуль упругости крупного заполнителя, ГПа	СП	Коэффициент ползучести бетона при модуле упругости цементного камня			
			15 ГПа		28 ГПа	
			Концентрация крупного заполнителя			
			0,35	0,65	0,35	0,65
1	40	Нет	$\frac{2,46 (100)^2}{100^1}$	$\frac{2,15 (87)^2}{100^1}$	$\frac{1,74 (100)^2}{100^1}$	$\frac{1,71 (98)^2}{100^1}$
		Есть	$\frac{4,16 (100)^2}{169^1}$	$\frac{3,21 (77)^2}{149^1}$	$\frac{2,53 (100)^2}{145^1}$	$\frac{2,14 (85)^2}{125^1}$
2	70	Нет	$\frac{2,44 (100)^2}{100^1}$	$\frac{2,09 (86)^2}{100^1}$	$\frac{1,58 (100)^2}{100^1}$	$\frac{1,38 (87)^2}{100^1}$
		Есть	$\frac{4,42 (100)^2}{181^1}$	$\frac{3,46 (78)^2}{166^1}$	$\frac{2,48 (100)^2}{157^1}$	$\frac{1,96 (79)^2}{142^1}$

Примечания: 1 – в знаменателе – в % от значения для состава, не содержащего СП; 2 – в скобках – в % от значения для состава с концентрацией крупного заполнителя 0,35

Из представленных в таблице 4.9 результатов следует:

- при повышении модуля упругости крупного заполнителя от 40 до 70 ГПа, вызывающем повышение модуля упругости бетона до 42% (таблица 4.10), снижение коэффициента ползучести бетона не превышает 15%, причем в случае применения СП возможно даже повышение коэффициента ползучести до 6%, хотя, в соответствии с ф.(4.21), в этом случае снижение коэффициента ползучести бетона возможно до 55%;



- при повышении концентрации крупного заполнителя от значения 0,35, характерного для самоуплотняющихся бетонов, до значения 0,65, характерного для бетонов с каркасной структурой, снижение коэффициента ползучести бетона составляет от 2% до 23%, т.е. изменяется не очень значительно. Этот вывод имеет важное практическое значение, поскольку означает, что в случае применения СП, не оказывающих существенного влияния на ползучесть цементного камня, ползучесть самоуплотняющихся бетонов будет незначительно отличаться от ползучести традиционных бетонов из умеренно-подвижных и жестких смесей с вибрационным уплотнением, что отмечено, например, в [44,46,134];

- при повышении коэффициента ползучести цементного камня в два раза вследствие применения СП повышение коэффициента ползучести бетона составляет от 25 до 81%, причем в большей степени рост коэффициента ползучести имеет место в структурах с низким модулем упругости цементного камня, т.е. в бетонах низких и средних классов. Повышение коэффициента ползучести цементного камня в три раза приводит к росту коэффициента ползучести бетона до 160% относительно бетона без СП. В связи с вышеизложенным для ограничения ползучести бетонов целесообразно подбирать СП, оказывающие минимальное влияние на ползучесть цементного камня. Особенно эффективным для снижения ползучести бетона может быть сочетание СП с некоторыми минеральными модификаторами [44,46,71,82].

На рисунке 4.17 представлены результаты численного эксперимента в виде зависимости коэффициента ползучести бетона от его модуля упругости. Зависимости описываются формулой вида

$$\varphi_b = \frac{a}{E_0^x}, \quad (4.23)$$

значения величин  $a$ ,  $x$  в которой представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Значения коэффициентов  $a$ , хв ф.(4.23)

№	Коэффициент, учитывающий влияние СП на ползучесть цементного камня	Значения коэффициентов в ф. (4.6)	
		$a$	$x$
1	1 (без СП)	840	0,566
2	1,5	313372	1,11
3	2	110862	1,001

Максимальное отклонение значений коэффициента ползучести по ф.(4.24) со значениями коэффициентов, представленных в таблице 4.11 от значений, полученных по ф.(4.19) в диапазоне модуля упругости бетона от 30000 МПа до 45000 МПа (ориентировочный класс бетона о СП 63.13330 В25 – В100) составляют:

- без учета влияния СП – 9,7%;
- с учетом повышения коэффициента ползучести цементного камня в 1,5 раза за счет влияния СП – 37%;
- с учетом повышения коэффициента ползучести цементного камня в 2 раза за счет влияния СП – 51%.

На основании этого можно утверждать, что рассматриваемая выше модель обеспечивает результаты, имеющие хорошую сходимость с ф.(4.19) без учета влияния СП, т.е. является достоверной.

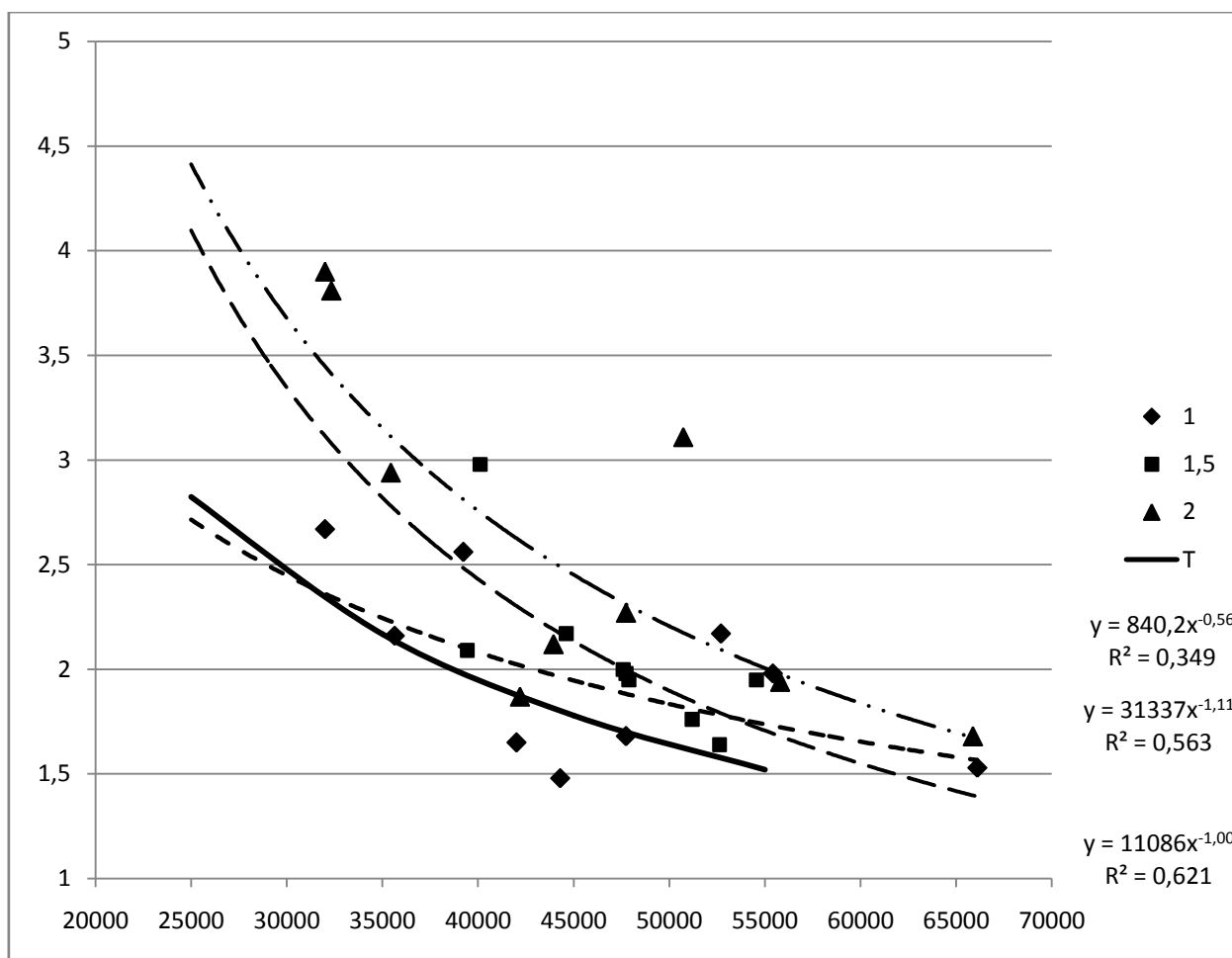


Рисунок 4.17 – Зависимость коэффициента ползучести бетона от его модуля упругости

1 – без учета влияния СП на ползучесть цементного камня; 1,5; 2 – соответственно повышение ползучести цементного камня с СП в 1,5 и 2 раза относительно ползучести цементного камня без СП; Т – по ф. (4.19)

Из представленных на рисунке 4.17 данных следует, что одним из основных факторов, влияющих на ползучесть бетона, является возможное повышение ползучести цементного камня вследствие введения в его состав СП. Повышение ползучести цементного камня в два раза может привести к повышению коэффициента ползучести бетона до 1,5 раза.

На рисунке 4.18 представлены результаты численного эксперимента, характеризующие влияние концентрации крупного заполнителя на коэффициент ползучести бетона.

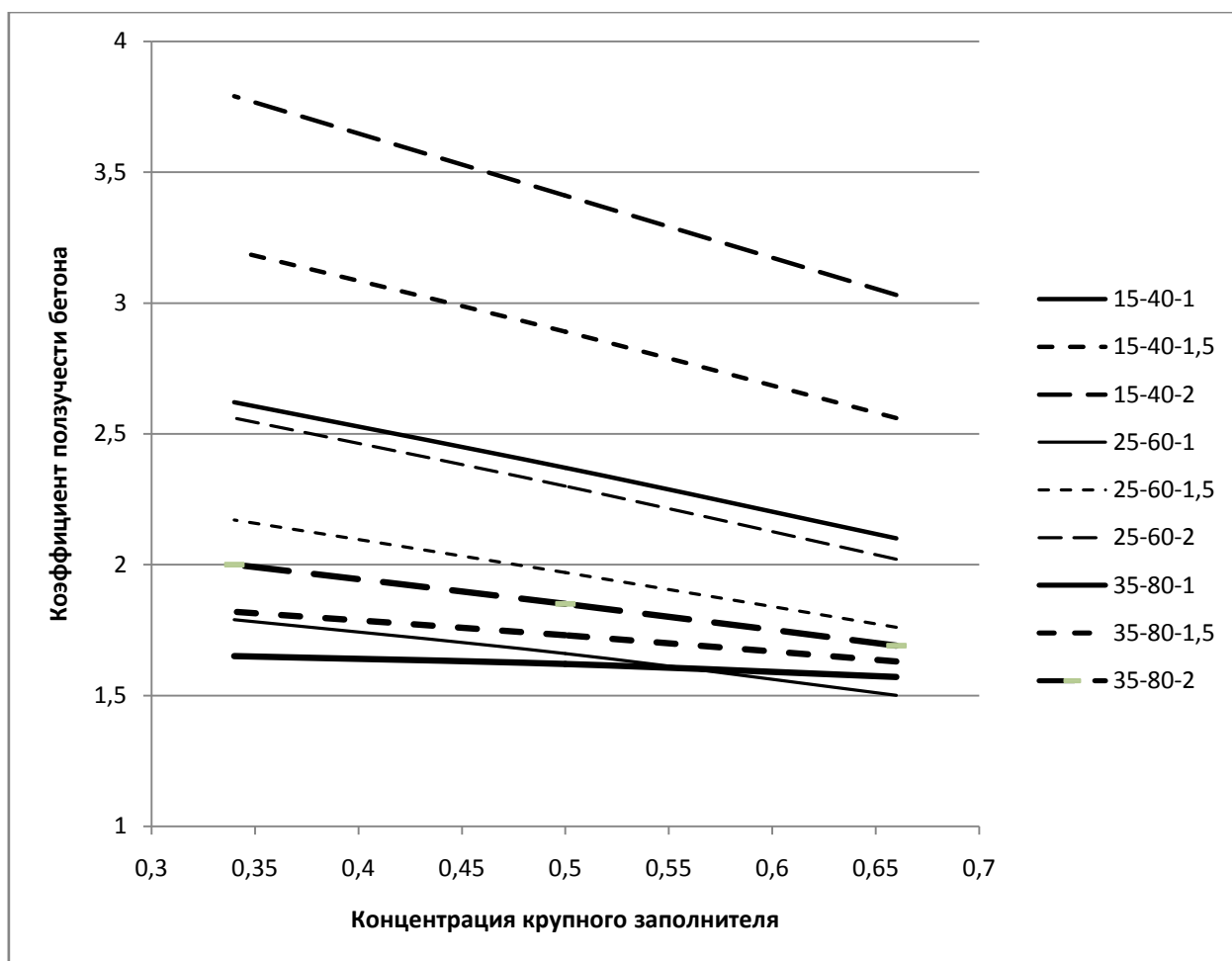


Рисунок 4.18—Влияние концентрации крупного заполнителя, модуля упругости цементного камня и крупного заполнителя и СП на коэффициент ползучести бетона

15-40-1 – первая цифра – модуль упругости цементного камня, ГПа; вторая цифра – модуль упругости крупного заполнителя, ГПа; третья цифра характеризует влияние СП на ползучесть цементного камня (1; 1,5; 2 – соответственно без СП; 1,5; 2 – повышение ползучести цементного камня при введении СП соответственно в 1,5 и 2 раза)

Из представленных на рисунке 4.18 данных очевидно, что влияние концентрации крупного заполнителя проявляется практически одинаково вне зависимости от упругих свойств крупного заполнителя и цементного камня, а также от влияния СП. Так, в случае высокомодульных крупного заполнителя (80000 МПа) и цементного камня (35000 МПа) с повышением концентрации крупного заполнителя от 0,34 до 0,66 снижение коэффициента упругости бетона составляет от 5% до 15,5%, причем в большей степени в бетонах с СП. В случае низко модульных крупного заполнителя (40000 МПа) и

цементного камня (15000 МПа) с повышением концентрации крупного заполнителя от 0,34 до 0,66 снижение коэффициента упругости бетона составляет примерно 20% и практически не зависит от наличия СП. Таким образом, ожидаемое снижение коэффициента ползучести бетона с фиксированной структурой в сравнении с самоуплотняющимся бетоном вряд ли превысит 20%.

#### 4.4.2 Результаты экспериментальных исследований коэффициента ползучести бетона

Для экспериментального определения коэффициента ползучести бетона изготовлены две серии образцов, составы которых представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Составы бетонов для экспериментального определения коэффициента ползучести бетона

Серия	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>						Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Вид бетона, способ укладки
	Ц	В	Щ	ф	П	СП		
1	396	158	1586	0,589	514	1,58	2656	ФСО <sup>1</sup>
2	499	200	998	0,371	649	-	2346	В <sup>2</sup>

Примечания: 1 – бетон с фиксированной структурой, полученный погружением крупного заполнителя в растворную составляющую; 2 – традиционный бетон с вибрационным уплотнением

На рисунке 4.19 представлены данные о развитии прогибов балок, изготовленных из бетонов фиксированной структуры и бетонов, полученных по традиционной технологии, во времени.

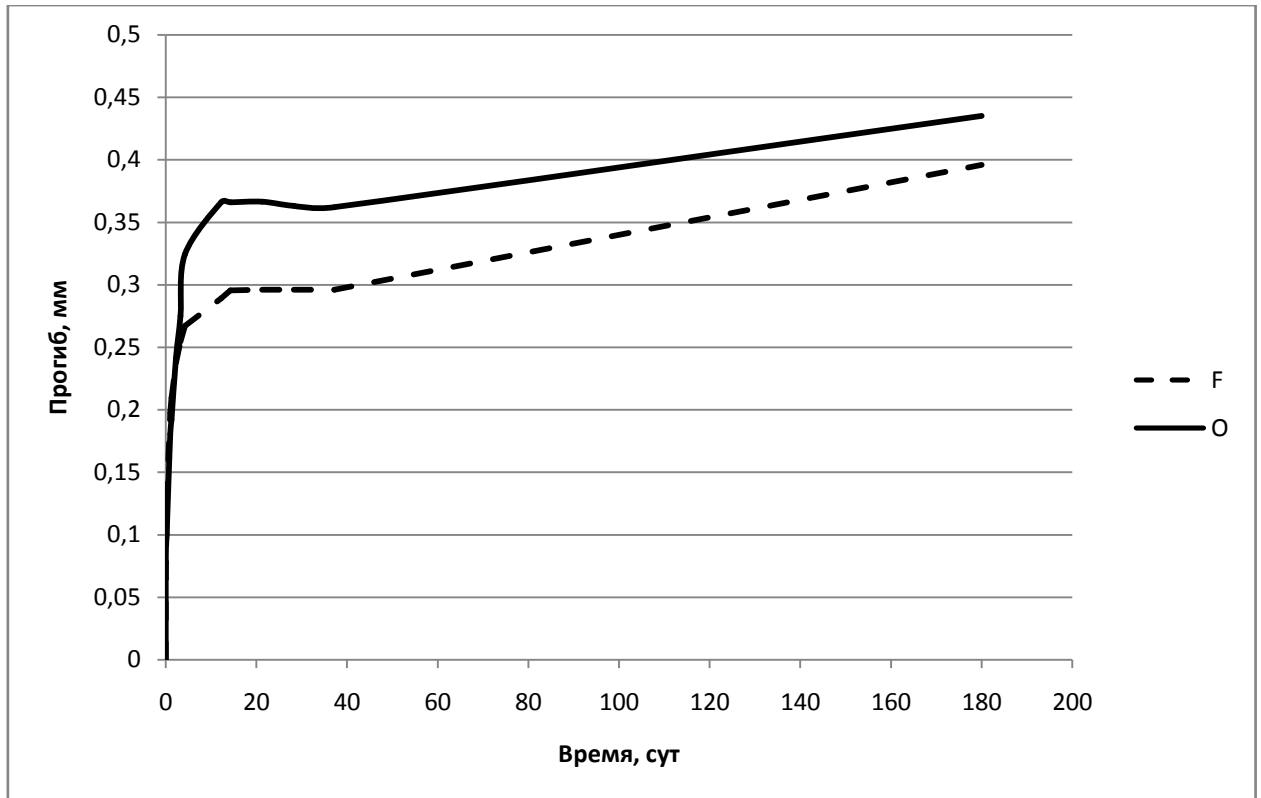


Рисунок 4.19 – Развитие прогибов балок во времени F– бетон фиксированной структуры; O– бетон, полученный по традиционной технологии

Очевидно, что прогибы балок, изготовленных из бетонов фиксированной структуры, меньше прогибов балок, изготовленных из традиционных бетонов, что полностью соответствует выводам, полученным в разделе 4.1.2.4, ф.(4.13). По данным о прогибах балок  $f$  при приложении нагрузки определены значения начального модуля упругости  $E_0$  бетонов из формулы

$$E_0 = k \cdot \frac{M \cdot l^2}{f \cdot I}, \quad (4.24)$$

$M$  – изгибающий момент;

$l$  – рабочий пролет балок;

$I$  – момент инерции сечения балок;

$k$  – коэффициент, зависящий от схемы загрузки (1/48).

