

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Лешканов Андрей Юрьевич

**ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ С ВЫСОКОЙ РАННЕЙ
ПРОЧНОСТЬЮ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
СОКРАЩЕННЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ
ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Добшиц Лев Михайлович

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРОБЛЕМЫ	
ПОЛУЧЕНИЯ БЕТОНОВ С ВЫСОКОЙ РАННЕЙ ПРОЧНОСТЬЮ	14
1.1 Актуальность темы исследования.....	14
1.2 Современные способы получения бетонов с высокой ранней прочностью 15	
1.3 Ускорение твердения бетонов методом тепловлажностной обработки	17
1.4 Предварительное выдерживание бетонов при ТВО	22
1.4.1 Предварительное выдерживание бетонных смесей с добавлением суперпластификаторов	24
1.6 Влияние пластифицирующих добавок на физико-механические свойства бетонов.....	29
1.6.1 Влияние пластифицирующих добавок на свойства бетонов.....	29
1.6.2 Традиционные пластификаторы для бетонов	31
1.6.3 Поликарбоксилатные суперпластификаторы.....	36
1.6.4 Особенности применения суперпластификаторов с ТВО	41
1.7 Выводы по главе 1	43
ГЛАВА 2 ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ	
ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ.....	45
2.1 Характеристика материалов, используемых в исследованиях	45
2.1.1 Портландцемент	45
2.1.2 Мелкий заполнитель	46
2.1.3 Крупный заполнитель	47
2.1.4 Суперпластификаторы	48
2.1.5 Вода.....	50
2.2 Методы исследования	50
2.2.1 Методика определения сроков схватывания цементных паст.....	50

2.2.4 Методика определения прочности бетонных образцов по контрольным образцам	53
2.2.5 Рентгенофазовый анализ.....	53
2.2.6 Оптическая микроскопия.....	54
2.2.7 Сканирующая электронная микроскопия	55
2.3 Планирование эксперимента с помощью математического моделирования	56
2.3.1 Концепция математического моделирования	56
2.3.2 Регрессионный анализ	57
2.4 Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В УСЛОВИЯХ ТВО.....	61
3.1 Исследование сроков схватывания модифицированных цементных паст при различных температурах	61
3.1.1 Сроки схватывания цементных паст, модифицированных СП на основе ПКЭ.....	61
3.1.2 Сроки схватывания цементных паст, модифицированных СП на основе СНФ	63
3.2 Исследование физико-механических свойств цементного камня, модифицированного ПКЭ.....	65
3.3 Особенности формирования фазового состава гидратных новообразований в модифицированном цементном камне при различных режимах ТВО	67
3.3.1 Структурообразование цементного камня при различных периодах предварительного выдерживания ТВО.....	67
3.3.2 Исследование фазового состава продуктов новообразований при модифицировании цементного камня суперпластификаторами различного действия.....	72
3.4 Исследование структуры цементного камня при различных периодах предварительного выдерживания ТВО методом электронной микроскопии	80

3.5 Исследование микроструктуры цементного камня методом сканирующей электронной микроскопии.....	81
3.6 Рабочая гипотеза	87
3.7 Выводы по главе 3.....	89
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТВО.....	91
4.1 Прочностные свойства цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификаторами различного типа.....	91
4.2 Прочностные свойства цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификаторами на основе ПКЭ и СНФ при режиме ТВО с предварительным выдерживанием и без него.....	94
4.3 Исследование набора прочности после ТВО цементно-песчаных растворов относительно 28-суточной.....	102
4.3.1 Сравнение набора прочности при режимах с различными периодами предварительного выдерживания	102
4.3.2 Сравнение набора прочности при режимах с различной длительностью изотермического прогрева ТВО	104
4.4 Выводы по главе 4.....	107
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО ТИПА НА ПРОЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ТВО.....	108
5.1 Планирование эксперимента с помощью математического моделирования	108
5.2 Интерпретация результатов.....	109
5.2.1 Результаты прочности бетонов после ТВО без предварительного выдерживания	110
5.2.2 Результаты прочности бетонов после ТВО с предварительной выдержкой в течение 1 ч	118

5.2.3	Результаты прочности бетонов после ТВО с предварительной выдержкой в течение 2 часов	122
ГЛАВА 6 ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ		130
6.1	Изготовление перемычек брускового типа	130
6.2	Разработка рекомендаций по применению низкотемпературных режимов ТВО	131
6.3	Выводы по главе 6	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		136
ПРИЛОЖЕНИЕ А		165
ПРИЛОЖЕНИЕ Б		174
ПРИЛОЖЕНИЕ В		183
ПРИЛОЖЕНИЕ Г		192
ПРИЛОЖЕНИЕ Д		193
ПРИЛОЖЕНИЕ Е		197
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж		199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Сокращение сроков сборного и сборно-монолитного домостроения напрямую зависит от процесса производства железобетонных изделий (ЖБИ). На сегодняшний день производители ЖБИ используют ряд технологических решений для изготовления сборного конструкционного бетона, таких как электропрогрев, применение теплых стендов на линиях формования, тепловлажностная обработка (ТВО). С учетом постоянного роста цен на энергоресурсы перспективным представляется возможность снижения затрат на прогрев ЖБИ, позволяющий снизить себестоимость производства и развивать предприятия в условиях конкурирующей среды.

Одним из основных способов ускорения набора ранней прочности бетонов является ТВО, применение которой предоставляет возможность получения марочной прочности в течение цикла пропаривания. Однако эта технология приводит к повышенному расходу цемента и энергоресурсов, что, несомненно, увеличивает стоимость производимых железобетонных изделий. Кроме того, длительность всего цикла данной технологии (16 часов и более) приводит к снижению оборачиваемости форм и, как следствие, замедлению темпов выпуска продукции.

Получение железобетонной продукции с заданной отпускной прочностью возможно не только посредством изменения температурно-влажностных параметров твердения бетона, но и применением химических добавок, снижающих водопотребность смесей, увеличивающих скорость кристаллообразования цементных систем. Наиболее широкое применение при модифицировании структуры бетонов нашли поверхностно-активные вещества – суперпластификаторы (СП), применение которых позволяет регулировать такие свойства бетонов как прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, плотность и др.

В связи с этим, исследования в данной работе, направленные на получение высокой ранней прочности при пониженных затратах на энергоресурсы и увеличение темпов производства, являются актуальными и обоснованными.

Степень разработанности темы исследования.

Изучению эффективности пластифицирующих добавок на свойства бетонов посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых: Л.А. Алимова, В.В. Бабкова, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, М.И. Брусера, А.И. Вовка, Б.В. Гусева, В.Т. Ерофеева, В.С. Демьяновой, Л.М. Добшица, В.С. Изотова, С.С. Каприелова, Л.И. Касторных, П.Г. Комохова, В.И. Кондращенко, Л.Я. Крамар, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.А. Перфилова, Т.М. Петровой, В.Б. Ратинова, Ш.М. Рахимбаева, Р.З. Рахимова, Т.И. Розенберга, С.М. Рояка, Г.С. Рояка, А.Ф. Серенко, Н.П. Синайко, О.М. Смирновой, А.В. Ушерова-Маршака, В.Р. Фаликмана, А.Е. Шейкина, А.В. Шейнфельда, S.Nakamura, A.M. Neville, H. Okamura, M. Ouchi, J. Plank, J. Petit, V. Ramachandran, R. Rixom, W. Schmidt, K. Yamada и др. [4–7; 10–13; 17; 24; 27; 43; 44; 46; 50–52; 55–57; 59; 66; 67; 69; 73–78; 81; 88; 89; 109; 120; 124; 125; 127–129; 133; 139–141; 144; 147–150; 153; 160; 161; 165; 167; 168; 170; 175; 177–180; 186; 187; 193; 215; 219–221; 223–225; 227; 228; 230; 232; 234; 235; 237; 245–247; 249]. Общепринятым считается, что применение известных пластифицирующих добавок в бетонных смесях оказывает негативное действие на гидратацию цемента на ранних сроках. Данная картина связана с увеличением индукционного периода твердения цемента в присутствии ПАВ. Однако применение новейших определенных видов суперпластификаторов позволяет направленно регулировать сроки схватывания в сторону ускорения и прочность на сжатие в первые 8-24 ч твердения.