Значения модуля упругости бетонов составили 39200 МПа для бетона фиксированной структуры и 32700 для бетона, полученного по традиционной технологии.

На рисунке 4.20 представлены данные о развитии коэффициента ползучести бетона во времени.

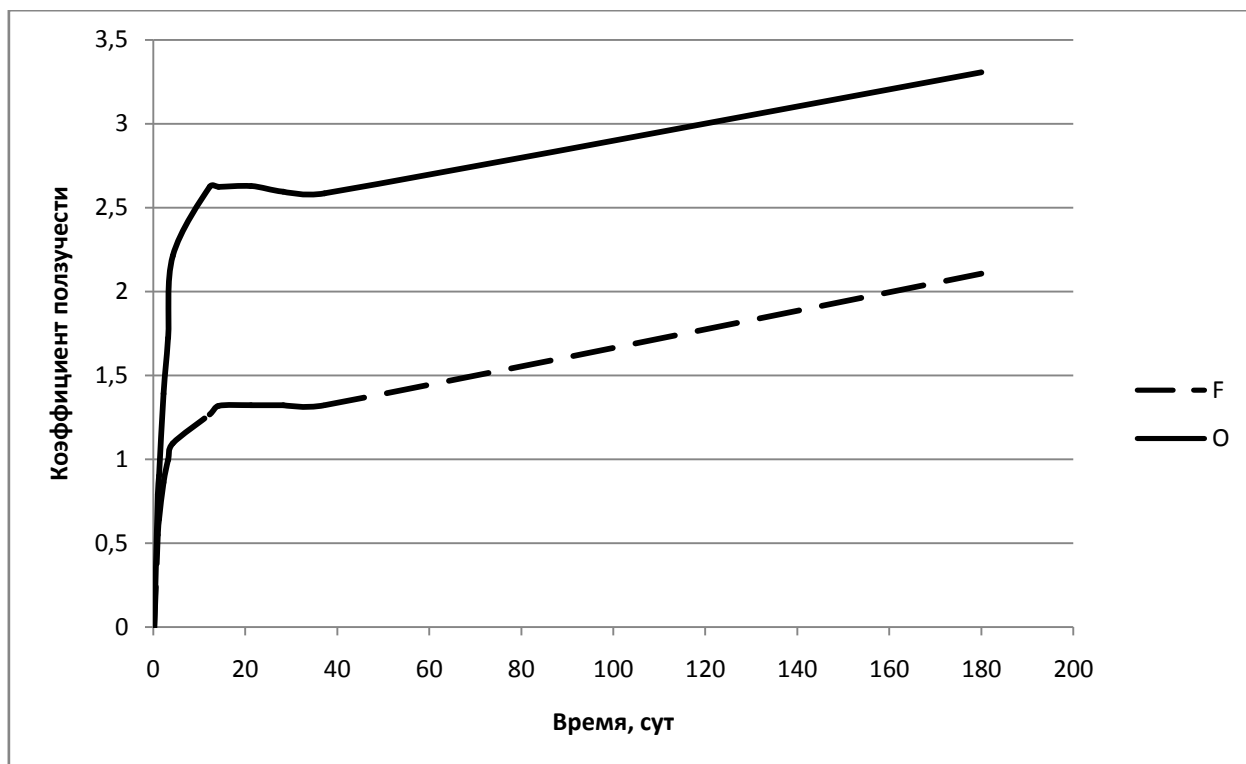


Рисунок 4.20 – Коэффициент ползучести бетона

F – бетон каркасной структуры; O – бетон, полученный по традиционной технологии

Очевидно, что в ранний период развитие деформаций бетона фиксированной структуры происходит более быстро, что связано, вероятно, с особенностью структуры. Ранее было показано, что вследствие повышенной концентрации крупного заполнителя в бетоне фиксированной структуры возможно понижение коэффициента ползучести от 2 до 23 %. В результате экспериментальных исследований получено значение коэффициента ползучести бетона с фиксированной структурой 2,1, а бетона, полученного по традиционной технологии – 3,3. Таким образом, величина коэффициента ползучести бетона с фиксированной структурой составила 0,64 от

коэффициента ползучести эталона. Кроме того, дополнительное понижение коэффициента ползучести бетона с фиксированной структурой может быть связано с наличием в его составе СП[67,71,90].

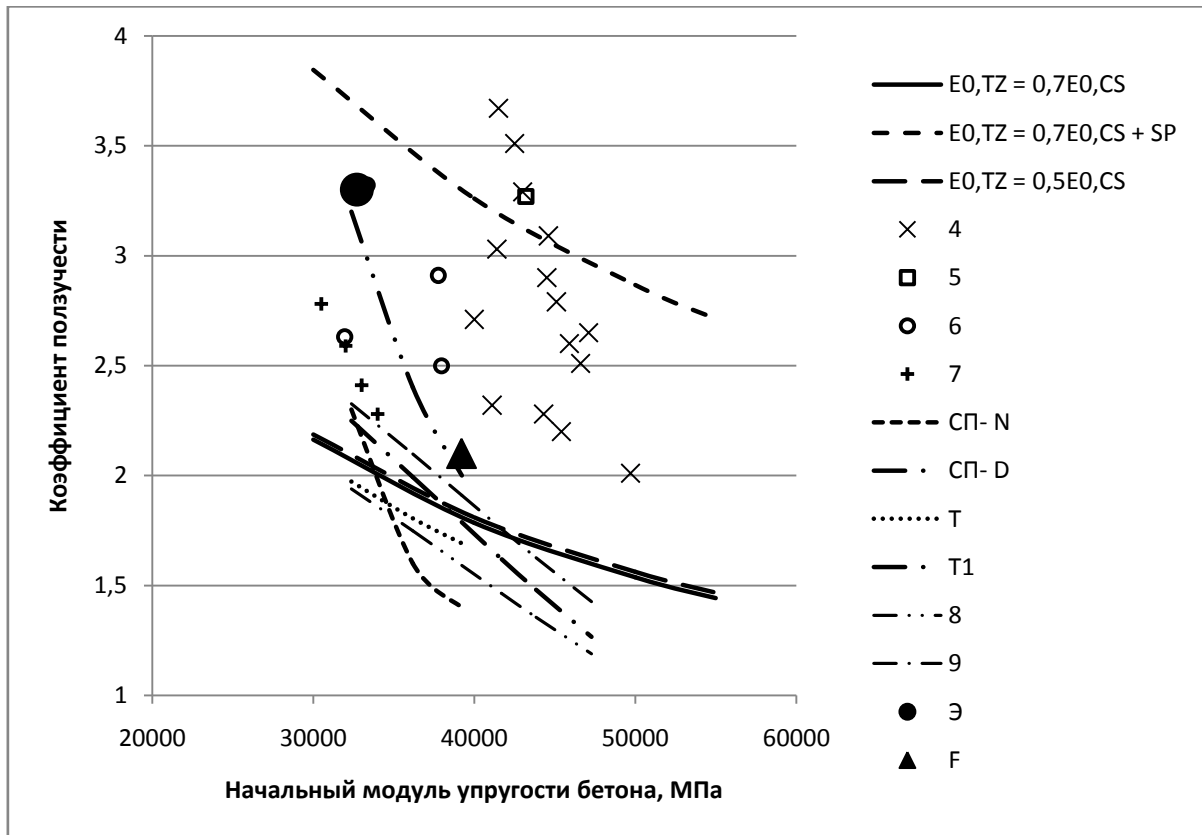


Рисунок 4.21 – Зависимость коэффициента ползучести бетона от начального модуля упругости

Э – бетон, полученный по традиционной технологии; F– бетон фиксированной структуры; 4-7 по [71,82,92,93]; СП – N, СП – D – по СП 63.13330 соответственно для нормальных и сухих условий выдерживания; T – по ф.(4.19); T1 – формуле  $\varphi = \frac{0,00322 \cdot E_0}{R^z}$  ( $z=1,04$ ), полученной из формулы Вельми (Voellmy)  $C_0 = \frac{0,0025}{R}$  [64,125], 8,9 – по формуле  $\varphi = C_0 \cdot E_0$ , где  $C_0$  определено по формуле Щербакова Е.Н.  $C_{28}^* = (0,13 + \frac{1545}{R}) \cdot \frac{10^{-6} B}{100}$  [64,125], 9 при расходе воды 150 и 200 л/м<sup>3</sup> соответственно

Представленные на рисунке 4.21 данные показывают, что полученные в настоящем исследовании экспериментальные данные о коэффициенте ползучести бетона фиксированной структуры не противоречат известным теоретическим положениям и экспериментальным данным. Полученные



экспериментальные значения коэффициента ползучести хорошо согласуются с данными СП 63.13330.

### Выводы

1. Предложена четырехэлементная модель зависимости начального модуля упругости и коэффициента ползучести бетона от свойств и объемной концентрации цементного камня, крупного и мелкого заполнителей и контактной зоны, получены количественные закономерности изменения деформационных свойств бетона при кратковременном и длительном нагружении, экспериментально подтвержденные для бетонов каркасной структуры.

2. Повышение концентрации крупного заполнителя в структуре бетона от 0,35 (СУБ) до 0,65 в зависимости от модуля упругости цементного камня и заполнителя может повысить модуль упругости бетона до 57%. Начальный модуль упругости бетона каркасной структуры связан с ее параметрами зависимостью  $E_0 = 0,66 \cdot E_{sp} + 0,35 \cdot E_{ca} + 21650 \cdot V_{ca} - 325$ . Получено соотношение  $\frac{E_0}{E_d} = 0,15 \cdot \ln(R) + 0,15$  начального и динамического модуля упругости бетонов каркасной структуры. Величины модуля деформаций при уровне нагружения 0,3 и 0,7 бетона каркасной структуры, полученного погружением крупного заполнителя в растворную составляющую, практически равны.

3. Модуль упругости контактной зоны «цементный камень-заполнитель» практически не влияет на модуль упругости бетона. При повышении коэффициента ползучести цементного камня и контактной зоны в 2 раза за счет введения в состав бетона СП коэффициент ползучести бетона возрастает до 2 раз. Коэффициент ползучести бетона каркасной структуры может быть определен по формуле  $\varphi_b = \frac{k_{sp} \cdot k_{tz}}{E_0^{k_{sp1} \cdot x}}$  ( $k_{sp} = 0,67$ ;  $k_{sp1} = 0,85$ ;  $k_{tz} = 1930 - 2140$ ).

5. Диаграмма «напряжения – деформации» бетонов каркасной структуры имеет S – образный вид, что обусловлено особенностью

включения каркаса из крупного заполнителя в работу на ранних этапах нагружения. Бетоны каркасной структуры способны к развитию неупругих деформаций, характеризуются повышенным до 45% значением величины  $\epsilon_R$  и, соответственно пониженным значением коэффициента упругости  $\lambda_R$ . До уровня напряжений 0,7 от предела кратковременной прочности величина деформаций бетона  $\epsilon_b$  каркасной структуры меньше, чем у СУБ и традиционных бетонов, что означает меньшую величину прогиба изгибаемых элементов.

## ГЛАВА 5. СТРУКТУРА И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ С КАРКАСНОЙ СТРУКТУРОЙ

По требованиям СП 63.13330, п. 4.1, «железобетонные конструкции всех типов должны удовлетворять требованиям... по долговечности...». В соответствии с требованиями СП 28.13330, п. 5.1, для обеспечения долговечности железобетонных конструкций следует применять бетоны, стойкие к воздействию агрессивной среды. Для конструкций, эксплуатируемых в атмосферных условиях, особенно при систематическом водонасыщении, одним из основных агрессивных факторов внешней среды является циклическое замораживание-оттаивание, в связи с чем морозостойкость бетона можно считать «...основным нормируемым и контролируемым показателем качества бетона» (СП 63.13330, п. 6.1.3). Обеспечение высокой морозостойкости связано, в т.ч., с минимизацией открытой пористости бетона.

### 5.1 Средняя плотность и пористость бетонов каркасной структуры

В таблице 5.1 представлены данные об открытой пористости бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) на щебне «Донской камень» и песке С.

Как следует из представленных в таблице 5.1 данных, полная пористость, открытая пористость (водопоглощение по объему) и условно-закрытая пористость бетона каркасной структуры, полученного по технологии 2 (погружение) в основном определяется величиной соответствующей пористости его растворной составляющей. Так, различие между измеренной величиной открытой пористости по объему и расчетной величиной, полученной с учетом концентрации растворной составляющей в бетоне, составляет  $3,67 - 3,34 = 0,33\%$  по объему. Эту величину можно рассматривать либо как погрешность измерения, либо как показатель

несплошностей (пустот) в бетоне каркасной структуры, не связанных с растворной составляющей, т.е. фактически как показатель дефектности структуры. Но следует иметь ввиду, что часть воды при насыщении могла быть поглощена крупным заполнителем, водопоглощение которого, хоть и не велико, но не равно 0.

Таблица 5.1 - Данные об открытой пористости бетона каркасной структуры

Показатели	Образцы	
	Балочки 40x40x160 (растворная составляющая)	Цилиндры d 95 мм (бетон каркасной структуры)
Истинная плотность, $\rho_{и}$ , г/см <sup>3</sup>	2,623	2,677
Средняя плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,154	2,482
Полная пористость, %	17,67	7,28
Доля растворной составляющей, n	1,0	0,37
Расчетная полная пористость, %	$1,0 \cdot 17,67 = 17,67$	$0,37 \cdot 17,67 = 6,54$ $7,28 - 6,54 = 0,74$
Водопоглощение по массе, $W_m$ , %	4,19	1,48
Водопоглощение по объему, $W_o = W_m \cdot \rho$ , %	9,0	3,67
Условно-закрытая пористость, %	8,67	3,61
Расчетная условно- закрытая пористость, %	$1,0 \cdot 8,67 = 8,67$	$0,37 \cdot 8,67 = 3,21$ $3,61 - 3,21 = 0,4$
Расчетное водопоглощение по объему $n \cdot W_o$ , %	$9,0 \cdot 1,0 = 9,0$	$9,0 \cdot 0,37 = 3,34$

Различие между измеренной величиной полной пористости бетона каркасной структуры и расчетной величиной, полученной с учетом концентрации растворной составляющей в бетоне, составляет  $7,28 - 6,54 = 0,74\%$ . Различие между измеренной величиной условно-закрытой пористости бетона каркасной структуры и расчетной величиной, полученной с учетом концентрации растворной составляющей в бетоне, составляет  $3,61 - 3,21 = 0,4\%$ . Таким образом, можно утверждать, что структура бетона в основном

представлена растворной составляющей и крупным заполнителем, пустоты практически отсутствуют. Пористость бетона каркасной структуры в основном определяется пористостью его растворной составляющей.

## 5.2 Морозостойкость бетонов с каркасной структурой

Бетоны каркасной структуры отличаются от традиционных бетонов большей концентрацией крупного заполнителя и, закономерно, меньшей концентрацией растворной составляющей (цементного камня). Это факт может предопределять более высокие требования к морозостойкости крупного заполнителя и вносить некоторые коррективы в известные зависимости, определяющие связь морозостойкости бетонов с рецептурно-технологическими факторами, например, с открытой пористостью или соотношением «условно-закрытая (резервная) пористость/открытая пористость». В связи с этим уточнение этих зависимостей для бетонов каркасной структуры представляет актуальную задачу. Кроме того, целесообразно исследовать влияние внутрискруктурных напряжений, возникающих при изменении температуры вследствие различий температурных деформаций цементного камня и заполнителей, с учетом особенностей макроструктуры бетонов каркасной структуры.

### 5.2.1 Формальная зависимость морозостойкости и прочности

Как известно, практически все свойства бетонов зависят от величины водоцементного отношения В/Ц, в частности, согласно [3, 5, 7, 10, 64, 91, 123, 124], предел прочности бетона на сжатие  $R$  связан с В/Ц зависимостью (рисунок 5.1), учитывающей влияние качества заполнителей  $a$  и активности цемента  $R_{ц}$ :

$$R = aR_{ц} \left( \frac{B}{Ц} \right)^{-1,3885}. \quad (5.1)$$

Согласно [64], морозостойкость бетона при испытаниях по 1 методу ГОСТ 10060  $F_1$  связана с величиной В/Ц зависимостью (рисунок 5.1), учитывающей

влияние свойств цемента и заполнителей, условий твердения ( $k_{Ц}, k_A, k_T$ ) и вовлеченного воздуха (ВВ) на морозостойкость бетона  $\Delta F_1$ :

$$F_1 = 2k_{Ц}k_Ak_T\left(\frac{B}{Ц}\right)^{-5,7} + \Delta F_1 \quad (5.2)$$

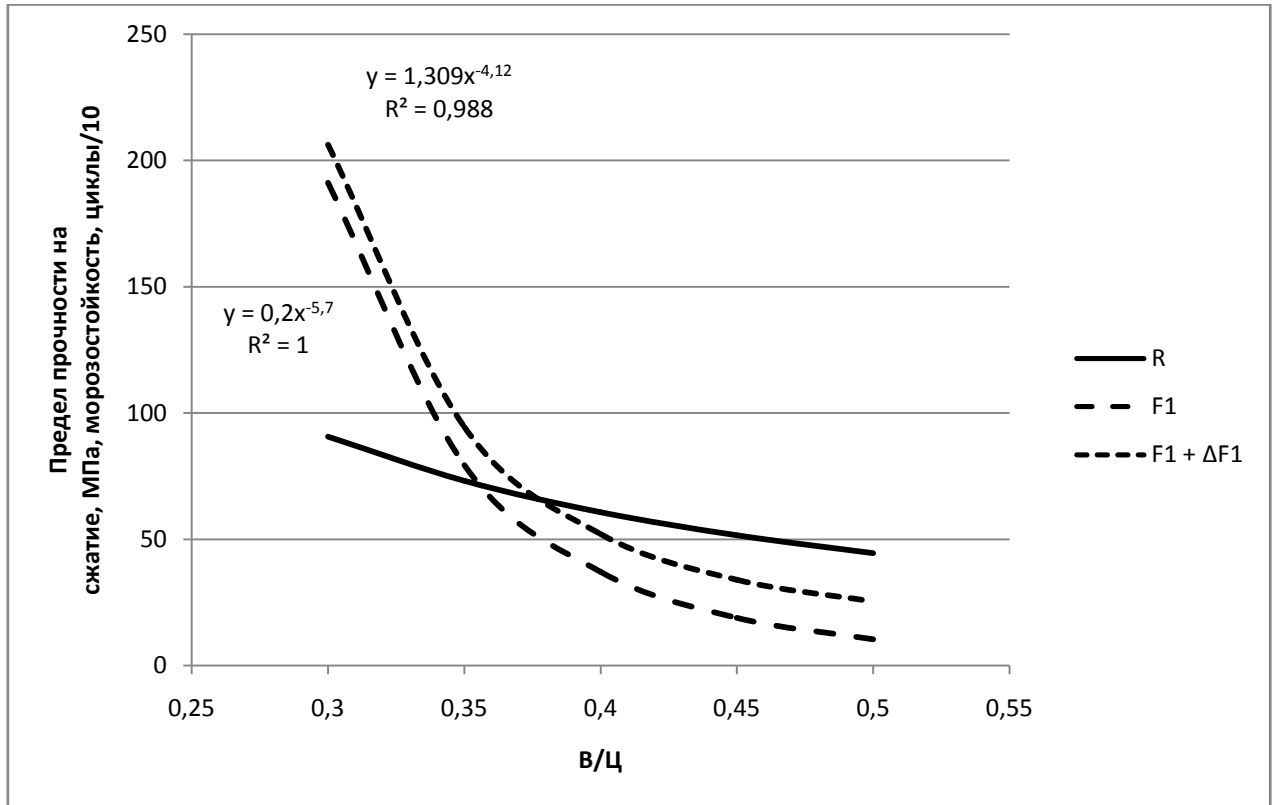


Рисунок 5.1 – Среднестатистическая зависимость морозостойкости бетона без ВВ  $F_1$  и с ВВ  $F_1 + \Delta F_1$  и предела прочности  $R$  бетона от величины В/Ц

Из зависимостей ф.(5.1, 5.2) следует наличие соотношения между морозостойкостью  $F_1$  бетона без ВВ добавок и пределом прочности бетона на сжатие  $R$  (рисунок 5.2):

$$\frac{F_1}{R} = 0,00002 \cdot R^{3,1}. \quad (5.3)$$

В бетонах с ВВ добавками соотношение между морозостойкостью  $F_1$  бетона и пределом прочности бетона на сжатие  $R$  имеет вид (рисунок 5.2):

$$\frac{F_1}{R} = 1,99 \cdot \exp(-0,029 \cdot R). \quad (5.4)$$

В бетонах каркасной структуры соотношение между морозостойкостью  $F_1$  бетона и пределом прочности бетона на сжатие  $R$  имеет вид (рисунок 5.2):

$$\frac{F_1}{R} = 0,000009 \cdot R^{3,1}. \quad (5.5)$$

Из ф.(5.5) следует, что морозостойкость бетонов каркасной структуры в сравнении с бетонами, полученными по традиционной технологии, может быть снижена более чем в 2 раза (см. 5.3).

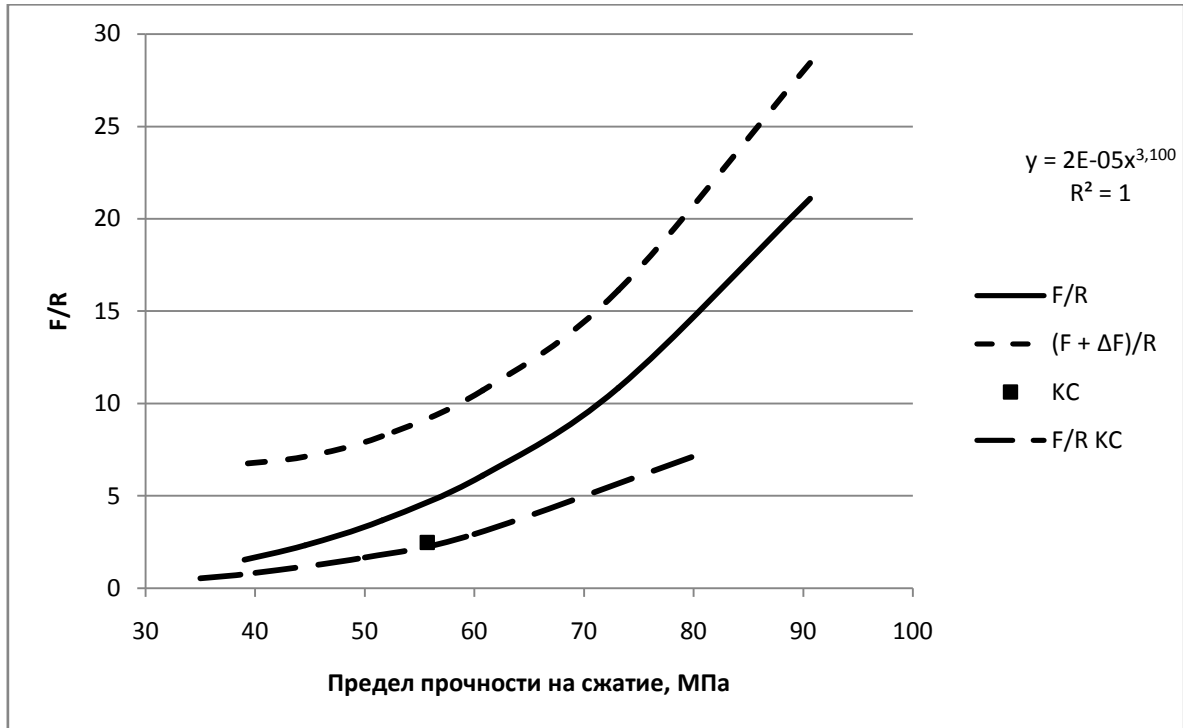


Рисунок 5.2 – Среднестатистическое соотношение F/R морозостойкости бетона  $F_1$  и предела прочности бетона на сжатие R без ВВ ( $F_1/R$ ), бетонов с ВВ  $(F + \Delta F)/R$  и бетонов каркасной структуры (КС)

Наличие зависимостей ф. (5.1-5.4) обусловлено определяющим влиянием пористости бетона на его прочность и морозостойкость. Поскольку пористость бетона в основном определяется такими факторами, как величина В/Ц, степень гидратации цемента и собственными деформациями (температурные и влажностные, вызывающие расширение и усадку) цементного камня и бетона при твердении [83,84], а СП могут изменять характер и величину пористости цементного камня [84], то закономерно, что СП могут изменять морозостойкость цементного камня (бетона) [79,85]. В связи с этим задача по уточнению основных закономерностей,

определяющих морозостойкость бетонов с СП, приобретает особую актуальность.

Поскольку на морозостойкость бетона, помимо В/Ц, оказывают влияние такие факторы, как вещественный состав цемента, химико-минералогический состав клинкера, наличие добавок, в частности, СП, ВВ, условия твердения, что в определенной степени учитывает ф.(5.2) посредством коэффициентов, то изменение морозостойкости бетона при варьировании указанных факторов может происходить в значительно более широком диапазоне в сравнении с изменением прочности при равном значении В/Ц, вот почему бетоны одного класса по прочности на сжатие могут характеризоваться различными марками по морозостойкости. В связи с этим совершенствование методик проектирования составов бетонов, особенно высокопрочных, с высокой морозостойкостью на основе развития представлений и получения или уточнения количественных зависимостей между параметрами структуры, показателями качества материалов и морозостойкостью бетона представляет актуальную задачу. Помимо указанных факторов, на морозостойкость бетона могут влиять внутрискруктурные напряжения, вызванные изменением температуры, вследствие различий коэффициентов температурных деформаций цементного камня и заполнителей [123].

### **5.2.2 Анализ внутрискруктурных напряжений в бетонах каркасной структуры**

Для анализа влияния особенностей макроструктуры бетонов каркасной структуры на уровень внутрискруктурных напряжений, вызванных изменением температуры и различием температурных деформаций, использовано известное решение Лямэ[123]:

- для радиальных напряжений



$$\sigma_r = \frac{-(\alpha_{я}-\alpha_0)\cdot\Delta T\cdot\left(1-\frac{a^3}{b^3}\right)}{\frac{1}{2\cdot E_0}\left(\left(2\frac{a^3}{b^3}+1\right)-\mu_0\left(4\frac{a^3}{b^3}-1\right)+\frac{1}{E_{я}}\left(1-\frac{a^3}{b^3}\right)(1-2\mu_{я})\right)}, \quad (5.6)$$

- для тангенциальных напряжений

$$\sigma_r = \frac{(\alpha_{я}-\alpha_0)\cdot\Delta T\cdot\left(2\frac{a^3}{b^3}+1\right)}{\frac{1}{E_0}\left(\left(2\frac{a^3}{b^3}+1\right)-\mu_0\left(4\frac{a^3}{b^3}-1\right)+\frac{2}{E_{я}}\left(1-\frac{a^3}{b^3}\right)(1-2\mu_{я})\right)}, \quad (5.7)$$

позволяющее определить величину радиальных и тангенциальных напряжений, возникающих в зоне контакта между оболочкой и ядром (матрица – заполнитель).

Для реализации численного эксперимента в качестве варьируемых факторов выбраны:

- диаметры, м, ядра (заполнителя) аот 0,002 до 0,0166, диаметр оболочки bпринят в зависимости от концентрации крупного заполнителя фот 0,4 до 0,6 и определялся при допущении о сферической форме заполнителя и оболочки

по формуле:

$$b = \frac{a}{\sqrt[3]{\varphi}}; \quad (5.8)$$

- модули упругости ядра  $E_1$  от 40 до 80 ГПа и оболочки  $E_2$  от 18 до 32 ГПа;

- коэффициенты Пуассона ядра 0,15, оболочки 0,22;

- разность коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) ядра (наиболее вероятные значения от  $9\cdot 10^{-6}$  до  $13\cdot 10^{-6}$ ) и оболочки (наиболее вероятные значения от  $11\cdot 10^{-6}$  до  $15\cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>) включена в план эксперимента как фактор и принята равной  $3\cdot 10^{-6}$  при КЛТР ядра больше КЛТР оболочки, принята равной минус  $3\cdot 10^{-6}$  при КЛТР ядра меньше КЛТР оболочки;

- перепад температур принят равным от 20°С до минус 50°С, т.е. равным 70°С при замораживании бетона и от минус 50°С до 20°С при оттаивании бетона.

При расчетах принято соотношение между модулем упругости растворной составляющей  $E_0$  и пределом прочности растворной составляющей на сжатие  $R_{по}$  формуле, полученной в результате обработки представленных в СП 63.13330 данных для мелкозернистых бетонов:

$$E_0 = 12157 \cdot \ln(R) - 18450. \quad (5.9)$$

Для связи между пределом прочности бетона на растяжение и сжатие использована зависимость [64]

$$R_t = R^{0,6}. \quad (5.10)$$

Для каждой точки плана из ф.(5.9) по величине модуля упругости определялась величина предела прочности на сжатие, далее по ф. (5.10) определялась величина предела прочности на растяжение, далее определялся условный уровень растягивающих напряжений как отношение величины напряжения к пределу прочности на растяжение для растягивающих и к пределу прочности на сжатие для сжимающих.

Результаты численного эксперимента и результаты представлены в таблице 5.2. При расчете уровня напряжений условно учитывалось влияние ползучести на понижение модуля упругости (величины возникающих напряжений) коэффициентом равным 0,33.

Таблица 5.2 - Результаты численного эксперимента по выявлению зависимости уровня внутривидовых напряжений

№	Факторы в натуральных переменных					Условный уровень внутривидовых напряжений	
	x1, a	x2, $E_{0,CS}$	x3, b	x4, $E_{0,CA}$	x5,	радиальн ых	тангенциальн ых
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,0166	35000	0,02	80000	0,66	0,292	-0,04
2	0,002	15000	0,02	80000	0,66	1,165	-0,05
3	0,002	35000	0,0025	40000	0,34	-0,02	0,716
4	0,0166	15000	0,0025	40000	0,34	1,26	1,27
5	0,002	35000	0,0025	80000	0,66	0,345	-0,04
6	0,0166	15000	0,0025	80000	0,66	-0,11	-0,11
7	0,0166	35000	0,02	40000	0,34	-0,016	0,73
8	0,002	15000	0,02	40000	0,34	-0,1	0,58

1	2	3	4	5	6	7	8
9	0,002	35000	0,02	80000	0,34	-0,06	-0,03
10	0,0166	15000	0,02	40000	0,34	-0,03	-0,07
11	0,0166	35000	0,0025	40000	0,66	-0,06	1,13
12	0,002	15000	0,0025	40000	0,66	0,387	0,8
13	0,002	35000	0,02	40000	0,66	1,03	-0,03
14	0,0166	15000	0,02	40000	0,66	0,327	-0,07
15	0,0166	35000	0,0025	80000	0,34	1,12	1,13
16	0,002	15000	0,0025	80000	0,34	-0,03	0,8
17	0,0166	25000	0,0112	60000	0,5	0	0
18	0,002	25000	0,0112	60000	0,5	0	0
19	0,0093	35000	0,0112	60000	0,5	0	0
20	0,0093	15000	0,0112	60000	0,5	0	0
21	0,0093	25000	0,02	60000	0,5	0	0
22	0,0093	25000	0,025	60000	0,5	0	0
23	0,0093	25000	0,0112	80000	0,5	0	0
24	0,0093	25000	0,0112	40000	0,5	0	0
25	0,0093	25000	0,0112	60000	0,66	0,321	-0,06
26	0,0093	25000	0,0112	60000	0,34	-0,02	0,806
27	0,0093	25000	0,0112	60000	0,5	0	0

Примечание: со знаком «минус» - сжимающие

Результаты численного эксперимента представлены на рисунках 5.3, 5.4. Из рисунка 5.3 очевидно, что определяющими величину тангенциальных напряжений в первую очередь следует рассматривать такие факторы, как различие величин КЛТР матрицы и заполнителя и размер оболочки, т.е., фактически, концентрация крупного заполнителя. Модуль упругости оболочки влияет незначительно, поскольку при повышении модуля упругости оболочки при изменении температуры, поскольку величины деформаций для всех видов оболочки приняты одинаковыми, повышение модуля упругости оболочки повышает величину напряжений ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ), но, поскольку предел прочности оболочки в модели связан с модулем упругости, то уровень напряжений при изменении обеих величин незначительно снижается при повышении модуля упругости оболочки, т.е. при повышении предела прочности растворной составляющей. Как следует из рисунка 5.3,

минимальный уровень напряжений возникает при разности КЛТР ядра и оболочки, приближающейся к 0. Кроме того, очевидно, что, если рассматривать как «безопасный» уровень напряжений, равный 0,15 [19], то для получения структуры бетона, стойкой к трещинообразованию при изменении температуры, необходимо обеспечить растворную составляющую с высокой прочностью.