Существенный вклад в изучение роли ТВО при твердении бетонов внесли В.В. Бабицкий, Ю.М. Баженов, В.В. Бубело, Ю.М. Бутт, Л.Я. Волосян, В.Б. Гусев, А.Д. Дмитриевич, Л.М. Добшиц, В.Г. Зазимко, И.Б. Заседателев, А.И. Звездов, А.Г. Комар, Л.А. Малинина, Н.Б. Марьямов, С.А. Миронов, О.П. Мчедлов-Петросян, А.И. Панченко, Т.М. Петрова, Г.С. Рояк, О.М. Смирнова, А.Р. Соловьянчик, А.Е.

Шейкин, С.В. Федосов, D. Heinz, U.Ludwig, A.M. Neville, J. Petit, W. Schmidt и др. [5; 6; 110; 114–118; 120; 123; 131; 136; 18; 148; 150; 172; 173; 176; 197; 209; 214–216; 19; 222; 235; 237; 240; 41–43; 47; 63; 70]. Ученые сходятся во мнении, что применение ТВО перспективно и существенно в вопросах ускорения гидратации и структурообразования цементов. В большинстве работ отмечается, что преждевременный подъём температуры отрицательно отражается на конечной прочности бетона. Безусловно, такая ситуация приводит к увеличению продолжительности ТВО, а также при повышенных температурах пропаривания существенно увеличиваются затраты на энергоресурсы.

Цель диссертационного исследования – разработка низкотемпературных режимов тепловлажностной обработки бетонов с использованием добавок на основе поликарбоксилатных эфиров, обеспечивающих получение в ранние сроки высокой проектной прочности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние пластифицирующих добавок на формирование свойств цементных паст, растворов и бетонов.
2. Исследовать влияние технологии тепловлажностной обработки на формирование структуры пластифицированных цементных паст, растворов и бетонов.
3. Экспериментально установить влияние суперпластификаторов на физико-механические свойства и структурообразование цементных систем.
4. Экспериментально исследовать низкотемпературные режимы ТВО на формирование свойств пластифицированных цементных систем: цементных паст, растворных смесей и тяжелого бетона.
5. Разработать математические модели описания ранней прочности пластифицированных бетонов в зависимости от содержания модификаторов,

длительности и температуры изотермического прогрева и времени предварительного выдерживания ТВО.

6. Применить результаты исследований в производственных условиях при изготовлении железобетонных сборных конструкций с использованием низкотемпературного режима ТВО.

Объект исследования – бетоны для сборных ЖБИ с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ).

Предмет исследования – режимы тепловлажностной обработки бетона, время предварительного выдерживания и пропаривания, температура прогрева, прочность на сжатие.

Научная новизна:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения ЖБИ из бетонов, модифицированных СП на основе поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ), с высокой распалубочной прочностью при использовании низкотемпературного режима ТВО.

2. Предложена и подтверждена гипотеза об изменении кинетики процессов гидратации цементных систем с ПКЭ при пониженных температурах ТВО без предварительной выдержки.

3. Научно обосновано, что добавка ПКЭ приводит к блокированию положительно-потенциальных минералов трехкальциевого алюмината и браунмиллерита, в связи с чем при ТВО цементных систем с ПКЭ за первые 2 часа обработки минерал $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ детектируется вдвое большем количестве в сравнении с модифицированными составами на основе сульфированных нафталинформальдегидов (СНФ).

4. Впервые исследовано положительное влияние низкотемпературных режимов ТВО на формирование ранней прочности бетонов с суперпластификатором на основе ПКЭ Sika Viscocrete 24HE.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Установлено, что ранний этап ТВО без предварительной выдержки характеризуется повышенным количеством адсорбции ПКЭ на $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что блокирует образование этtringита на данном сроке и, как следствие, замедляет процесс гидратации.

- Предложена и доказана возможность увеличения ранней прочности бетонов при использовании ПКЭ в условиях низкотемпературных (40 – 60 °С) режимов ТВО.

- Разработаны низкотемпературные режимы ТВО с сокращенным периодом предварительной выдержки пластифицированных смесей для получения бетонов с высокой ранней прочностью, использование которых при производстве ЖБИ позволит значительно увеличить оборачиваемость форм, приведет ресурсо- и энергосбережению без ухудшения структуры и свойств цементных бетонов;

- Получено математическое описание величины предела прочности при сжатии бетонов, получаемых при сокращенных низкотемпературных режимах ТВО, предложенных в настоящей работе, в зависимости от времени предварительного выдерживания, дозировки ПКЭ, а также температуры и длительности изотермического прогрева ТВО.

- Разработаны рекомендации по применению низкотемпературных режимов ТВО при изготовлении сборных железобетонных изделий и конструкций.

- Результаты исследования внедрены на производстве при изготовлении железобетонных перемычек по предложенному низкотемпературному режиму ТВО согласно разработанным рекомендациям. Изготовленные изделия смонтированы на строящемся объекте в г. Йошкар-Ола. Результаты работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ПГТУ» при подготовке бакалавров и магистров направлений 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство» в дисциплинах «Строительные материалы» и «Долговечность строительных материалов и конструкций».

Методология и методы исследования.

Методологической основой диссертационного исследования послужили результаты фундаментальных и прикладных научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области модифицирования бетонных смесей и ТВО; современные положения теории и практики материаловедения и технологии бетонов; общенаучные методы, базирующиеся на обобщении, экспериментальных исследованиях и анализе полученных данных.

Методическую основу диссертационной работы составляют физико-химические и физико-механические методы испытаний, статистические методы обработки, анализа и математического моделирования результатов исследований. Проведение экспериментальных исследований осуществлялось с применением действующих ГОСТ и современных аналитических способов определения характеристик пластифицированных цементных систем, а также приборов и оборудования, прошедших поверку и удовлетворяющих требованиям действующих стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сроков схватывания цементных паст, прочности, пористости и плотности камня, модифицированного суперпластификаторами на основе ПКЭ и СНФ в условиях повышенных температур.
2. Результаты РФА и микроструктурного анализа пластифицированного цементного камня после низкотемпературных режимов ТВО.
3. Результаты экспериментальных исследований прочности цементно-песчаных растворов с добавками ПКЭ и СНФ при различных режимах ТВО.
4. Результаты исследования прочности на сжатие бетонов, модифицированных СП на основе ПКЭ, при низкотемпературных режимах ТВО с пониженной изотермической температурой выдерживания и уменьшенным временем пропаривания, при снижении времени технологических операций (предварительного выдерживания бетона и продолжительности пропаривания).

5. Математические модели экспериментально полученных значений прочности бетонов после низкотемпературных режимов ТВО в зависимости от дозировки суперпластификатора и параметров ТВО (время предварительного выдерживания, температура и длительность изотермического прогрева).