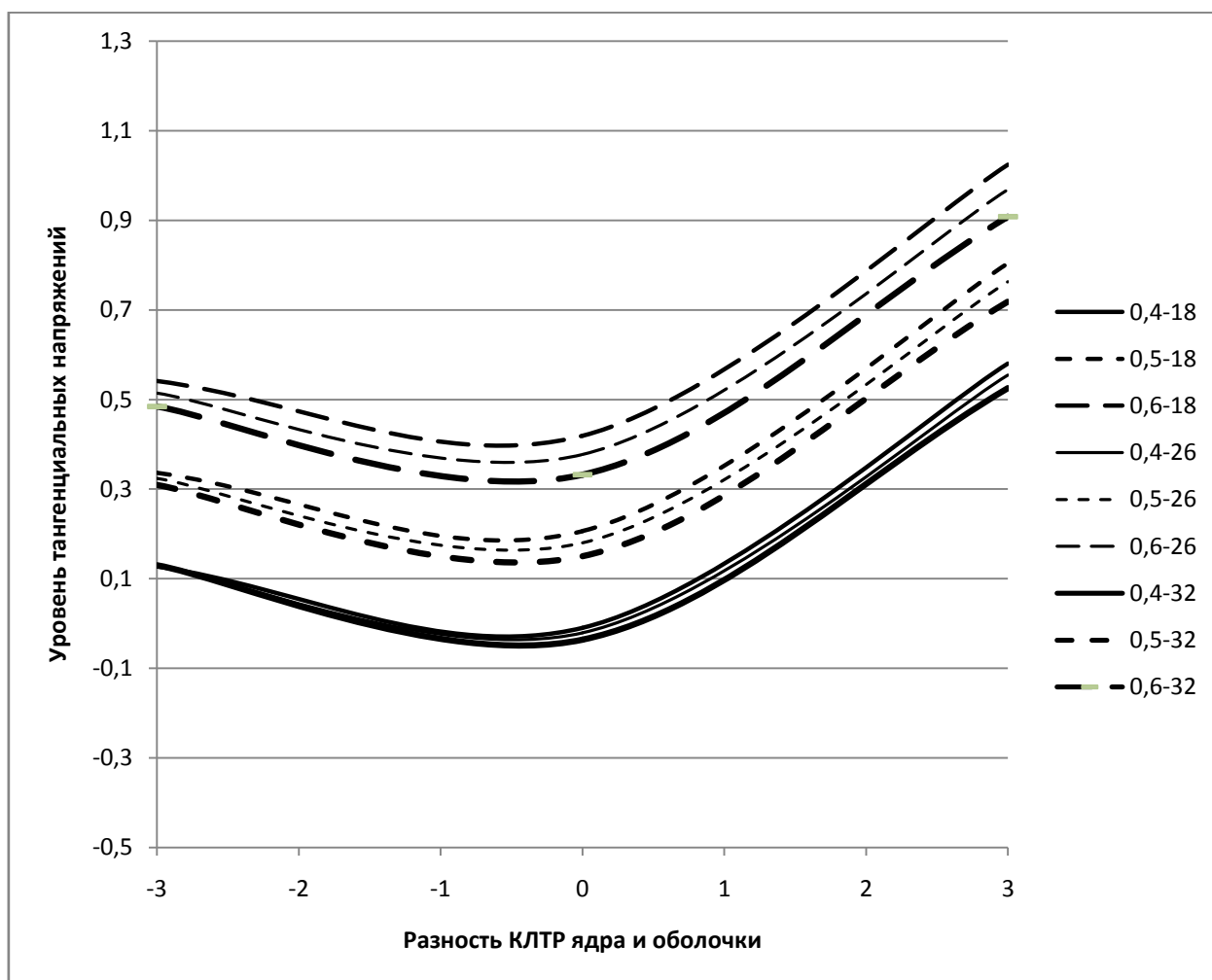


Рисунок 5.3 – Влияние объемной концентрации крупного заполнителя, модулей деформаций растворной составляющей и крупного заполнителя, предела прочности растворной составляющей на растяжение и сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем на уровень тангенциальных напряжений между растворной составляющей и крупным заполнителем при изменении температуры (со знаком «минус» - сжимающие) 0,4 – 32 – соответственно концентрация крупного заполнителя и модуль упругости (ГПа) оболочки

Основной вывод, который следует из анализа величины возникающих тангенциальных напряжений, вызывающих растрескивание оболочки на зернах крупного заполнителя – с увеличением концентрации крупного заполнителя величина тангенциальных растягивающих напряжений возрастает. Другими словами, бетоны фиксированной структуры являются чувствительными к изменению температуры и могут быть потенциально не морозостойкими.

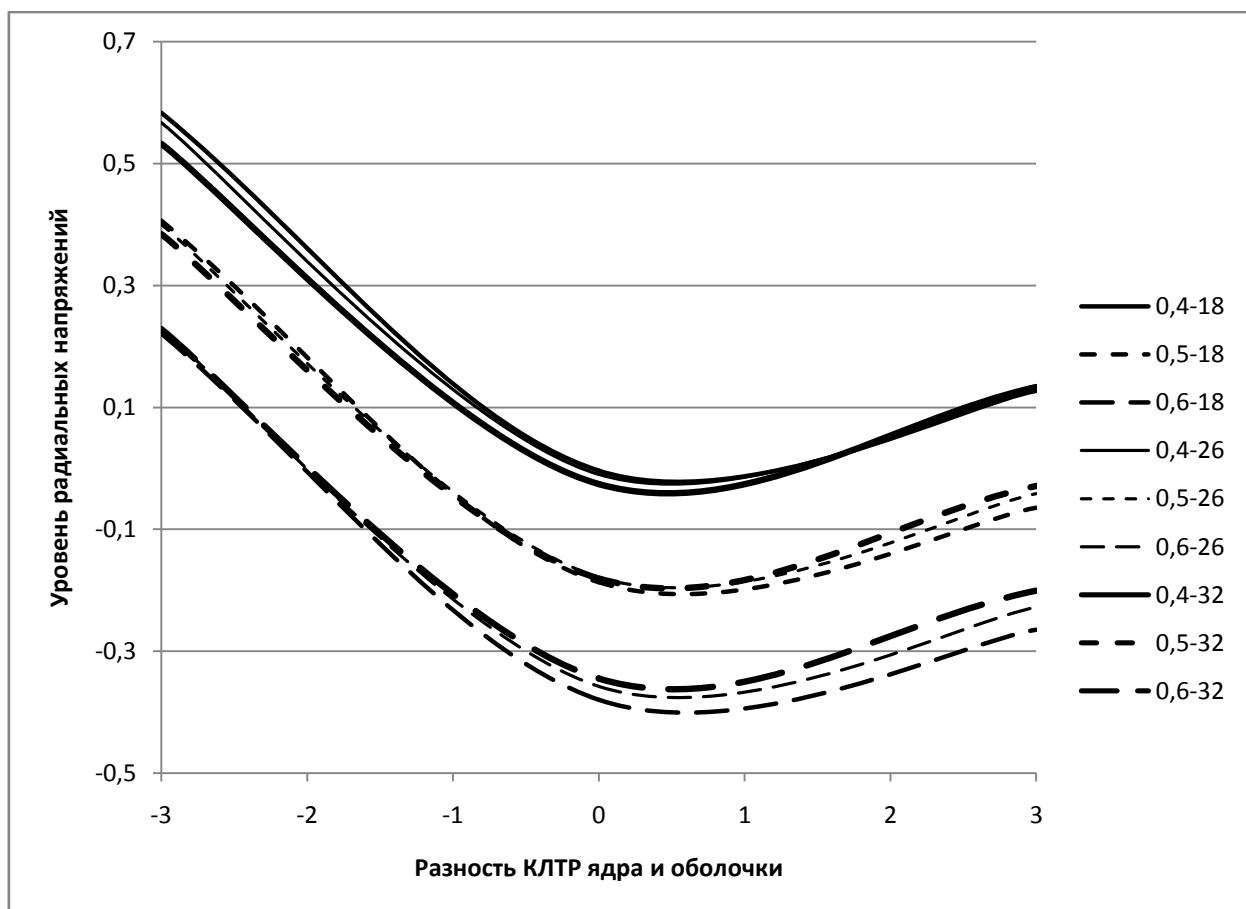


Рисунок 5.4 – Влияние объемной концентрации крупного заполнителя, модулей деформаций растворной составляющей и крупного заполнителя, предела прочности растворной составляющей на растяжение и сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем на уровень радиальных напряжений между растворной составляющей и крупным заполнителем при изменении температуры (со знаком «минус» - сжимающие) 0,4 – 32 – соответственно концентрация крупного заполнителя и модуль упругости (ГПа) оболочки

Из рисунка 5.4 очевидно, что определяющими величину радиальных напряжений, так же, как и в случае тангенциальных напряжений, в первую

очередь следует рассматривать такие факторы, как различие величин КЛТР матрицы и заполнителя и размер оболочки, т.е., фактически, концентрация крупного заполнителя. Как следует из рисунка 5.4, в случае радиальных напряжений картина принципиально меняется в сравнении с тангенциальными напряжениями – с увеличением концентрации крупного заполнителя величина растягивающих радиальных напряжений снижается. Тангенциальные напряжения вызывают разрыв оболочки (растворной составляющей) на зерне крупного заполнителя. Радиальные напряжения вызывают отрыв растворной составляющей от крупного заполнителя, т.е. появление трещин в контактной зоне. Кроме того, величина уровня радиальных напряжений зависит от величины сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем и снижается с уменьшением сцепления. Если рассматривать появление обоих видов трещин (радиальных и тангенциальных) равнозначно опасными для морозостойкости бетона, очевидно, следует сформулировать требования к структуре бетона, при которых оба вида растягивающих напряжений будут ограничены.

На рисунке 5.5 представлены результаты, полученные после отсеивания данных, не удовлетворяющих требованиям по уровню растягивающих напряжений менее 0,15. Из рисунка 5.5 очевидно, что условие малого влияния структуры и свойств составляющих бетона на уровень тангенциальных и радиальных напряжений при изменении температуры в принципе не реализуемо – при увеличении концентрации крупного заполнителя возрастают тангенциальные напряжения, а при снижении концентрации крупного заполнителя возрастают радиальные напряжения. Таким образом, в зависимости от концентрации крупного заполнителя в процессе микротрещинообразования будут доминировать соответствующие трещины.

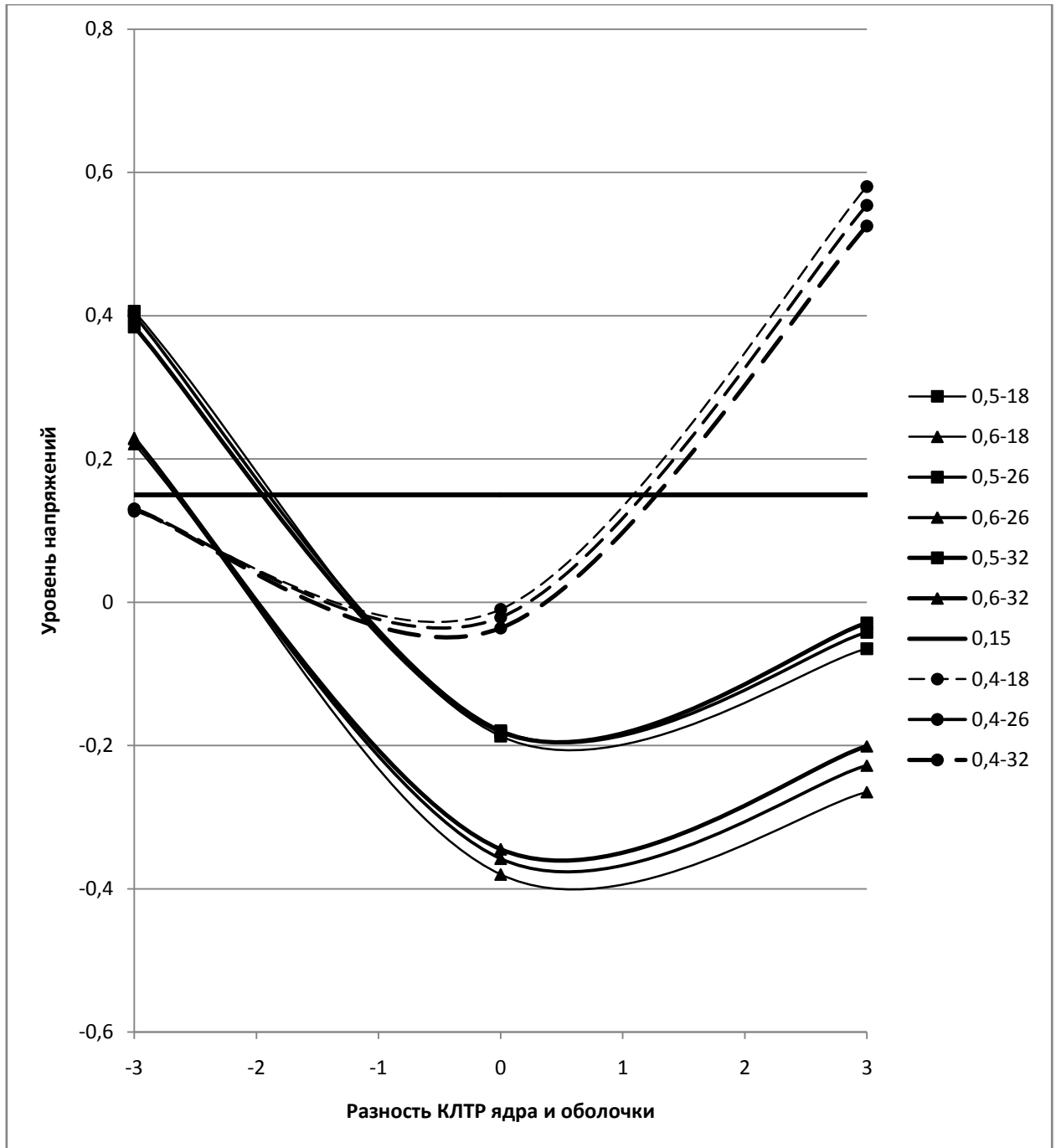


Рисунок 5.5 – Влияние объемной концентрации крупного заполнителя, модулей деформаций растворной составляющей и крупного заполнителя, предела прочности растворной составляющей на растяжение и сцепления растворной составляющей с крупным заполнителем на уровень радиальных напряжений между растворной составляющей и крупным заполнителем при изменении температуры (со знаком «минус» - сжимающие) 0,0025 – 32 – соответственно размер и модуль упругости (ГПа) оболочки

Естественно, рассматриваемая модель является качественной, численные значения условны и не являются реальными значениями напряжений, но из анализа модели вытекает, что:

- уровень растягивающих напряжений (радиальных и тангенциальных) не превышает значения 0,15 при концентрации крупного заполнителя примерно 0,45, что в принципе совпадает с рекомендациями по получению морозостойкого бетона с рекомендуемой концентрацией крупного заполнителя 0,43;

- различие КЛТР растворной составляющей и крупного заполнителя следует ограничивать величиной  $\alpha_{кз} - \alpha_p =$  от минус 2 до 1, т.е. величины КЛТР должны быть близки, что закономерно.

Для проверки положений, полученных в результате анализа модели, выполнены экспериментальные исследования по определению морозостойкости бетонов каркасной структуры. Для корректной оценки влияния концентрации крупного заполнителя выполнено сравнение морозостойкости с учетом параметров поровой структуры бетона, для чего проведено уточнение зависимости морозостойкости бетонов от критериев, характеризующих морозостойкость, и проведено сравнение полученных данных со среднестатистическими данными для бетонов, полученных по традиционной технологии. Такой подход позволит сравнить морозостойкость при «равном» значении либо величины В/Ц, либо критерия, связанного с поровой структурой бетона.

### **5.2.3 Критерии морозостойкости бетонов, учитывающие их структуру**

Исследователями неоднократно предпринимались попытки связать морозостойкость бетона с его составом и параметрами поровой структуры. Так, предлагались [64,91,124] различные критерии для оценки морозостойкости бетонов, некоторые из них представлены в таблице 5.3.



Таблица 5.3 - Критерии морозостойкости бетонов по данным [22]

№	Автор	Критерий	Пояснения
1	2	3	4
1	Шейкин А.Е., Добшиц Л.М.	$K_{\text{мрз}} = \frac{\Pi_{\text{узз}}}{0,09\Pi_{\text{и}}} =$ $= \frac{0,456\alpha}{\left(\frac{B}{C} - 0,271\alpha\right)}$ $F = 307 K_{\text{мрз}}^{0,57}$	$\Pi_{\text{уз}}$ – условно-закрытая (резервная пористость); $\Pi_{\text{и}}$ – открытая пористость; $C, B$ – расход цемента и воды, кг/м <sup>3</sup> ; $F$ – морозостойкость бетона, циклы
2	Кунцевич О.В.	$\Pi_{\text{уз}} = \frac{\kappa\alpha\rho_{\text{ц}}}{1 + \frac{B}{C\rho_{\text{ц}}}}$	$\kappa = 0,06 - 0,09$ $\alpha$ – степень гидратации; $\rho_{\text{ц}}$ – истинная плотность цемента
3	Вайтсайд Т., Свит Х.	$C = \frac{V_L}{V_L + V_B}$	$V_L$ – объем замерзающей воды, $V_B$ – объем воздуха, $C < 0,88$ – морозостойкие бетоны
4	Горчаков Г.И.	$\Pi_K = \frac{B - 0,5\alpha C}{10}$ $F = (12 - \Pi_K)^{2,7}$	$\alpha$ – степень гидратации; $C, B$ – расход цемента и воды, кг/м <sup>3</sup> ; $F$ – морозостойкость бетона, циклы
5	Дворкин Л.И.	$k = \frac{V_B + V_K}{V_L}$ $F = b(10^k - 1)$ $V_L = B - 0,27C$ $V_B = V_O - V_3$	$V_B$ – объем эмульгированного воздуха; $V_K$ – объем контракционных пор; $V_L$ – объем льда; $V_O$ – общее воздухововлечение; $V_3$ – заземленный воздух
6	Красный И.М.	$\Phi = \frac{V_{\text{вз}} + V_K}{V_L + V_{\text{во}}}$ $F = f(\Phi)$	$V_{\text{вз}}$ – закрытый воздух; $V_K$ – объем контракционных пор; $V_L$ – объем замерзающей воды; $V_{\text{во}}$ – открытый воздух
7	Кунцевич О.В. Розенберг Т.И.	$\kappa = \frac{\Pi_O - L + \Pi_P}{L}$ $F = 204,4\kappa - 25$	$\Pi_O$ – открытая пористость; $L$ – объем льда; $\Pi_P$ – резервная пористость

1	2	3	4
8	Лазарев А.Д.	$F = 0,8R\left(\frac{V_p}{C} - 2,85\right)$	<p>R – предел прочности бетона;</p> <p>C – концентрация цементного теста в бетоне;</p> <p><math>V_p</math> – расчетный объем воздуха в бетоне, приведенный к одному размеру пузырьков;</p> <p><math>V_p = 0,00387Ц + (0,5...0,6)V_k + (0,9...1,2)V_m</math></p> <p><math>V_k</math> – объем крупных пор (защемленный воздух)</p> <p><math>V_m</math> – объем мелких пор (вовлеченный воздух за счет ПАВ)</p>
9	автор	$K_{MPЗ} = \frac{\Pi_{УЗУЗ}}{\Pi_0}$ $F = k \cdot K_{MPЗ}^x$	<p><math>\Pi_{УЗ}</math> – условно-закрытая пористость;</p> <p><math>\Pi_0</math> – открытая пористость;</p> <p>F – морозостойкость бетона, циклы</p>

Очевидно, что все представленные в таблице 5.3 критерии в принципе можно разделить на две группы:

- целесообразные для применения на этапе проектирования состава бетона, в связи с тем, что входящие в формулы в таблице 5.3 величины не могут быть определены при контроле бетона неизвестного состава. К таким можно отнести критерии №№ 1,2,4,8,9 в таблице 5.3;

- целесообразные для применения при прогнозировании морозостойкости бетона неизвестного состава, при этом значения входящих в формулы в таблице 5.3 величин могут быть получены по результатам определения показателей пористости бетона по результатам лабораторных испытаний. К таким можно отнести критерии №№ 3,5,6,7 в таблице 5.3.

В принципе, сущность всех представленных в таблице 5.2 критериев сводится к соотношению (в том или ином виде) открытой  $\Pi_0$  и условно-закрытой  $\Pi_{УЗ}$  пористости:

$$F = f\left(\frac{\Pi_{уз}}{\Pi_0}\right). \quad (5.11)$$

В [91] обоснована целесообразность применения на стадии проектирования состава бетона критерия № 1 из таблицы 5.3 и предложена зависимость, устанавливающая связь между указанным критерием и морозостойкостью СУБ, так и бетонов фиксированной структуры. Следует отметить, что в формулу критерия №1 таблица 5.3 можно несколько упростить, исключив коэффициент 0,09, физический смысл которого заключается в переводе объема всей замерзающей воды в дополнительный объем образующегося льда. На наш взгляд это несколько условно, именно поэтому в настоящей работе предлагается использовать упрощенный критерий №1 в таблице 5.3 для прогнозирования морозостойкости бетона в виде соотношения пористостей  $\Pi_{уз}/\Pi_0$  и ставится задача по уточнению зависимости ф.(5.11). Следует отметить, что исключение из ф.1 таблица 5.3 коэффициента 0,09 не отразится на характере зависимости, изменятся только численные значения коэффициентов, входящих в соответствующую формулу. Для получения соответствующей зависимости использованы экспериментальные данные [7, 91].

На рисунке 5.6 представлены результаты по уточнению зависимости ф.(5.10) с учетом данных [91] и [7]. Значение критерия морозостойкости  $\Pi_{уз}/\Pi_0$  бетона каркасной структуры по данным таблицы 5.1 составляет  $3,61/3,67 = 0,98$ . Морозостойкость бетона каркасной структуры (см. раздел 5.2.4) принята F<sub>1200</sub>, хотя реально она несколько выше.

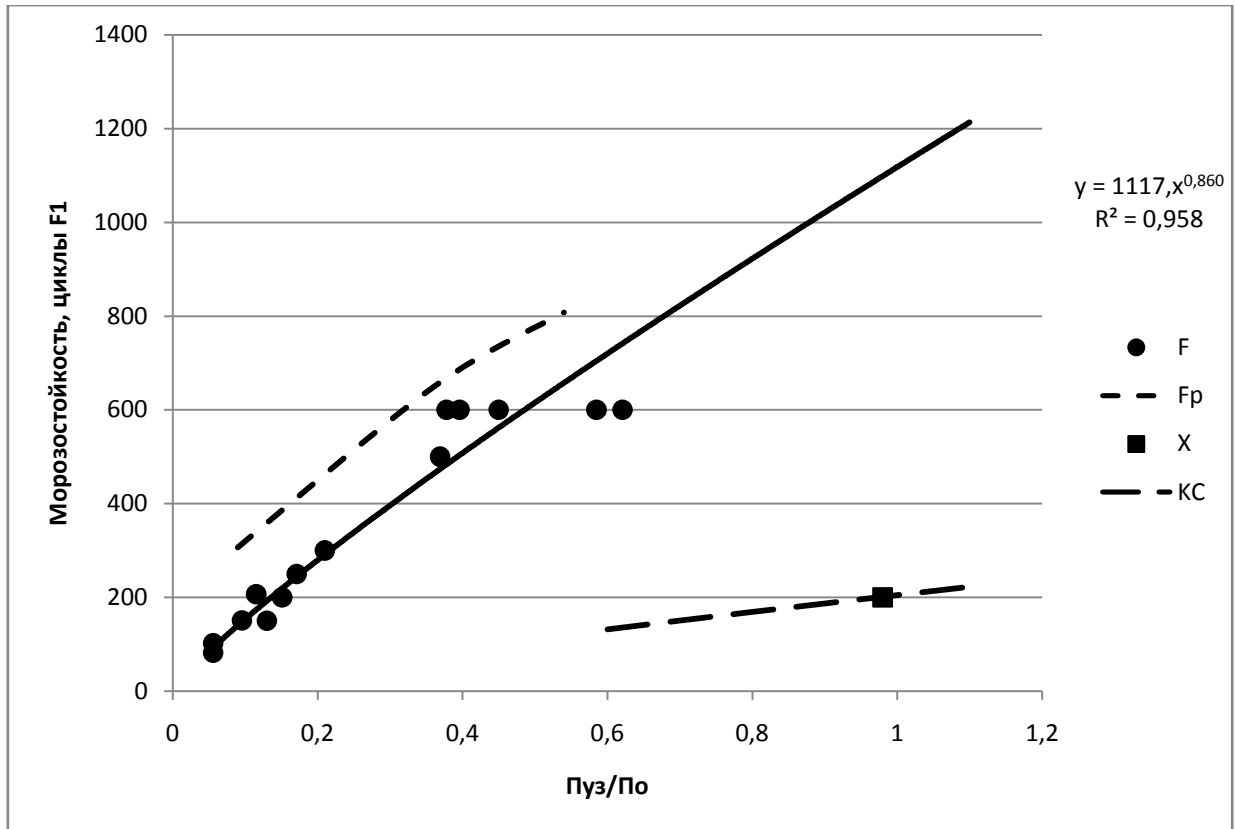


Рисунок 5.6 – Зависимость морозостойкости бетонов от величины  $\Pi_{юз}/\Pi_0 F_p$  – по ф.№1 таблица 5.3; F – экспериментальные данные [23], X – по экспериментальным данным автора; KC – по ф. (5.13)

Из представленных на рисунке 5.6 данных очевидно, что зависимость морозостойкости бетона от величины  $\Pi_{юз}/\Pi_0$ , полученная по данным авторов и [7], качественно идентична ранее установленной зависимости (№1) таблица 5.3, имеется некоторое количественное с ней расхождение, возможно, обусловленное некоторыми различиями методики определения морозостойкости бетона по предыдущей редакции ГОСТ 10060 (1 в таблице 5.3) и по ГОСТ 10060-2012:

$$F_1 = 1118 \cdot \left(\frac{\Pi_{юз}}{\Pi_0}\right)^{0,86}. \quad (5.12)$$

Для бетона каркасной структуры аналогичная зависимость может иметь вид

$$F_1 = 205 \cdot \left(\frac{\Pi_{юз}}{\Pi_0}\right)^{0,86}, \quad (5.13)$$

что свидетельствует о том, что на морозостойкость бетона каркасной структуры, помимо критерия морозостойкости в виде соотношения условно-

закрытой и открытой пористости, огромное влияние оказывают такие факторы, как микротрещинообразование вследствие различия температурных деформаций крупного заполнителя и растворной составляющей, и морозостойкость крупного заполнителя, занимающего в структуре бетона более 2/3 объема. Из полученных результатов можно сделать заключение о том, что получение бетонов каркасной структуры с высокой морозостойкостью представляет весьма сложную задачу, в связи, с чем применение бетонов каркасной структуры в условиях эксплуатации, предъявляющих повышенные требования по морозостойкости, на данном этапе исследований можно считать нецелесообразным.

#### **5.2.4 Результаты экспериментальных исследований морозостойкости бетонов каркасной структуры**

Бетоны каркасной структуры вследствие высокой концентрации крупного заполнителя (до 0,67 против 0,41...0,45 у бетонов из жестких и малоподвижных бетонных смесей и 0,34...0,39 у бетонов из высокоподвижных смесей) характеризуются меньшей толщиной оболочки (растворной составляющей), что предопределяет, как следует из анализа модели, полученной на основе решения Лямэ в разделе 5.2.2, повышенные значения тангенциальных напряжений, вызывающих разрыв оболочки. Структура таких бетонов при циклическом замораживании-оттаивании склонна к формированию микротрещин по указанной выше причине, в связи, с чем исчерпание морозостойкости бетона каркасной структуры может произойти достаточно рано.

Представленные на рисунке 5.7 результаты показывают, что резкое снижение динамического модуля упругости имело место уже после 25 – 30 циклов замораживания-оттаивания по 2 методу ГОСТ 10060. По данным [87] у СУБ с меньшей концентрацией крупного заполнителя резкое снижение динамического модуля упругости зафиксировано после 60 – 80 циклов, а у оа

у бетона с рациональной, по данным авторов, структурой снижение динамического модуля упругости не зафиксировано при 100 циклах.

Как следует из представленных на рисунке 5.7 данных, по критериям изменения прочности на сжатие, потери массы и динамического модуля упругости можно принять, что морозостойкость испытанного бетона каркасной структуры состава СС, полученного по технологии 2 (погружение), составляет 50 (55-60) циклов по второму методу ГОСТ 10060, что эквивалентно марке по морозостойкости F<sub>1</sub>200 (по таблице 4 ГОСТ 10060 марке по морозостойкости F<sub>1</sub>200 соответствует 45 циклов замораживания-оттаивания по второму методу).

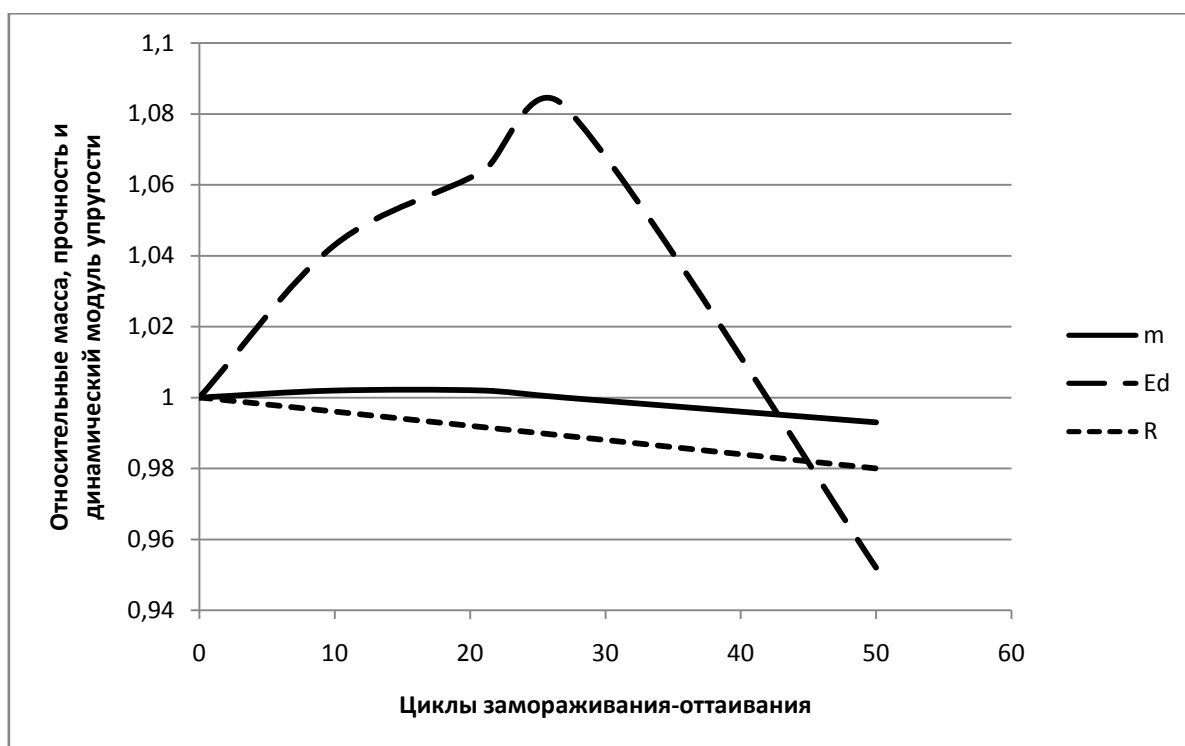


Рисунок 5.7 – Изменение массы (m), динамического модуля упругости (E<sub>d</sub>) и предела прочности на сжатие (R) бетона с каркасной структурой при циклическом замораживании – оттаивании по 2 методу ГОСТ 10060

На рисунке 5.8 представлены образцы бетона каркасной структуры, прошедшие 50 циклов замораживания-оттаивания по второму методу ГОСТ 10060 (в растворе хлорида натрия). Видно, что потеря массы бетона при циклическом замораживании-оттаивании связана с некоторым шелушением поверхности, т.е. фактически, с началом разрушения растворной

составляющей. Вероятно, роль матрицы в обеспечении прочности бетона с каркасной структуры существенно ниже в сравнении с традиционными бетонами, а существенное влияние на прочность оказывают непосредственные контакты частиц заполнителя между собой. Таким образом, результаты оценки морозостойкости бетонов с каркасной структурой показывают, что критерии морозостойкости для бетонов с различным типом структуры не могут быть универсальными.



Рисунок 5.8 – Образцы бетона с каркасной структурой после 50 циклов замораживания-оттаивания по 2 методу ГОСТ 10060

Таким образом, несмотря на тот факт, что морозостойкость бетона каркасной структуры оказалась достаточно высокой, соответствующей марке  $F_{1200}$ , прогнозируемая по критерию соотношения условно-закрытой и открытой пористости морозостойкость оказалась значительно выше. Вероятные причины снижения фактической морозостойкости:

- недостаточная морозостойкость крупного заполнителя, концентрация которого и, закономерно, роль в обеспечении морозостойкости бетона высока;

- высокий уровень растягивающих тангенциальных напряжений, вызывающий микротрещинообразование растворной составляющей на контакте с крупным заполнителем, что было показано при анализе структурной модели выше.