Степень достоверности результатов исследования, изложенных в диссертационной работе, обеспечена применением классических положений материаловедения; достаточным объемом экспериментальных данных и обработкой их с помощью статистических методов, обеспечивающих адекватность проведенного эксперимента совместно с действующими нормативами и правилами проведения исследований; применением научно-обоснованных методик испытаний с использованием современных поверенных лабораторных приборов и оборудования в аттестованной лаборатории.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2014 – 2019); Международной междисциплинарной научной конференции «Вавиловские чтения» (г. Йошкар-Ола, 2014 – 2018); Всероссийском студенческом форуме «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России» (г. Йошкар-Ола, 2017); Международной научно-практической конференции молодых преподавателей, аспирантов и студентов «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики регионов России» (г. Йошкар-Ола, 2017); Всероссийской (с международным участием) научной конференции студентов и молодых ученых «Культура инженера: вчера, сегодня, завтра» (г. Йошкар-Ола, 2016); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Стратегия развития региона на основе модернизации приоритетных отраслей его экономики» (г. Йошкар-Ола, 2016); Международной научно-практической конференции «Стратегии развития региона на основе модернизации

приоритетных отраслей его экономики» (г. Йошкар-Ола, 2018), на XXIII Международной научной конференции «Construction the Formation of Living Environment» FORM-2020 (Вьетнам, г. Ханой, 2020), на XXIV Международной научной конференции «Construction the Formation of Living Environment» FORM-2021 (г. Москва, 2021), Международной конференции «Conference on materials physics, building structures and technologies in construction, industrial and production engineering» MPCPE-2021 (г. Владимир, 2021); заседаниях кафедры строительных технологий и автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (г. Йошкар-Ола, 2019); заседаниях кафедры «Строительные материалы и технологии» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (г. Москва, 2021). Результаты исследования удостоены призывания в программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») по направлению «Современные материалы и технологии их создания» с проектом «Бетон с комплексным модификатором» и отмечены грантом № 0004911 по договору 2708ГУ1/2014 (2014 г.).

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕТОНОВ С ВЫСОКОЙ РАННЕЙ ПРОЧНОСТЬЮ

1.1 Актуальность темы исследования

В современной строительной отрасли особо важной и актуальной стоит проблема ускорения темпов строительства. Потребители заинтересованы в получении высокопрочных и долговечных изделий в максимально короткие сроки. Производители железобетонных изделий стремятся к большей оборачиваемости опалубки, снижению затрат на энерго- и ресурсозатраты.

Твердение бетона с минеральным вяжущим на основе портландцементного клинкера – процесс продолжительный. Наиболее интенсивно он реализуется на первых сутках. Реальная прочность бетона, достигаемая в возрасте 28 суток нормального твердения, безусловно, не обеспечивает современных требований. Производство бетона с высокой ранней прочностью возможно с использованием специального быстротвердеющего вяжущего или с использованием технических методов ускорения. Несомненно, на заводских линиях основным способом достижения высокой прочности является ТВО. В общем объеме производства сборного железобетона около 85 % ЖБИ производится именно с применением названной технологии. Однако, начиная с середины 50-х годов прошлого столетия, ТВО не претерпела значительных изменений, нуждаясь в значительных затратах энергоресурсов, использовании цементов высоких марок с увеличенным расходом на 1 м³ бетона [6; 12; 18; 19; 71; 130; 139; 172; 235; 238].

В практике современного бетоноведения всё чаще применяются химические модификаторы, напрямую влияющие на структурообразование цементного камня [5–7; 10–13; 24; 51; 65; 68; 69; 72; 75; 87; 120; 130; 132; 139; 148; 167–170; 191; 192; 215; 216; 219; 220; 228; 232; 237; 245–247; 249]. Одними из них являются пластифицирующие добавки, применение которых способно редуцировать водоцементное отношение, снизить капиллярную пористость камня,

положительно влиять на физико-технические свойства бетонов и технологические показатели бетонных смесей. Однако, применение традиционных пластификаторов и большинства современных суперпластификаторов не позволяет обеспечить высокую раннюю прочность вследствие продолжительного эффекта пластифицирования. Поэтому выбор темы исследования, направленной на дальнейшее совершенствование технологии изготовления ЖБИ является актуальным и обоснованным.

1.2 Современные способы получения бетонов с высокой ранней прочностью

В зависимости от номенклатуры изготавливаемых конструкций, условий бетонирования, требуемых сроков набора прочности для интенсификации твердения бетонов предлагается ряд мероприятий:

- тепловлажностная обработка [5; 18; 19; 61; 62; 79; 110; 114–118; 130; 164; 166; 189; 215; 216; 232];

- контактный обогрев и электропрогрев бетона [5; 6; 26; 173; 216];

- автоклавная обработка для производства силикатных бетонов [5; 216; 228];

- модифицирование составов смесей ускорителями твердения (электролиты; добавки, реагирующие с вяжущими с образованием труднорастворимых соединений; кристаллические затравки) [5; 11; 12; 20; 68; 69; 72; 139; 140; 215; 228; 232];

- применение комплексных добавок полифункционального действия, (например, включающих суперпластификатор и ускоритель твердения); применение новейших суперпластификаторов с определенной молекулярной структурой ПАВ, в частности длиной основной и боковых цепей [10; 12; 60; 69; 75; 77; 138; 151; 168; 232];

- применение высокодисперсных минеральных наполнителей [7; 71; 72; 77; 88; 139; 216; 228];

- интенсификация твердения во время перемешивания, формования и уплотнения бетонной смеси [5; 215; 228];

- применение комплексных органоминеральных добавок [5; 10; 11; 69; 77; 138; 139; 228; 232];

- применение специальных видов цемента с определенным минералогическим составом и высокой удельной поверхностью [25, 26, 35, 71, 132, 139, 142];

- комбинированный метод, подразумевающий совместное применение нескольких способов ускорения твердения бетона [5; 6; 11; 12; 60; 69; 75; 77; 132; 138; 148; 164; 174; 216; 221; 232; 235; 237; 246].

Большое количество методов и способов ускорения твердения бетона тесно связано с технологией строительства, климатическим фактором, с типами конструкции, видами бетона, поэтому эффективность их применения в условиях современного строительства требует подробного анализа.

Многие физико-химические процессы, напрямую влияющие на твердение цемента, ещё не до конца изучены, что связано с возникновением сложных, порой противоречивых процессов при формировании новообразований. Известно, что существует несколько теорий твердения цемента при их взаимодействии с водой.

А. Ле Шателье в 1887 г. выдвинул теорию твердения цемента, называемой **кристаллизационной**, согласно которой вяжущее сначала растворяется в воде с образованием гидратных соединений. Последние формируют пересыщенный раствор, из которого выпадают в виде тонкодисперсных частичек – кристаллитов, срастание и переплетение которых друг с другом вызывает твердение системы [5; 25; 144; 162; 215].

По **коллоидной теории** Михаэляса (1893 г.) при смешении цемента с водой вначале образуются пересыщенные растворы (гидрогели) гидроксида кальция и гидроалюминатов кальция. Они выделяются из раствора в виде осадков кристаллической структуры, не принимая активного участия в гидравлическом твердении. На ранних стадиях твердения образующиеся гидрогели содержат много воды. Из этой массы более глубоко расположенные слои цементных зерен

отсасывают воду, причем масса уплотняется и обеспечивает твердение системы. В результате образуется дисперсная коллоидная система, прочность которой увеличивается с уплотнением [25; 144; 162; 215; 216].