### 5.3 Усадка бетона каркасной структуры

Усадка бетона оказывает определяющее влияние на трещиностойкость железобетонных конструкций и, следовательно, играет важную роль в их долговечности. Поскольку, как известно [5, 64, 123, 75, 76, 99, 102, 121, 122, 127, 128], на величину усадки бетона влияет усадка цементного камня, свойства заполнителей, в частности, усадка заполнителей и их модуль упругости, а также концентрация заполнителей, представляется актуальной задача уточнения влияния концентрации крупного заполнителя на усадку бетонов каркасной структуры.

По данным [64,126], усадка бетона  $\varepsilon_{sh,b}$  связана с усадкой цементного камня  $\varepsilon_{sh,цк}$  зависимостью

$$\varepsilon_{sh,b} = (1 - \varphi)^x \cdot \varepsilon_{sh,цк}, \quad (5.14)$$

в которой величина  $\varphi$  представляет концентрацию заполнителя, а величина  $x$  изменяется от 1,2 до 1,8.

Зависимость  $\varphi$ .(5.14) может быть использована для анализа влияния концентрации крупного заполнителя в бетонах каркасной структуры на их усадку.

На рисунке 5.9 представлены данные об усадке бетона каркасной структуры и растворной составляющей такого бетона. Из представленных на рисунке 5.9 данных следует, что развитие деформаций усадки во времени ( $\tau$ ) описывается зависимостью:

- для растворной составляющей



$$\varepsilon_{sh,p} = -0,226 \cdot \ln(\tau) - 0,334; \quad (5.15)$$

- для бетона каркасной структуры

$$\varepsilon_{sh,b} = -0,049 \cdot \ln(\tau) - 0,065. \quad (5.16)$$

Соотношение величин, полученное по ф. (5.15 и 5.16) во всем диапазоне изменения  $\tau$  при  $\tau > 3$  составляет 0,21. Такое же соотношение следует из ф.(5.14) при концентрации крупного заполнителя 0,66 и значении показателя «х» 1,43. Таким образом, можно утверждать, что для бетонов каркасной структуры справедливы известные закономерности изменения усадки в зависимости от состава бетона и свойств его компонентов.

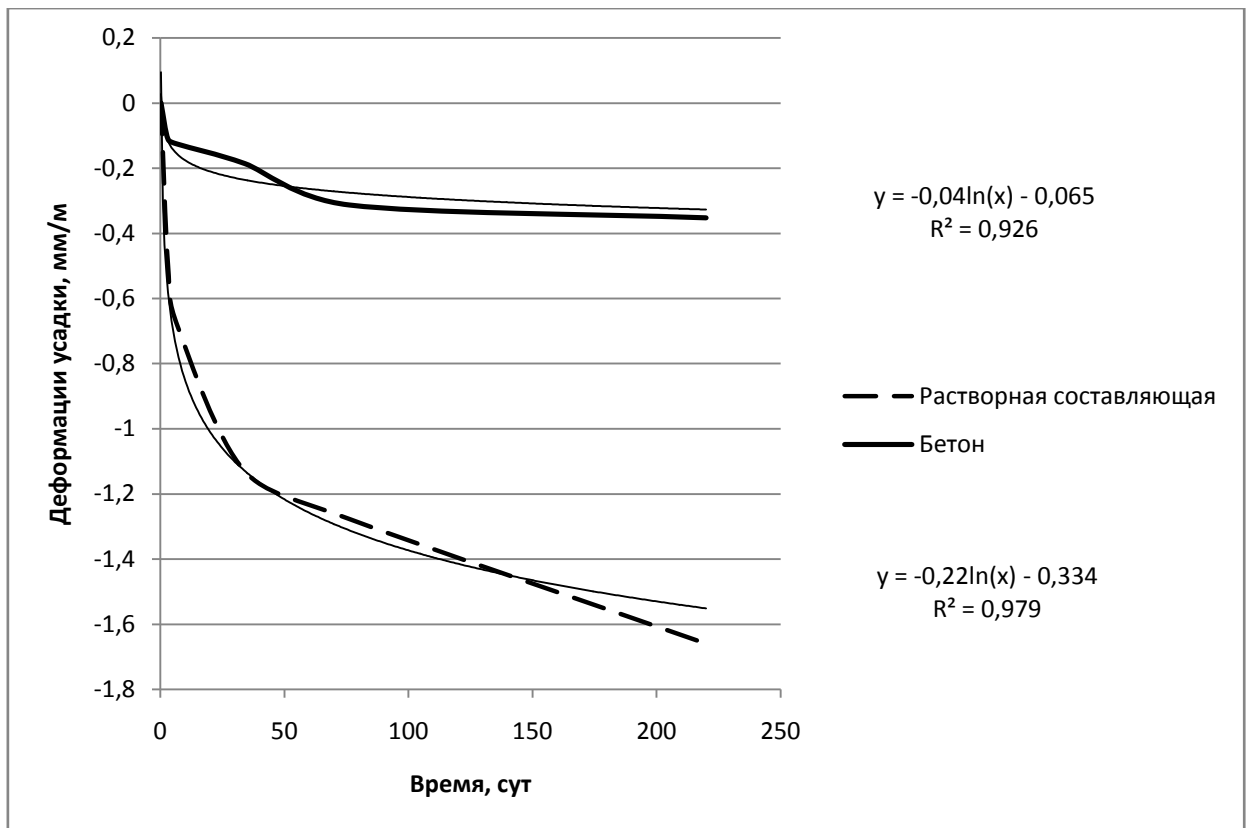


Рисунок 5.9 – Деформации усадки бетона каркасной структуры и растворной составляющей

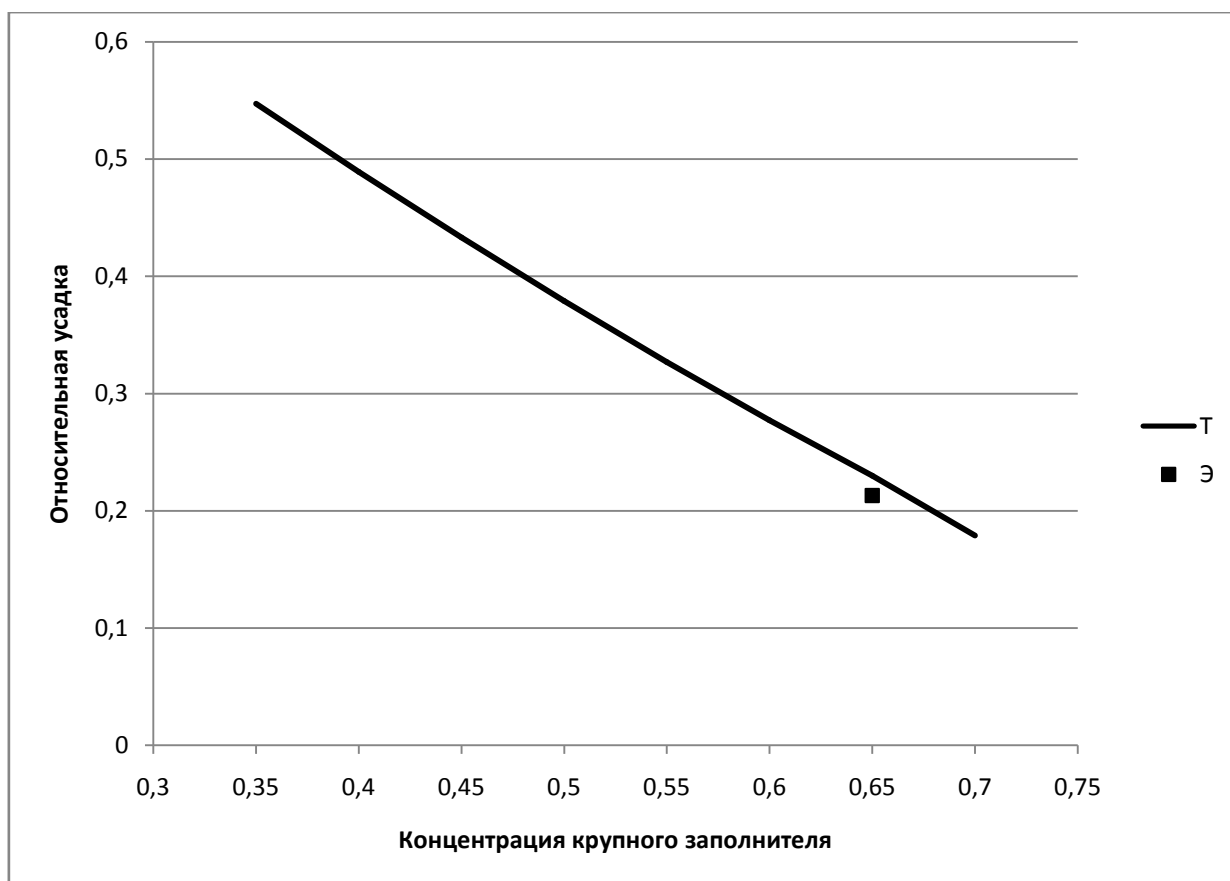


Рисунок 5.10 – Влияние концентрации крупного заполнителя на усадку бетона Т – по ф. (5.14)  $\left[64, 126\right] \frac{\varepsilon_{sh,b}}{\varepsilon_{sh,p}} = (1 - \varphi)^x$  при  $x = 1,43$ ; Э – бетон каркасной структуры;  $\varepsilon_{sh,p}$  – усадка растворной составляющей

На рисунке 5.11 представлены данные об изменении фактической усадки бетона каркасной структуры во времени и данные об изменении расчетной усадки по ф.(5.14) при  $x = 1,43$ . Из представленных на рисунке 5.11 данных очевидно, что закономерность изменения усадки во времени бетона каркасной структуры и его растворной составляющей, несмотря на практически совпадающий конечный результат, имеет некоторые отличия, которые могут быть обусловлены влиянием свойств крупного заполнителя (усадка крупного заполнителя) и особенностями массообмена и массопереноса в структуре бетона. Так, в относительно ранний период, примерно до 50 сут, усадка растворной составляющей несколько опережает усадку бетона.

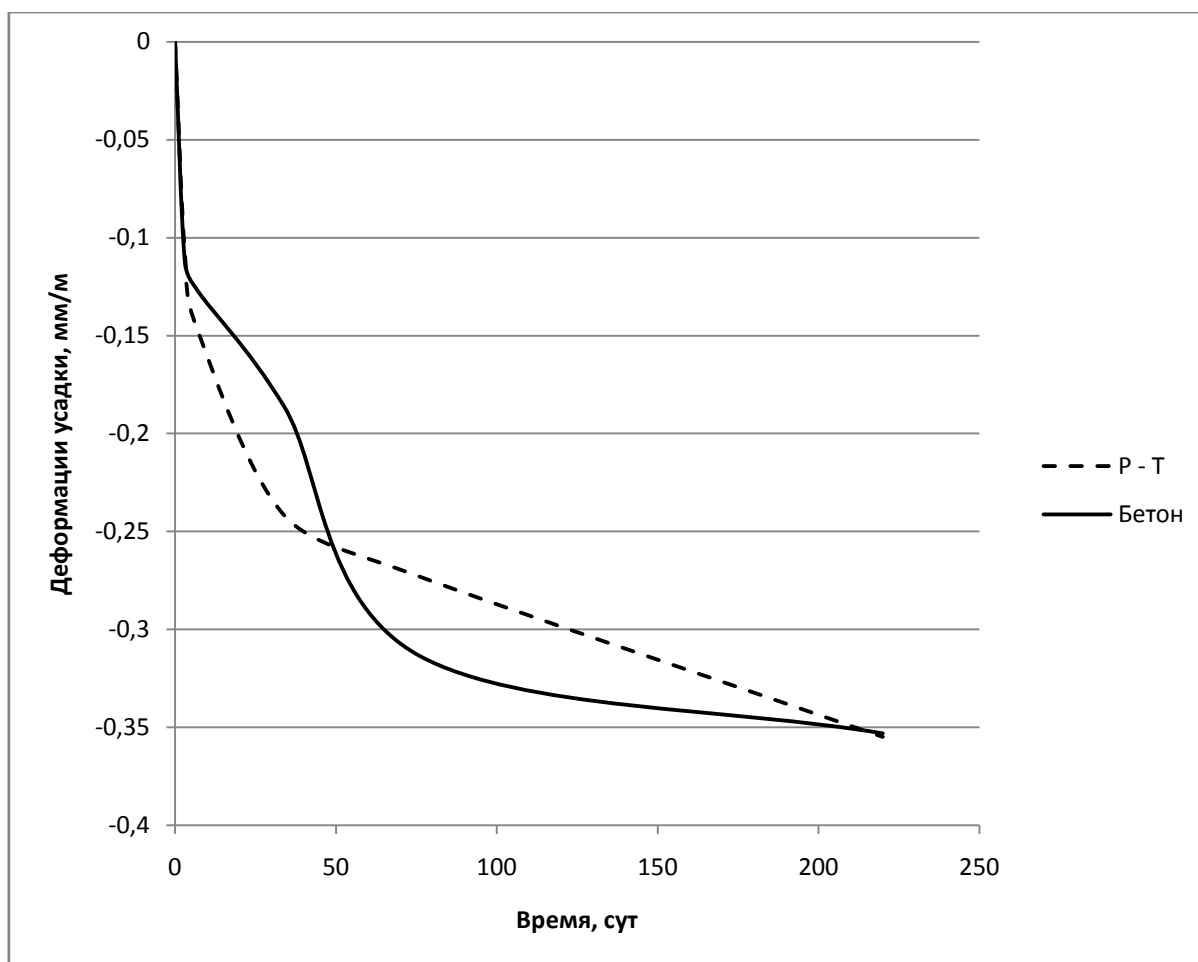


Рисунок 5.11 – Развитие во времени фактической усадки бетона (Бетон) и расчетной усадки бетона по ф.(5.14) при  $x = 1,43$  (P-T)

Это связано, скорее всего, с тем, что, во-первых, образцы для измерения усадки растворной составляющей  $40 \times 40 \times 160$  мм, имеющие модуль открытой поверхности 1,08, высыхали быстрее, чем бетонные образцы  $100(d) \times 160(h)$  мм, имеющие модуль открытой поверхности 0,52. После 50 сут усадка бетона интенсифицируется. Это может быть связано с проявлением усадки крупного заполнителя (песчаник) вследствие изменения его влажности в связи с переходом воды в растворную составляющую.

На рисунке 5.12 представлены данные о развитии усадки в растворной составляющей и в бетоне каркасной структуры в зависимости от изменения их влажности.

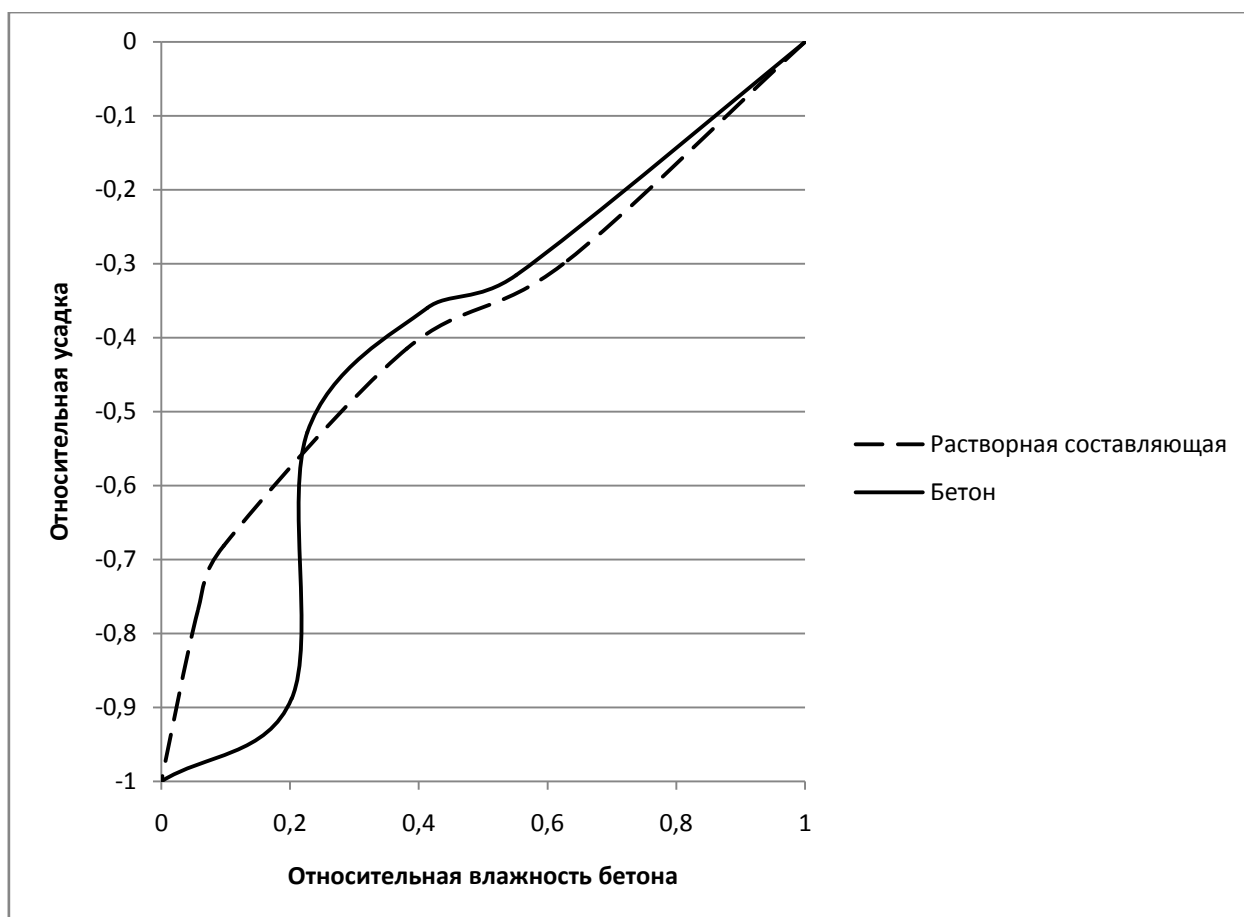


Рисунок 5.12 – Развитие усадки бетона каркасной структуры и растворной составляющей в зависимости от изменения их влажностного состояния

Очевидно, что при развитии усадки бетона четко фиксируется период, когда практически при неизменной влажности бетона происходит резкое увеличение его усадки. Это может быть связано с переходом воды из крупного заполнителя в растворную составляющую, поскольку при этом влажность бетона изменяться не будет, но при обезвоживании крупного заполнителя проявится его усадка. По данным Шейкина А.Е. [126] усадка песчаника может составлять до 1,22 мм/м.

### Выводы

1. Пористость бетона каркасной структуры, полученного методом погружения крупного заполнителя, в основном определяется пористостью его растворной составляющей. На уровне макроструктуры представлены

растворная составляющая и крупный заполнитель, пустоты практически отсутствуют.

2. Предложены зависимости, устанавливающие соотношение между морозостойкостью и пределом прочности бетонов, полученных по традиционной технологии, без ВВ добавок:  $\frac{F_1}{R} = 0,00002 \cdot R^{3,1}$ , с ВВ добавками:  $\frac{F_1}{R} = 1,99 \cdot \exp(0,029 \cdot R)$  и бетонов каркасной структуры  $\frac{F_1}{R} = 0,000009 \cdot R^{3,1}$ .

3. Сформулированы требования к структуре бетона, определяющие ее стойкость к циклическим температурным воздействиям: концентрация крупного заполнителя от 0,43 до 0,45, различие КЛТР растворной составляющей и крупного заполнителя от минус 2 до 1.

4. Установлена зависимость морозостойкости бетонов от критерия морозостойкости  $\Pi_{уз}/\Pi_0$  для бетонов, получаемых по традиционной технологии  $F_1 = 1118 \cdot \left(\frac{\Pi_{уз}}{\Pi_0}\right)^{0,86}$ , для бетонов каркасной структуры  $F_1 = 200 \cdot \left(\frac{\Pi_{уз}}{\Pi_0}\right)^{0,86}$  и выявлены причины понижения морозостойкости бетонов каркасной структуры.

5. Усадка бетона каркасной структуры определяется величиной усадки растворной составляющей (цементного камня) и концентрацией  $\varphi$  крупного заполнителя  $\frac{\varepsilon_{sh,b}}{\varepsilon_{sh,p}} = (1 - \varphi)^{1,43}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ получения бетонов каркасной структуры с объемной концентрацией крупного заполнителя до 0,66 посредством погружения крупного заполнителя в маловязкую растворную составляющую, обеспечивающий, в сравнении с получаемыми по технологии отдельного бетонирования нагнетанием растворной составляющей в пустоты крупного заполнителя бетонами, превышение предела прочности на сжатие от 1,26 для бетонов низких классов до 1,6 для высокопрочных бетонов.

2. Предел прочности на сжатие  $R_C$  бетонов каркасной структуры, полученных погружением крупного заполнителя в растворную составляющую, определяется величиной В/Ц:  $R_C = \frac{23,3}{(\frac{B}{Ц})^{1,11}}$ , связан с пределом прочности растворной составляющей  $R_m$ :  $R_C = 1,16 \cdot R_m + 3,8$ , характеризуется инвариантным к возрасту бетона соотношением пределов прочности на осевое растяжение  $R_t$  и сжатие  $R_C$ :  $R_t = 0,22 \cdot R_C^{0,68}$  и до двух раз меньшей в сравнении с бетонами, полученными по традиционной технологии, величиной удельного расхода цемента, убывающей с ростом прочности бетона:  $\frac{Ц}{R} = \frac{863}{R^{1,22}}$  до значений менее 4 кг/(м<sup>3</sup>·МПа).

3. Начальный модуль упругости бетонов каркасной структуры определяется модулями упругости цементного камня и концентрацией крупного заполнителя:  $E_0 = 0,66 \cdot E_{sp} + 0,35 \cdot E_{ca} + 21650 \cdot V_{ca} - 325$ , модуль упругости контактной зоны «цементный камень-заполнитель» практически не влияет на модуль упругости бетона. Соотношение начального и динамического модулей упругости бетонов каркасной структуры зависит от предела прочности бетона:  $\frac{E_0}{E_d} = 0,15 \cdot \ln(R) + 0,15$ . В диапазоне уровня нагружения от 0,3 до 0,7 величина модуля деформаций бетонов каркасной структуры изменяется незначительно.

4. Диаграмма «напряжения – деформации» бетонов каркасной структуры имеет S – образный вид, что обусловлено особенностью

включения каркаса из крупного заполнителя в работу на ранних этапах нагружения. До уровня нагружения 0,7 от предела кратковременной прочности величина предельных деформаций на восходящей ветви  $\epsilon_b$  бетонов каркасной структуры меньше в сравнении с традиционными бетонами. При более высоких уровнях нагружения бетоны каркасной структуры способны к значительному развитию неупругих деформаций и характеризуются повышенным до 45% значением величины деформации  $\epsilon_R$  и пониженным значением коэффициента упругости  $\lambda_R$ , соответствующими пределу кратковременной прочности.

5. Предложена четырехэлементная модель зависимости начального модуля упругости и коэффициента ползучести бетона от свойств и объемной концентрации цементного камня, крупного и мелкого заполнителей и контактной зоны, получены количественные закономерности изменения деформационных свойств бетона при кратковременном и длительном нагружении, экспериментально подтвержденные для бетонов каркасной структуры. Предложена формула для определения коэффициента ползучести бетонов каркасной структуры:  $\varphi_b = \frac{k_{sp} \cdot k_{tz}}{E_0^{k_{sp1} \cdot x}}$  ( $k_{sp} = 0,67$ ;  $k_{sp1} = 0,85$ ;  $k_{tz} = 1930 - 2140$ ). При повышении коэффициента ползучести цементного камня и контактной зоны в 2 раза за счет введения в состав бетона СП коэффициент ползучести бетона возрастает до 2 раз.

6. Предложены зависимости, устанавливающие соотношение между морозостойкостью и пределом прочности бетонов, полученных по традиционной технологии, без ВВ добавок:  $\frac{F_1}{R} = 0,00002 \cdot R^{3,1}$ , с ВВ добавками:  $\frac{F_1}{R} = 1,99 \cdot \exp(0,029 \cdot R)$  и бетонов каркасной структуры  $\frac{F_1}{R} = 0,000009 \cdot R^{3,1}$ . Установлена зависимость морозостойкости бетонов от критерия морозостойкости  $\Pi_{y3}/\Pi_0$  для бетонов, получаемых по традиционной технологии  $F_1 = 1118 \cdot \left(\frac{\Pi_{y3}}{\Pi_0}\right)^{0,86}$ , для бетонов каркасной структуры  $F_1 = 200 \cdot$

$\left(\frac{\Pi_{уз}}{\Pi_0}\right)^{0,86}$ , обосновано понижение морозостойкости бетонов каркасной структуры ростом внутрискруктурных напряжений при циклических температурных воздействиях.

7. Усадка бетона каркасной структуры определяется величиной усадки растворной составляющей (цементного камня) и концентрацией  $\varphi$  крупного заполнителя  $\frac{\varepsilon_{sh,b}}{\varepsilon_{sh,p}} = (1 - \varphi)^{1,43}$ .

8. Пористость бетона каркасной структуры в основном определяется пористостью его растворной составляющей. На уровне макроструктуры представлены растворная составляющая и крупный заполнитель, пустоты практически отсутствуют.

9. Снижение себестоимости компонентов бетонов каркасной структуры в сравнении с традиционными бетонами, уплотняемыми вибрацией, увеличивается с ростом класса бетона по прочности на сжатие и может составлять до 800 руб/м<sup>3</sup> для бетонов классов В80.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аксенов, В.Н. Железобетонные колонны из высокопрочного бетона: монография / В.Н. Аксенов, Д.Р. Маилян, Н.Б. Аксенов. –Ростов н/Д, Ростовский государственный строительный университет, 2012. – 167 с.
2. Александровский, С.В. Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. / С.В. Александровский, П.И. Васильев; под ред. С.В. Александровского // Состояние проблемы и перспективы развития: сборник статей. Экспериментальные исследования ползучести бетона – М.: Стройиздат, 1978. – С. 97 – 152.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона: монография / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. –464 с.
4. Бабков, В.В.Структурообразование и разрушение цементных бетонов: монография / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002 – 376с.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник для вузов / Ю.М. Баженов. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 499с.
6. Строительное материаловедение - теория и практика: сборник трудов под ред. Б.В. Гусева. Баженов, Ю.М. Современная технология бетона /Ю.М. Баженов. – М.: Издательство СИП РИА, 2006. – 371 с.
7. Баженов, Ю.М., Модифицированные высококачественные бетоны: монография / Ю.М.Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Издательство АСВ, 2006. – 368 с.
8. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика: монография / В.Г. Батраков.– М., 1998. – 768 с.
9. Батудаева, А.В. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А.В. Батудаева, Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов//Бетон и железобетон. – 2005. – №4. – С.17 – 19.
10. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона: монография /О.Я. Берг. – М: Стройиздат, 1962. – 321 с.
11. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон: монография / О.Я. Берг, Е.Н.

- Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
12. Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы международной научно-практической конференции/ Ростов н/Д: Ростовский государственный строительный университет, 2000, 2002, 2004, 2006, 2010.
  13. Бетон и железобетон – пути развития: материалы II Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону – М.: 2005.
  14. Проблемы современного бетона и железобетона в 2 ч. Блещик, Н.П. Основы прогнозирования технологических и физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, Д.С. Попов. – Минск: «Минсктиппроект», 2009. – Ч.2. – С. 132 – 158.
  15. Бондаренко, В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона: монография / В.М. Бондаренко. – Харьков: изд-во Харьковского университета. – 1968. – 323 с.
  16. Бондаренко, В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона: монография / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М.: Стройиздат, 1982. – 286 с.
  17. Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения. Восьмые Академические чтения. Бычков А.С. Ползучесть бетона: прогноз и нормирование / А.С. Бычков. – Самара, 2004. – С. 100 – 103.
  18. Бетон и железобетон – пути развития: Материалы II Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону /Бычков, А.С. Ползучесть бетона: методика испытаний, прогноз, представление результатов / А.С. Бычков. М. 2005 . –Т. 2. – С 355 – 358.
  19. Вербецкий, Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде: монография / Г.П. Вербецкий. – М.: Стройиздат, 1975. – 127 с.
  20. Виноградов, Б.Н. Влияние заполнителей на свойства бетона: монография / Б.Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1979. – 224с.

21. Виноградова, Е.В. Высокопрочный быстротвердеющий бетон с компенсированной усадкой // Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05 / Виноградова Елена Владимировна. – Ростов-на-Дону, 2006. – 24с.
22. Выровой, В.Н. Повышение долговечности бетона транспортных сооружений. Макроструктура бетона как композиционного материала / В.Н. Выровой, В.И. Соломатов. – М.: МИИТ. – 1986. – С. 55 – 59.
23. Выровой, В.Н. Технологическая механика бетона. Механизм усадки твердеющих и затвердевающих композиционных материалов / В.Н. Выровой. – Рига: РПЦ, 1986. – С. 22 – 28.
24. Гансен, Т.К. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне: монография / Т.К. Гансен. – М.: Стройиздат, 1963. – 126 с.
25. Гвоздев, А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона: монография / А.А. Гвоздев.– М.: Стройиздат, 1978. – 299 с.
26. Труды Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. Гвоздев, А.А. Ползучесть бетона /А.А. Гвоздев. –М.: Наука, 1966. – 56 с.
27. Гладков, Г.И. Физико-химические основы прочности бетона: монография / Г.И. Гладков. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 136 с.
28. Гордон, С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на плотных заполнителях: монография / С.С. Гордон. – М.: Стройиздат, 1969. – 149с.
29. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов: монография / Г.И. Горчаков. – М.: Стройиздат, 1976. – 465 с.
30. Грудемо, А. Микроструктура твердеющего цементного теста / А. Грудемо. – 4-й Межд. Конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1964. – С. 287 – 298.
31. Давидюк, А.Н. Эффективные бетоны для современного высотного строительства: монография / А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев. – М.: Издательство ООО «НИПКЦ Восход-А», 2010. – 148с.
32. Давидюк, А.Н. Прочностные свойства легких бетонов на стекловидных

- заполнителях для многослойных ограждающих конструкций / А.Н. Давидюк, А.А. Давидюк//Бетон и железобетон. – 2008. – №6. – С. 9 – 12.
33. Давидюк, А.Н. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня/ А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев// Строительные материалы. – 2010. – № 1. – С. 44 – 46.
34. Давидюк, А.Н. Самоуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций / А.Н. Давидюк, Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев// Технологии бетонов. – 2011. – № 1-2. – С. 57 – 58.
35. Демьянова, В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов с высокой ранней прочностью для беспрогревных и малопрогревных технологий: автореф. дис. ... д-р техн.наук: 05.23.05 / Демьянова Валентина Серафимовна. – Пенза, 2002. – 46 с.
36. Демьянова, В.С. Сравнительная оценка влияния отечественных и зарубежных суперпластификаторов на свойства цементных композиций / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, И.Е. Ильина// Строительные материалы. – 2002. – №9 – С. 36 – 39.
37. Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. Состояние проблемы и перспективы развития: под ред. С.В.Александровского. Некоторые вопросы теории усадки бетона / А.Е. Десов, К.Г. Красильников, З.Н. Цилосани. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 211 – 255.
38. Журавлёв, В.Ф. Сцепление цементного камня с различными материалами / В.Ф. Журавлев, Н.П. Штейерт // Цемент. –1956. – № 5. – С. 17 – 19.
39. Инструкция по проектированию состава и определению свойств высокопрочных бетонов из самоуплотняющихся бетонных смесей. – М.:

КТБ ЖБ, 2009 г.

40. Калашников, В.И. Классификационная оценка цементов в присутствии суперпластификаторов для высокопрочных бетонов /В.И. Калашников, В.С. Демьянова, А.А. Борисов // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 1. – С. 39 – 42 с.
41. Калашников, В.И. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня из пластифицированных и непластифицированных композиций / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Е.Ю. Селиванова, А.С. Мишин, А.П. Кандауров // Современные проблемы строительного материаловедения: Седьмые академические чтения РААСН. – Белгород, 2001. – ч.1. – С. 171 – 179
42. Калашников, В.И. Расчет состава высокопрочных самоуплотняющихся бетонов /В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – №10. – С. 4 – 6.
43. Каприелов, С.С. Уникальные бетоны и технологии в практике современного строительства России / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян, Ю.А. Киселева, О.В. Пригоженко // Проблемы современного бетона и железобетона.– Минск: НП ООО «Стринко», 2007. – т. 2. – С. 105 – 120.
44. Каприелов, С.С. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформационными характеристиками / С.С. Каприелов, А.В.Шейнфельд, Г.С. Кардумян, В.Г. Дондуков // Бетон и железобетон. – 2006. – №2. – С. 2 – 7.
45. Каприелов, С.С. Новые модифицированные бетоны: монография / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян. - М.: Парадиз, 2010. – 258с.
46. Каприелов, С.С. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С / С.С. Каприелов, Н.И. Карпенко, А.В. Шейнфельд, Е.Н. Кузнецов // Бетон и железобетон.

– 2003. – №6. – С. 8 – 12.