Академик **А.А. Байков** (1923 г.) разработал теорию, обобщив взгляды Ле-Шателье и Михаэльса на физико-химическом уровне, выделив в твердении цементного вяжущего три основных периода: растворение, коллоидацию и кристаллизацию [25; 120; 142; 144; 216].

1.3 Ускорение твердения бетонов методом тепловлажностной обработки

Среди большинства способов ускорения твердения бетонов наиболее широкое распространение в заводских условиях получил **метод тепловлажностной обработки**. Развитию теории и практики технологии ускорения бетона при его обогреве во влажных условиях среды способствовали многочисленные исследования [18; 19; 22; 62; 110; 114–118; 142; 215].

Набор прочности бетона при ТВО проходит в 3 этапа аналогично бетону, который твердеет при нормальных условиях:

1 этап – незначительный прирост прочности (период, во время которого формируется начальная структура цементного камня);

2 этап – ускоренный набор прочности (период упрочнения структуры камня);

3 – медленный рост прочности с возможными периодическими сбросами (период стабилизации структуры).

Стандартный цикл ТВО имеет 4 основных этапа [6; 116; 130; 164; 166; 216]:

1) предварительная выдержка без подачи тепла;

2) период подъема температуры;

3) изотермический прогрев бетона;

4) охлаждение изделий.

Ещё в 30-х гг. XX столетия советскими учеными было установлено положительное влияние **предварительного выдерживания** свежесформованных изделий перед ТВО. Известно, что раннее повышение температуры, в том числе в таких условиях, при которых влага с заформованной бетонной смеси не испаряется, приводит к снижению прочности бетона в проектном возрасте, а также его морозостойкости [19; 114–117].

Во время периода **подъема температуры** в пропарочной камере температура возрастает до уровня максимальной температуры изотермического выдерживания.

Скорость подъема температуры при ТВО разная, рекомендуется применять от 10 до 30 °С в час [110; 114; 116; 117; 216].

Время повышения температуры в железобетонных изделиях ученые связывают с периодом начала тепловыделения цемента. При этом в некоторых случаях целесообразно заливать бетонную смесь в предварительно разогретую форму. Рекомендуется производить прогрев изделия в течение первых 90-120 минут после начала активного тепловыделения цемента за счет собственного тепла гидратации, прервав подачу пара [26; 120; 164].

Прогрев ЖБИ на первоначальном этапе ТВО происходит благодаря конвективному теплообмену от паровоздушной среды, в которой твердеет изделие, и конденсации пара [61; 62; 173]. Конденсат при этом оседает на поверхности производимого ЖБИ в виде мелких капель воды. Т.к. температура прогреваемого изделия ниже температуры окружающей его среды, то давление пара в камере превышает давление пара в производимом изделии; в результате последнее поглощает определенное количество воды, образующейся на его поверхности [164]. Из-за роста влажности верхнего слоя во все еще твердеющем бетоне вода перемещается к центру, может наблюдаться незначительное увеличение линейных размеров, особенно в верхних слоях. В то же время в твердеющем бетоне имеют место контракционные явления, приводящие уменьшению объема и способствующие миграции воды в бетон [19; 47; 114; 116].

Поэтому технологам на заводах ЖБИ следует тщательно подходить к вопросу подъема температуры при проектировании режима ТВО. При слишком быстром темпе роста температуры может складываться структура цементного камня с микронарушениями, в том числе на границе его контакта с заполнителями [22; 116; 164].

Варьирование скорости прогрева при ТВО некоторые исследователи связывают массивностью изделий и подвижностью бетонной смеси.

Период повышения температуры наряду с периодом предварительной выдержки бетона, фактически, является подготовительным. От этих периодов зависит эффективность последующего твердения бетона, и как следствие качество производимого ЖБИ. Даже тщательное соблюдение режима ТВО на дальнейших этапах не может устранить недостатки, возникшие на начальном периоде ТВО. Кроме того, при термообработке изделий в формах с открытой поверхностью быстрое повышение температуры приводит к набуханию этой поверхности, что сказывается на эстетических свойствах (на качестве поверхности) производимых изделий [19; 116; 215].

В большинстве случаев на реальных заводских условиях применяется ступенчатый подъем температуры, т. е. может использоваться несколько периодов подъема температуры и изотермического прогрева [15; 19; 121; 135].

Скорость подъема температуры при ТВО в зависимости от начальной прочности бетона на сжатие, достигнутой при предварительной выдержке, может приниматься по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемая скорость подъема температуры

Прочность бетона на сжатие после предварительного выдерживания, (МПа)	Скорость подъема температуры, (°С/ч)
0,10÷0,20	10÷15
0,20÷0,40	15÷25
0,40÷0,50	25÷35
0,50÷0,60	35÷45
Более 0,60	45÷60

При высокой скорости подъема температуры бетонной смеси при ТВО физический процесс температурного расширения опережает химические процессы при структурообразовании цементного камня [19; 25; 120].

Следующий и самый продолжительный этап ТВО – **период изотермического прогрева**, при котором изделие твердеет при принятой постоянной температуре.

Как следует из правила Вант-Гоффа, скорость реакций возрастает с повышением температуры. Так, при температуре 20 °С бетон умеренно жесткой консистенции за первые 3-5 суток приобретает 50 % марочной прочности, а остальные 50 % – на 23-28 сутки при условии сохранения нормальных температурно-влажностных условий. Подобная тенденция наблюдается и при термовлагообработке. Соответственно, в первые часы изотермического прогрева бетон интенсивно набирает прочность. В дальнейшем, с течением времени скорость набора прочности снижается [66, 129, 156].

Чем выше температура пропаривания, тем интенсивнее темп роста прочности бетона. Немаловажно учитывать минералогический состав применяемого цемента, а также принимать во внимание группу эффективности вяжущего при пропаривании в паспорте его качества. Так, например, с повышением температуры пропаривания прочность затвердевшей смеси цемента, включающей кремнеземные добавки, значительно возрастает, но степень снижения прочности будет возрастать с увеличением активности бездобавочных портландцементов [216].

Если тепловыделение при гидратации цементного вяжущего в теле твердеющего изделия не приводит к увеличению температуры, превышающей температуру в камере, то это явление играет положительную роль. Данная ситуация благоприятно влияет на набор прочности бетона, более быстрому и равномерному прогреванию изделия по всему сечению, способствует уменьшению деструктивных температурных напряжений, а также снижает энергозатраты [166]. В течение первых 180-240 минут ТВО тепло, выделившееся

в результате гидратации портландцемента, равно примерно 20% количества тепла, идущего от теплоносителя [110; 117].

В результате формирования новых химических связей также происходит интенсивное тепловыделение. Поэтому технологи на заводских линиях при назначении режимов ТВО должны учитывать опасность превышения температуры кипения воды, так как в этом случае возможно возникновение высоких внутренних напряжений в цементном камне, структура которого еще окончательно не сформировалась [135; 164].

С течением времени ближе к концу изотермического прогрева благодаря росту новообразований уплотняется и упрочняется первичный сросток, а затем вследствие непрерывно идущей гидратации в нем возникает напряженное состояние, нарушающее целостность сростка и снижающее прочность цементного камня. Поэтому прочность бетона, твердеющего при ТВО, практически всегда ниже прочности камня, твердеющего при нормальных условиях.

Далее формирующиеся на поверхности цемента кристаллы постепенно перекрывают доступ воды к непрореагировавшему остатку частиц цемента. Это свидетельствует о том, что в цементном камне сохраняется часть непрогидратирующегося цементного, а значит, в дальнейшем имеется потенциал прироста прочности и возможности так называемого «самозалечивания» цементного камня при образовании в нем трещин [134].