47. Коротких, Д.Н. Повышение прочности и трещиностойкости структуры современных цементных бетонов: проблемы материаловедения и технологии: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.23.05 / Коротких Дмитрий Николаевич. – Воронеж, 2014. – 41с.
48. Красильников, К.Г. Физико-химические особенности адгезии и контактного взаимодействия цементного вяжущего и заполнителей бетонов / К.Г. Красильников, С.Х. Ярлушкина // Физико-химическая механика материалов. – Минск, 1977. – С.27 – 35.
49. Ларионова, З.М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона: монография / З.М. Ларионова, Л.В. Никитина, В.Р. Гарашин. – М.: Стройиздат, 1971. – 161 с.
50. Ларионова, З.М. Петрография цементов и бетонов: монография / З.М. Ларионова, Б.Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1974. – 274 с.
51. Лесовик, В.С. Снижение энергоемкости производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород: автореф. дисс. д-р. техн. наук: 05.23.05 / Лесовик Валерий Станиславович. – Белгород, 1997. 46 с.
52. Лившиц, Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона: монография / Я.Д. Лившиц. – Киев: Вицашк., 1976. – 279 с.
53. Маилян, Д.Р. Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. О несущей способности колонн из высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2010.– С.54–61.
54. Маилян, Д.Р., Зависимость относительной несущей способности колонн от относительного эксцентриситета / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев // Инженерный вестник Дона. [Электронный ресурс] - 2012. – №4. – ч.2. – Режим доступа:  
<http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1334#top>
55. Макридин, Н.И. Структура, деформативность, прочность и критерий

- разрушения цементных композитов: монография / Н.И. Макридин, Н.Н. Максимова. – Саратов. 2001. – 280 с.
56. Методические рекомендации по расчету напряженного состояния железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом ползучести и усадки бетона. – М.: ВНИИ транспортного строительства, 1987. – 80 с.
57. Миненко, Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами: автореф. дисс...канд. техн. наук: 05.23.05 / Миненко Екатерина Юрьевна. – Пенза, 2004. – 23 с.
58. Мкртчян, А.М. Расчет железобетонных колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме/ А.М. Мкртчян, Д.Р. Маилян// Научное обозрение. – 2013. – №11. – С. 72-76.
59. Москвин, В.М. Прочность и деформации мелкозернистых бетонов с добавками суперпластификаторов С-3 и С-4 / В.М. Москвин, Р.Л. Серых, С.И. Фурманов, Ю.К. Калашников // Бетоны с эффективными модифицирующими добавками. – М.: НИИЖБ, 1985. – С. 25 – 33.
60. Нгуен, Динь Чинь Высокопрочные бетоны с применением комплексных органоминеральных модификаторов, содержащих золу рисовой шелухи, золу-уноса и суперпластификатор: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Нгуен Динь Чинь. – М., 2012. – 21 с.
61. Нгуен, Тхе Винь Высокопрочные бетоны с органоминеральным модификатором, содержащим расширяющий компонент: автореф. канд. техн. наук: 05.23.05 / Нгуен Тхе Винь. – М., 2012. – 22 с.
62. Невилль, А.М. Свойства бетона: монография / А.М. Невилль. – М.: Стройиздат, 1972. – 344с.
63. Несветаев, Г.В. Закономерности деформирования и прогнозирование стойкости бетонов при силовых и температурных воздействиях (методология и принципы рецептурно-технологического

- регулирования): автореф. дисс. ... д-р. техн. наук:05.23.05 / Несветаев Григорий Васильевич. – Ростов н/Д, 1998. – 48с.
64. Несветаев, Г.В. Бетоны: учебное пособие для вузов / Г.В. Несветаев. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 381 с.
65. Несветаев, Г.В. К вопросу строительства автомобильных дорог с применением цементных бетонов / Г.В. Несветаев//Науковедение. 2013(18). [Электронный ресурс].–Режим доступа: [naukovedenie.ru/index.php?p=issue-5-13](http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-5-13).
66. Несветаев, Г.В. Анализ материалов для производства бетонов классов В40 и выше во Вьетнаме / Г.В. Несветаев, Ву Ле Куен //Науковедение. [Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://naukovedenie.ru/PDF/43TVN315.pdf>
67. Несветаев, Г.В. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести/ Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк// Строительные материалы. – 2009. – № 6 – С. 34 – 37.
68. Несветаев, Г.В. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава / Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк// Строительные материалы. – 2009. – № 5. – С. 31 – 34.
69. Несветаев, Г.В. Самоуплотняющиеся бетоны: некоторые факторы, определяющие текучесть смеси/ Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк, Б.А. Хетагуров// Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 36 – 39.
70. Несветаев, Г.В. О пористости цементного камня с учетом его собственных деформаций при твердении/ Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян// Бетон и железобетон. – 2013. - №1. – С. 18 – 21.
71. Несветаев, Г.В. О ползучести цементного камня и бетона с модифицирующими добавками/ Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян// Бетон и железобетон. – 2014. – №4. – С. 6 – 8.
72. Несветаев, Г.В. Модуль упругости цементного камня и бетона: монография / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян. – Ростов-на-Дону: Рост.



- гос. строит. ун-т, 2013. – 81с.
73. Несветаев, Г.В. Совершенствование железобетонных конструкций, оценка их состояния и усиление. Некоторые технологические аспекты высокопрочных бетонов / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов, Г.С. Кардумян. – Минск: VII Технопринт, 2001. – С. 123 – 127.
  74. Несветаев, Г.В. О механизме раннего трещинообразования высокопрочных бетонов / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов. – Ростов н/Д: РГСУ, 2000. – С. 266–270.
  75. Несветаев, Г.В. Пятые академические чтения. О прогнозировании усадки цементных бетонов / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов / Современные проблемы строительного материаловедения // Воронеж: ВГАСА, 1999 . С. 305–311.
  76. Несветаев, Г.В. Современные проблемы строительного материаловедения. Пятые академические чтения. Усадочные деформации и раннее трещинообразование бетона / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов. – Воронеж: ВГАСА, 1999. – С. 312–316.
  77. Несветаев, Г.В. Применение модификаторов с целью управления модулем упругости бетона/ Г.В. Несветаев // Новые научные направления строительного материаловедения: Академические чтения РААСН.– Белгород, 2005. – ч.2. – С. 51 – 57.
  78. Несветаев, Г.В. Оценка эффективности суперпластификаторов / Г.В. Несветаев // Дни современного бетона. – Запорожье: ООО «Будиндустрия ЛТД», 2012 – С. 19 – 27.
  79. Несветаев, Г.В. О применении цементных бетонов для дорожных и аэродромных покрытий / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян // Строительные материалы. – 2014. – №3. – С. 31 – 35.
  80. Несветаев, Г.В., Самоуплотняющиеся бетоны: усадка / Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк // Строительные материалы. – 2009. – №8. – С. 52 – 53.
  81. Несветаев, Г.В. К вопросу выбора критериев эффективности бетонов/

- Г.В. Несветаев, Е.В. Виноградова, Ю.Ю. Лопатина // Научное обозрение. 2016. – №2. – С. 34 – 41.
82. Несветаев, Г.В. Влияние собственных деформаций на пористость и свойства цементного камня / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян // Строительные материалы. – 2015. - №9. – С. 38 – 42.
83. Несветаев, Г.В. О влиянии суперпластификаторов на пористость цементного камня / Г.В. Несветаев, И.В. Корчагин // Научное обозрение. – 2014. – № 7. – С. 837 – 841.
84. Несветаев, Г.В. Влияние суперпластификаторов на условно-закрытую пористость цементного камня и бетона / Г.В. Несветаев, И.В. Корчагин // Научное обозрение. – 2014. – №8. – С. 914 – 918.
85. Несветаев, Г.В. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня / Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк // Строительные материалы. – 2010. - № . 1. – С. 44.
86. Несветаев, Г.В. Модуль упругости цементного камня и бетона / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян. –Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит. ун-т, 2013. – 81с.
87. Несветаев, Г.В. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и ее растворной составляющей / Г.В. Несветаев, Ю.Ю. Лопатина // Наукoведение, Том 7, №5 (2015) [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://naukovedenie.ru/PDF/48TVN515.pdf>
88. Несветаев, Г.В. О прочности бетона с каркасной структурой / Г.В. Несветаев, С.В. Халезин // Наукoведение, Том 7, №3 (2015)[Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN315.pdf>
89. Несветаев Г.В., Халезин С.В. Модель для оценки влияния рецептурных факторов на коэффициент ползучести бетона / Г.В. Несветаев, С.В.

Халезин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017)[Электронный ресурс] –Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN117.pdf>

90. Несветаев, Г.В. Структура и свойства бетонов с суперпластификаторами Glenium на портландцементе заводов «Пролетарий» и «Верхнебаканский» / Г.В. Несветаев, И.В. Корчагин // Наукоеведение, Том 7, №5 (2015) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/116TVN515.pdf>
91. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Лопатина Ю.Ю., Халезин С.В. О морозостойкости бетонов с суперпластификаторами// Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016)[Электронный ресурс] –Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf>
92. Несветаев, Г.В. Деформационные свойства бетонов классов В40 – В60 из высокоподвижных смесей на материалах Вьетнама / Г.В. Несветаев, ВуЛеКуен // Наукоеведение. Том 7, №3 (2015) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN315.pdf>
93. Несветаев, Г.В. Некоторые свойства напрягающих бетонов с добавкой «Эмбэлит» / Г.В. Несветаев, Л.Н. Хомич // Научное обозрение. – 2014. – №. 10. – С. 642 – 645.
94. Строительство-2008. Несветаев, Г.В. Применение модели Хирча для прогнозирования меры ползучести бетона/ Г.В. Несветаев. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2008. – С. 101 – 102.
95. Несветаев, Г.В., Шубина И.А. Способ определения модуля упругости и характеристики ползучести бетонов и растворов: Патент РФ № 2339945 27.11.2008.
96. Несветаев, Г.В. О прочности и модуле упругости самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов/ Г.В. Несветаев, С.В. Халезин // Современные строительные материалы, технологии и конструкции.– Грозный: ГГНТУ, 2015. – Т.1. – С. 46 – 50.

97. Пауэрс, Т. К. Физические свойства цементного теста и камня / Т.К. Пауэрс // 4-й Межд. Конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 386 – 412.
98. Пинус, Э.Р. Контактные слои цементного камня в бетоне и их значение / Э.Р. Пинус // Структура, прочность и деформации бетонов. – М., 1966. – С.45 – 49.
99. Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций: под общей ред. С.В. Александровского. М.: Стройиздат, 1976. – 351 с.
100. Ползучесть строительных материалов и конструкций: под общей ред. А.Р. Ржаницына. М.: Стройиздат, 1964. – 387 с.
101. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). –М., 2005.
102. Проблемы усадки и ползучести бетона. М.: Стройиздат, 1974. – 237с.
103. Прочность, структурные изменения и деформации бетона: под общей ред. А.А. Гвоздева. – М., Стройиздат, 1978. – 299 с.
104. Рамачандран, В. Наука о бетоне: монография / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М., Стройиздат. 1986, 280с.
105. Резван, И.В. Несущая способность трубобетонных колонн с учетом дилатационного эффекта: монография / И.В. Резван, Г.В. Несветаев, Д.Р. Маилян, А.В. Резван. –Ростов н/Д, РГСУ, 2012. – 187 с.
106. Рыбьев, И.А. О контактной зоне цементного камня с заполнителем в бетоне / И.А. Рыбьев, Ю.В. Чеховский, С.М. Матязов // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении. – Белгород, 1989. – С.5 – 6.
107. Рыскин, М.Н. К вопросу подбора состава высокопрочного бетона/М.Н. Рыскин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь. – Брест: БГТУ, 2001. – С. 341 – 346.

108. Серегин, И.Н. Ползучесть бетона в дорожно-мостовых сооружениях: монография / И.Н. Серегин. – М.: Транспорт, 1965. – 146 с.
109. Современные проблемы строительного материаловедения: материалы пятых академических чтений РААСН.– Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. акад., 1999. – 672 с.
110. Современные проблемы строительного материаловедения: материалы седьмых академических чтений РААСН. – Белгород: Белгород. гос. тех. акад. строит. мат., 2001. – Ч.1. – 729 с.
111. Соломатов, В.И. Интенсивная технология бетонов: монография / В.И. Соломатов, М.К. Тахиров, Мд. Тахер Шах. – М.: Стройиздат, 1989. – 270 с.
112. Соломатов, В.И. Прочность композиционных строительных материалов каркасной структуры/ В.И. Соломатов, Ю.Б. Потапов// Изв. вузов: Строительство и архитектура. – 1986. – № 7. – С. 57 – 58.
113. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород: под общей ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. М.: Недра, 1975. – 279 с.
114. Стольников, В.В. Трещиностойкость бетона: монография / В.В. Стольников, Р.Е. Литвинова. – М.: Энергия, 1972. – 112 с.
115. Бетон и железобетон – пути развития. Каприелов, С.С. Структура и свойства высокопрочных бетонов, содержащих комплексный органоминеральный модификатор «ЭМБЭЛИТ»/ С.С. Каприелов [и др.]. – М., 2005. – Том 3. – С.657 – 671.
116. Бабков, В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов: монография/ В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. – Уфа, ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
117. Суздальцев, О.В. Долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород: автореф. дисс. канд.техн.наук: 05.23.05 /Олег

- Владимирович Суздальцев. – Пенза: ПГУАС, 2015.–21с.
118. Та, Ван Фан Самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с золой рисовой шелухи и метаксаолином: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Та Ван Фан. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013. – 24 с.
  119. Холмянский, М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность: монография / М.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.
  120. Улицкий, И.И. Ползучесть бетона: монография / И.И. Улицкий. – Киев, 1978. – 167 с.
  121. Улицкий, И.И. Определение величин деформации ползучести и усадки бетонов: монография /И.И. Улицкий. – Киев, 1963. – 348 с.
  122. Улицкий, И.И. Усадка и ползучесть бетонов заводского изготовления: монография / И.И. Улицкий, С.В. Киреева. –Киев., Изд-во: Будівельник. 1965. – 106 с.
  123. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов: монография / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
  124. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости: монография / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
  125. Шестоперов, С.В. Технология бетона: монография /С.В. Шестоперов. – М.: Высш. шк., 1977. – 472 с.
  126. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси: под общей ред. П.Г. Комохова. – С.-Пб.: НПО «Профессионал», 2007. – 804.
  127. Цилосани, З.Н. Усадка и ползучесть бетона: монография /З.Н. Цилосани. – Тбилиси, 1963. – 210 с.
  128. Цилосани, З.Н. Усадка и ползучесть бетона: монография / З.Н. Цилосани. Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 226 с.
  129. Чеховский, Ю.В. Исследование контактной зоны цементного камня с крупным заполнителем / Ю.В. Чеховский, А.И. Спицин, Ю.А. Кардаш//

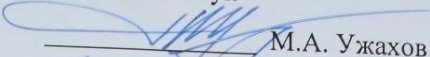
- Коллоидный журнал. 1988. –№6. – С. 1216-1218.
130. Физико-химические исследования цементного камня и бетона. Влияние минералогического состава заполнителей на формирование структуры и механические свойства контактной зоны бетона/ С.Х. Ярлушкина, А.А. Ерамян, З.М. Ларионова З.М.– М.: НИИЖБ, 1972. – С. 56 – 61.
  131. Ярлушкина, С.Х. Физико-химические процессы, их роль в формировании прочности цементного камня с заполнителям / С.Х. Ярлушкина // Структурообразование бетонов и физико-химические методы его исследования. –М.: НИИЖБ, 1980. –С.60 – 69.
  132. Bertacchi, P. Adherence Entre Aggregate et Ciment et son Influence sur les Caracteristiques des Betons. // Rev. des Mater. de Const. –1970. –№659–660. – pp.243–249.
  133. Scrivener Karen L., Crumbie Alison K., Pratt P.L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete. // Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec.2–4, 1987. –Pittsburgh (Pa), - 1988. –pp.87–88.
  134. Skalny J., Mindess S. Physico-chemical Phenomena at the Cement Paste. Aggregate Interface. //10th Int. Symp. React. Solids, Dijon, 27 Aug - 1 Sept., 1984. –Dijon. –1984. –pp.223–224.
  135. Brooks, J.J., MegatJohari M.A. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete// Cement and concrete composites. – 23 (2001) 495 – 502.
  136. Nesvetaev, G.V. On the possibility of calculating the elastic modulus of concrete / G.V. Nesvetaev, G.A. Airapetov / Festschrift zum 65. Geburtstag von prof. Dr.-IngF.S.Rostasy. Braunschweig, 1997.– Heft 128.–p.115-122.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

## Приложение А. Внедрение результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ИНСУЛА»  
канд. техн. наук
  
М.А. Ужахов

«28» 10 2017 г.

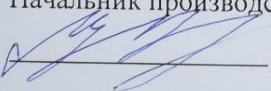
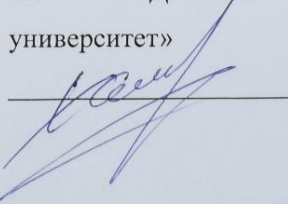
## Протокол

технического совещания ООО «ИНСУЛА» по рассмотрению результатов диссертационного исследования ассистента кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственной университет» Халезина С.В. «Прочность, деформационные свойства и морозостойкость бетонов каркасной структуры, полученных погружением крупного заполнителя в растворную составляющую» с целью принятия результатов к внедрению в производство.

**Слушали:** начальника производства Муженского В.А. о целесообразности применения результатов, полученных в диссертационном исследовании Халезина С.В. «Прочность, деформационные свойства и морозостойкость бетонов каркасной структуры, полученных погружением крупного заполнителя в растворную составляющую», для выпуска нового вида продукции – растворной составляющей для высокопрочных бетонов, получаемых из высокоподвижных смесей методом раздельного бетонирования в условиях объектов, территориально удаленных от производителей бетонных смесей.

**Постановили:** принять рецептуры растворной составляющей для высокопрочных бетонов, получаемых из высокоподвижных смесей методом раздельного бетонирования, для производства на заводе сухих строительных смесей ООО «ИНСУЛА».

Начальник производства ООО «ИНСУЛА»

  
В.А. Муженский
Ассистент кафедры «Строительство  
уникальных зданий и сооружений» ФГБОУ  
ВО «Донской государственной  
университет»
  
С.В. Халезин