Завершающим этапом в ТВО является **период понижения температуры**.

После окончания периода прогрева прекращается подача пара в камеру, и изделие выдерживается в форме около 120-180 минут. Скорость снижения температуры прямо пропорциональна степени герметизации камеры. После истечения периода понижения температуры крышку камеры открывают, и изделие некоторое время выдерживают в теплой камере. На последнем этапе производимое изделие извлекают из камеры, распалубливают и размещают в зоне хранения готовых ЖБИ [19; 62; 117; 164].

При понижении температуры в тепловой камере бетон имеет высокую температуру, а внутреннее давление паров в изделии превышает давление паров

окружающей среды [114; 164]. В результате наблюдается интенсивное испарение влаги из тела бетона, что приводит к увеличению его пористости. Количество испарившейся воды на этом этапе неодинаково и составляет от 20 до 40 % воды затворения [5; 19; 164].

Влага, удаляясь из центральных участков изделия в виде пара, образует каналы, направленные к периферии и соединяют между собой пустоты и поры [6; 25; 28]. Вследствие этого цементный камень становится менее долговечным в сравнении с аналогичным камнем, твердеющим при нормальных условиях.

Кроме того необходимо учитывать, что отдельные составляющие железобетонного изделия имеют различные значения температурного расширения [47; 61]. При охлаждении компоненты ЖБИ уменьшаются в объеме по-разному, в результате чего в зонах контакта цементного камня и заполнителей возникают растягивающие напряжения, понижающие прочность бетона.

1.4 Предварительное выдерживание бетонов при ТВО

Продолжительность времени предварительной выдержки бетона перед ТВО зависит от ряда факторов. Он меньше при повышении дисперсности вяжущего, ограничении минерала C_2S в составе клинкера и увеличении температурных условий, в которых бетон находится перед ТВО. Кроме того продолжительность данного периода зависит от водоцементного отношения бетонной смеси, наличия/отсутствия химических добавок (в частности пластификаторов и суперпластификаторов), модуля открытой поверхности изделий и скорости подъема температуры [90; 110]. В большинстве случаев на заводских линиях предварительная выдержка составляет от 2 до 6 ч [114; 116; 202; 216]. Также длительность этого периода зависит и от температуры изотермического прогрева [16].

Окончанием времени предварительной выдержки бетона некоторые исследователи считают начало схватывания цементной системы. С этой точки

зрения с ростом В/Ц и подвижности бетонной смеси предварительное выдерживание изделий должно быть дольше [16; 144; 164].

Зарубежный опыт показывает, что время предварительного выдерживания может составлять и значительные сроки, вплоть до 7, и даже 14 суток [183; 211].

Как отмечают многие исследователи, в период предварительной выдержки бетона складывается определенная структура бетонной смеси, которая формируется в сравнительно спокойных условиях, поскольку отсутствует интенсивная миграция влаги и температурная деформация отдельных составляющих бетона. Сформировавшаяся структура бетона становится способной воспринимать тепловое воздействие на следующих периодах ТВО. Некоторые ученые считают целесообразным прекращать предварительную выдержку в момент, когда бетон набирает прочность при сжатии около 0,3-0,5 МПа [135; 183; 211].

Предварительное выдерживание обязательно при ТВО изделий с большим модулем открытой поверхности. Это относится и к изделиям неоднородного сечения, так как при ТВО могут образоваться трещины в местах изменения профиля [90]. Согласно рекомендациям при проектировании режимов ТВО при применении малонапорных и индукционных камер, кассетных установок, пакетировщиков, термоформ, предварительно разогретых смесей или при подъеме температуры в среде с пониженной влажностью, а также при изготовлении изделий из жестких бетонных смесей с применением дисперсного армирования допускается обработка без предварительного выдерживания [121].

Многие ученые ещё в 50-80-х годах XX века отмечали негативное влияние преждевременного подъема температуры на прочность и долговечность цементных бетонов [117; 118; 176; 177; 196; 212; 214].

Есть исследования, показывающие возможность сокращения времени предварительного выдерживания ТВО до 1-2 часа без значительного ухудшения физико-механических свойств бетонов [185; 229]. Исследования бетонных смесей, используемых при изготовлении предварительно напряженных бетонных железнодорожных шпал в Австралии, показали, что снижение времени

предварительного пропаривания с 5 часов до 2 часов не оказало заметного влияния на 28-дневные прочностные свойства затвердевшего бетона [195].

1.4.1 Предварительное выдерживание бетонных смесей с добавлением суперпластификаторов

Как отмечает большинство ученых [14; 110], а также закреплено в нормативной документации [135], при модифицировании бетонных смесей добавками суперпластифицирующего типа длительность предварительного выдерживания необходимо увеличивать вплоть до 4-5 часов вследствие замедления сороков схватывания и начального твердения. Либо, как альтернатива, проводить термовлагообработку под пригрузом и в напорных пропарочных камерах.

Согласно Рекомендациям по применению добавок суперпластификаторов в производстве сборного и монолитного железобетона в случаях, когда максимальное использование разжижающего эффекта СП может привести к некоторому снижению прочности бетона после ТВО, следует рассматривать такие изменения режима ТВО в сравнении с бетоном без добавки, как увеличение предварительной выдержки на 1 - 2 ч с последующим сокращением на такой же период времени изотермического прогрева или осуществление предварительной выдержки при повышенной температуре. Названный документ устанавливает время предварительной выдержки не менее 2 - 3 ч до получения требуемой начальной прочности бетона согласно СП 130.13330.2018 [143; 159].

Белорусскими исследователями Бибиком М.С. и Бабицким В.В. был проделан программный расчет времени предварительного выдерживания бетонов, в том числе модифицированных суперпластификаторами. Методика расчета длительности данного периода основывалась на количественной оценке кинетики тепловыделения цемента при добавлении в цементно-песчаные растворы ускорителей твердения, а также замедлителя (тетрабората натрия) и основывалась

на разработке энергосберегающего режима ТВО. Исследователи предлагают фиксировать на графике (см. рис. 1.1) точку перегиба, свидетельствующую об окончании индукционного периода твердения цементного теста $\tau_{\text{инд}}$ и начале интенсивного структурообразования цементного камня – принимают время от начала саморазогрева цементной системы на $5-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сравнении с начальной температурой. Отмечено, что если провести касательные к кривым изменения ψ (интегральной температурной характеристики цементного теста) на стадии нарастания вплоть до пересечения с осью времени, то полученные участки с углом между осью абсцисс и касательной могут служить основанием для расчета длительности предварительной выдержки ТВО (см. рис. 1.1-1.2) [14–16; 143; 159].

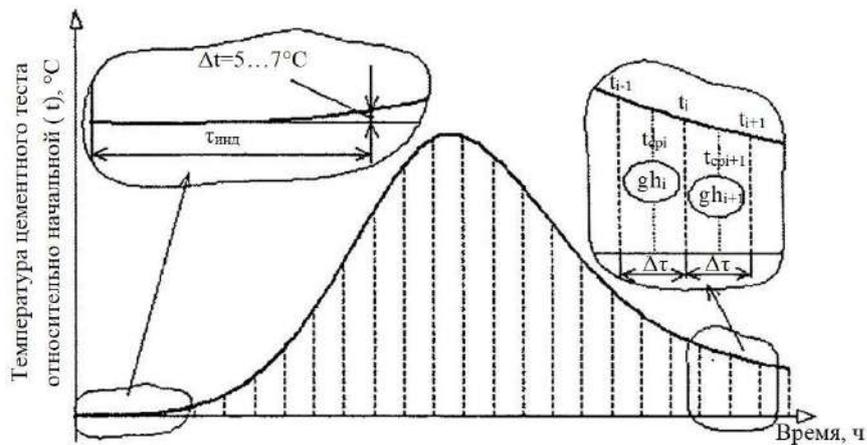


Рисунок 1.1 – Принцип определения длительности предварительного выдерживания. Интегрировано из статьи [15]

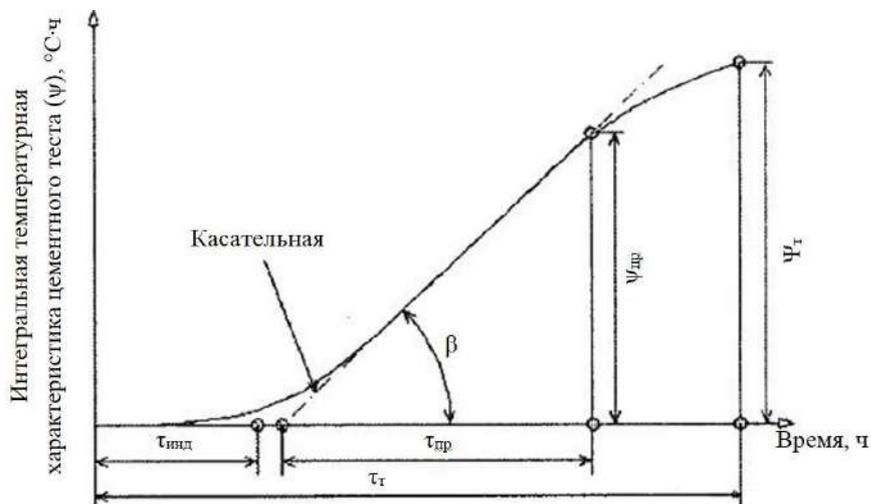


Рисунок 1.2 – Принцип определения длительности предварительного выдерживания и скорости подъема температуры. Интегрировано из статьи [15]

При этом время предварительного выдерживания определяется по эмпирической формуле:

$$\tau_{пв} = k_{пв} \cdot \tau_{инд.}, \text{ где}$$

$\tau_{инд.}$ – время окончания индукционного периода цементного теста,

$k_{пв}$ – коэффициент, зависящий от марки и производителя цемента (0,4...0,7).

Анализ вышесказанного свидетельствует о необходимости увеличения длительности предварительного выдерживания пластифицированных бетонных смесей перед подъемом температуры.

1.5 Недостатки ТВО в сравнении с твердением бетона при нормальных условиях

Как показывает практика, в заводских условиях предварительная выдержка свежееотформованных изделий, период подъема температуры в камере связаны с увеличением производственной площади, с необходимостью выделения дополнительных количества форм с целью выпуска бóльшего количества ЖБИ. Для современного производителя и потребителя ЖБИ актуально получение готовой продукции в максимально краткие сроки, поэтому есть предпосылки для регулирования вышеназванных периодов ТВО.

Следует также учитывать, что бетон, подвергнутый ТВО, имеет более низкие показатели физико-механических свойств (прочность при сжатии, морозостойкость, трещиностойкость), чем аналогичный бетон естественного твердения в марочном возрасте [19; 110; 114; 116; 148; 216]. Во многом это связано с наличием градиента температур в теле твердеющего бетона, с возникновением явлений тепло- и массопереноса, формированием направленной капиллярной пористости при ТВО. В результате наблюдается ослабление контактной зоны цементного камня в том числе и с преднапряженной арматурой,

что может быть причиной возникновения трещин и отколов бетона при передаче предварительного напряжения [149].

Повышение температуры прогрева при термовлагообработке бетона приводит к недобору нормативной прочности тем большему, чем выше температура [172; 210]. При температуре твердения, равной 35 °С, снижение прочности может составить до 17 %, а при температуре 90 °С – 45...50 % в сравнении с бетоном нормального твердения [189; 210].

Одной из причин ухудшения свойств бетонов, получаемых при ТВО, некоторые исследователи связывают с образованием вторичного этtringита [148; 150; 197; 209].

Первичное образование этtringита на начальной стадии гидратации цемента не приводит к разрушению, в виду его образования в пластичной матрице. При этом вторичное образование этtringита носит деструктивный характер. Иллюстрация поры в бетоне, пронизанной кристаллами этtringита, показана на рис. 1.3 [197].

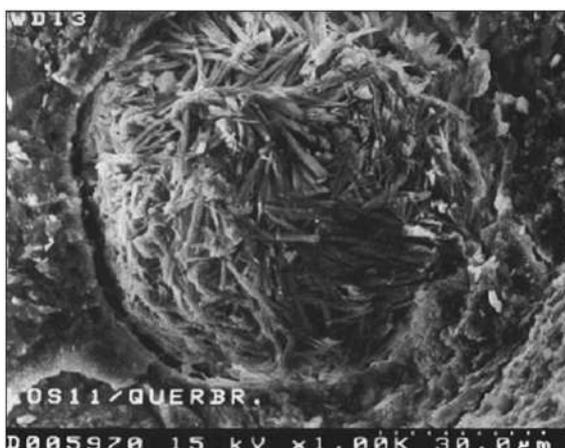


Рисунок 1.3 – Пора, целиком заполненная кристаллами этtringита, в структуре бетона [197]

Вторичное образование этtringита в бетоне, твердеющего в условиях ТВО, обусловлено неустойчивостью этой фазы при высоких температурах. С ростом температуры снижается термодинамическая устойчивость AFt, что в дальнейшем сопровождается образованием фазы моносульфата [80; 241]. Температура преобразования этtringита в моносульфат находится в диапазоне температур от

70 до 90 °С [9]. Кроме этого, предел устойчивости AFt-фазы снижается с ростом содержания щелочей в поровой жидкости [243]. Поэтому имеет смысл снижать температуру изотермического прогрева до 70 °С и ниже. Однако большинство режимов ТВО имеет температуру пропарки в пределах 80-95 °С.

Повышение температуры сверх соответствующего предела устойчивости этtringита приводит к его разложению с образованием моносульфата и сульфата. Далее при снижении температуры твердения моносульфат становится метастабильным, и при благоприятных условиях твердения (температура и влажность) может вновь сформироваться этtringит [197; 209]. Согласно последним исследованиям, образование этtringита в бетоне после ТВО может быть также связано со способностью фазы C-S-H адсорбировать сульфаты в условиях повышенных температур [218]. После ТВО вторичный этtringит образуется в эксплуатационных условиях как из моносульфата, C_3AH_6 и SO_4^{2-} из щелочных сульфатов поровой жидкости, так и SO_4^{2-} , адсорбированном C-S-H. В итоге внутренние растягивающие напряжения, обусловленные формированием вторичного этtringита, могут стать причиной появления трещин в получаемых изделиях.

Среди других не менее существенных недостатков ТВО можно выделить тот факт, что применяемые закладные детали, выполненные из металла, имеют различные с бетоном коэффициенты температурного расширения. В итоге сцепление деталей с цементным камнем ослабевает, и возрастает вероятность брака изделий при установке креплений на ЖБИ.

Кроме того при использовании предварительного напряжения арматуры после ТВО в особенности при повышенных температурах пропаривания наблюдается снижение эффективности использования арматуры, поэтому данный факт необходимо учитывать при расчете конструкций [26; 164].

В настоящее время используемые режимы ТВО на заводах по производству железобетонных изделий позволяют получить готовую продукцию с необходимой отпускной прочностью в течение цикла пропаривания в среднем в течение 12-16 часов. Сроки предварительного выдерживания (в большинстве случаев 2...4 часа),

нагрев температуры (2...4 часа в зависимости от достигаемой температуры), изотермическое выдерживание в течение длительного времени отрицательно влияют на оборачиваемость опалубки, увеличивают срок доставки ЖБИ до конечного потребителя. Высокая температура изотермического прогрева прямо пропорциональна затратам на энергоресурсы и, как следствие, стоимости изделий. Увеличение содержания цемента, использование высокомарочных вяжущих при использовании ТВО увеличивает как себестоимость конструктивных изделий из железобетона, так и влияют на рост выброса углекислого газа как при производстве цемента, так и при его доставке транспортом до производителя конструктивного бетона [86; 135].

Последние исследования в области пропаривания изделий [18; 44; 130; 164; 189; 211] показывают возможность снижения продолжительности всего цикла ТВО до 12 часов и снижения температуры изотермического прогрева до 60 градусов, Учитывая, что особое внимание вопросам ТВО обращалось еще в 50-х, 60-х гг XX века, основным направлением в плановой экономике СССР отсутствовала конкуренция при производстве железобетонных изделий, ТВО велась по ресурсо- и энергозатратному режиму (высокая температура изотермического прогрева, удлиненные сроки пропаривания) – не состоял вопрос оптимизации режимов прогрева бетона. Известно, что если завод будет выдавать больше продукции, то стоимость изделий из железобетона можно снизить.

1.6 Влияние пластифицирующих добавок на физико-механические свойства бетонов

1.6.1 Влияние пластифицирующих добавок на свойства бетонов

Сегодня попросту невозможно представить себе качественное скоростное строительство без использования бетонов с суперпластификаторами. Исследованиям в области модификации свойств бетона химическими добавками

посвящены работы Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, А.И. Вовка, Е.Г. Величко, Б.В. Гусева, В.Т. Ерофеева, Л.М. Добшица, Ю.Г. Иващенко, В.С. Изотова, С.С. Каприелова, Л.И. Касторных, В.И. Кондращенко, О.В. Кононовой, Л.Я. Крамар, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.А. Перфилова, Т.М. Петровой, В.С. Рамачандрана, В.Б. Ратинова, Г.С. Рояка, Н.П. Синайко, О.М. Смирновой, А.В. Ушерова-Маршака, В.Р. Фаликмана, А.В. Шейнфельда, S. Nakamura, A.M. Neville, H. Okamura, M. Ouchi, J. Plank, J. Petit, R. Rixom, W. Schmidt, K. Yamada, A.M. Neville, R. Rixom и других учёных [6; 7; 55–57; 59; 66–69; 74; 75; 11; 76–78; 84; 88; 89; 120; 124; 125; 128; 12; 129; 132; 139; 140; 144; 147; 149; 153; 165; 167; 13; 168–171; 175; 178–180; 184; 187; 21; 191; 193; 215; 216; 219–221; 223–225; 24; 226–228; 232; 234; 235; 245; 247–249; 43; 51; 52].

Пластификаторы в качестве добавки для бетонов, начали применяться сравнительно недавно, в 1940-1950-ых годах. Химическая индустрия развивается активно, структура модификаторов совершенствуется практически каждый день, и сегодня суперпластификаторы занимают ведущее место среди химических добавок для цементных бетонов. В первое время, на истоках создания в качестве пластификаторов широко применялись поверхностно-активные вещества (ПАВ), нередко получаемые из вторичных продуктов и отходов химической промышленности [11; 12; 120; 139; 140].

Известно, что основное воздействие ПАВ направлено на модификацию цементной структуры бетона. Добавление в цементные системы ПАВ затрудняет образование фазовых контактов между кристаллами, что связано с появлением на поверхности тел в результате адсорбции двумерных структур, состоящих из дифильных молекул ПАВ, ориентированных полярными группами к гидрофильным поверхностям [138; 148]. В результате уменьшается трение между частицами, что обусловлено, в основном, слоем, непосредственно связанным с гидратирующей поверхностью [138; 142].

Путем изменения дисперсности кристаллов – зародышей посредством адсорбционного модифицирования появляется возможность управления периодов формирования и развития новой фазы в индукционный период

структурообразования, а значит и прочностью цементных бетонов, т.е. подойти к решению основной проблемы технологии бетона – получению материалов с заданными структурой и свойствами [138].

1.6.2 Традиционные пластификаторы для бетонов

Традиционные пластификаторы делят на две основные группы, отличающиеся принципом своего действия [12; 228; 232]:

I группа – пластификаторы гидрофильного типа, способствующие диспергированию коллоидной системы цементного теста;

II группа – гидрофобизирующие добавки, вовлекающие в бетонную смесь мельчайшие пузырьки воздуха. Их молекулы после адсорбции на поверхности раздела «воздуха – вода» понижают поверхностное натяжение воды и стабилизируют пузырьки в цементном тесте.

Из добавок I группы широко известна сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ), состоящая из кальциевых солей лигносульфоновых кислот, получаемых при переработке целлюлозы. Также известны пластификатор адипиновой щелочной (ПАЩ-1), упаренная последрожжевая барда (УПБ), пластификатор ВРП-1 и другие типы [146].

К добавкам II группы относятся такие пластификаторы, как смола нейтрализованная воздухововлекающая (СНВ); смола древесная омыленная (СДО); омыленный древесный пек (препарат ЦНИПС-1); натриевая соль абиетиновой кислоты; синтетическая поверхностно-активная добавка (СПД) из отходов нефтепереработки; сульфанол (С), и др. [23].

Два традиционных типа полимеров, используемых в суперпластификаторах: на основе сульфированных нафталинформальдегидов (СНФ) и сульфированных меламинформальдегидов (СМФ) показаны на рис. 1.4, рис. 1.5, соответственно. Также показаны разновидности молекул поликарбоксилатов (см. рис. 1.6-1.8). Часто добавляют незначительные количества других материалов, таких как

триэтаноламин (для противодействия замедлению), трибутилфосфат (для уменьшения чрезмерного уноса воздуха) и соли гидроксикарбоновых кислот или лигносульфонаты (для увеличения замедления). Кроме того, фирменными суперпластификаторами могут быть смеси двух основных ингредиентов [139; 228; 232].

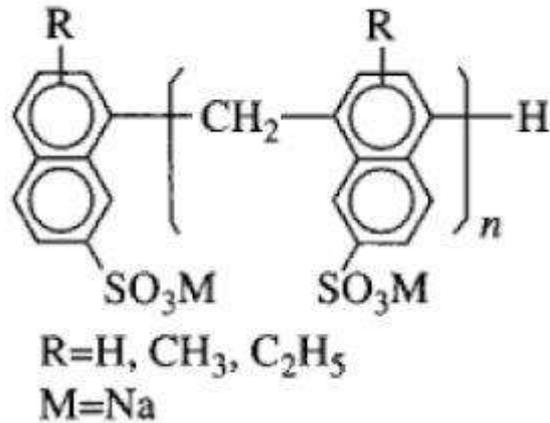


Рисунок 1.4 – Элементарная молекула сульфированного нафталинформальдегида

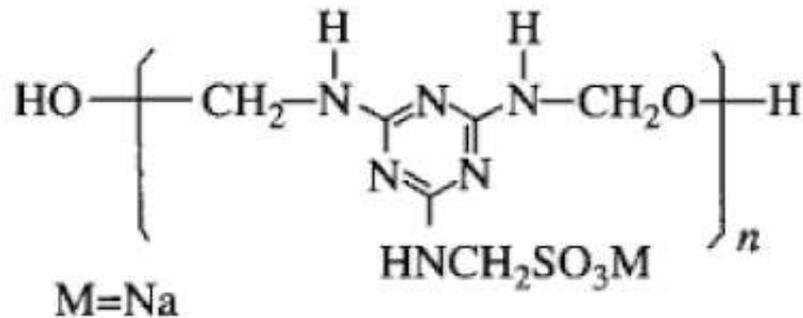


Рисунок 1.5 – Элементарная молекула сульфированного меламинформальдегида

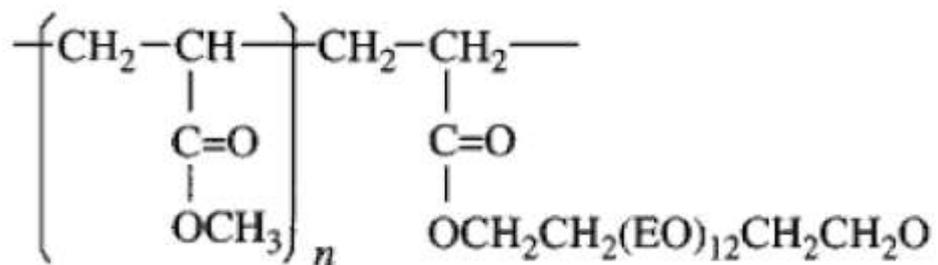


Рисунок 1.6 – Окись этилена – элементарная молекула ПКЭ

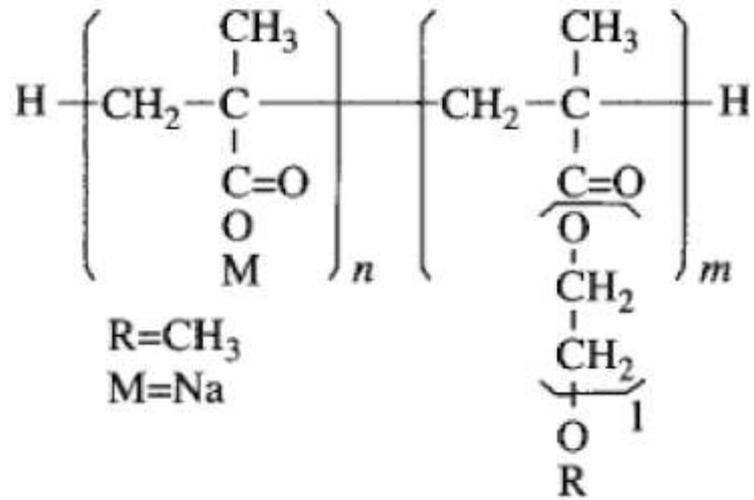


Рисунок 1.7 – Сополимер оксикарбоновой кислоты с акриловым эфиром

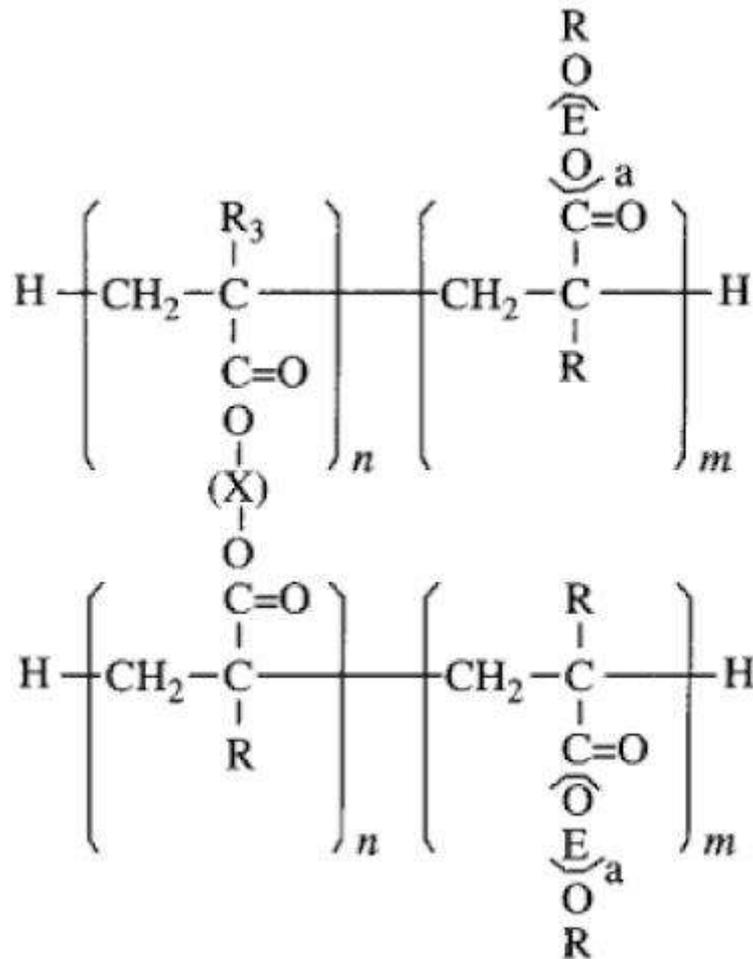


Рисунок 1.8 – Пространственно-связанный полимер акрилата

Модифицирование структуры суперпластификаторов путем введения в него дополнительных компонентов, т.е. фактически синтез комплексных добавок, позволяет регулировать множество показателей: прочность и плотность бетона;

сроки схватывания цементных систем и темпы твердения бетона; сохраняемость бетонной смеси; водоотделение и расслоение бетонной смеси; воздухоудерживание бетонной смеси, пористость, проницаемость и морозостойкость бетона; качество поверхности бетонных конструкций; расход суперпластификатора; стоимость добавки без ухудшения ее свойств [6; 11; 12; 60; 69; 75; 77; 120; 232]. Иными словами, для получения эффекта полифункционального действия применяют комплексные добавки, включающие несколько компонентов.

Менее чем за 50 лет разработано множество комплексных добавок для бетонов. Их разделяют на 5 групп:

- смеси ПАВ (I),
- смеси ПАВ и электролитов (II),
- смеси электролитов (III),
- комплексные добавки на основе суперпластификаторов (IV),
- сложные многокомпонентные комплексные добавки (V) [23; 122; 168].

В настоящее время многие суперпластификаторы представляют собой комплексные добавки на основе высокоэффективных ПАВ. Например, один из самых распространенных суперпластификаторов в 80-90е годы прошлого века в СССР и России – С-3. Наряду с продуктом конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида С-3 содержит небольшие добавки лигносульфонатов и сульфата натрия [6; 11; 13; 167; 174; 228].

В характеристике и оценке эффективности ПАВ, особенно традиционных суперпластификаторов, придается немаловажное значение электрическому потенциалу, который появляется в результате адсорбции ПАВ, когда частицы твердой фазы приобретают одноименный заряд, количественно оцениваемый как ξ - потенциал. Как следствие, частицы цемента отталкиваются, в результате облегчается их взаимное перемещение, и затрудняется их коагуляция. Значение ξ -потенциала и, соответственно, силы электростатического отталкивания связаны со степенью адсорбции и зависят от природы дисперсионной среды. По мере увеличения основности соединения ξ - потенциал возрастает и имеет отрицательный знак. Многие исследования адсорбции суперпластификаторов на

различных материалах показывают, что степень адсорбции на цементе возрастает до определенного предела пропорционально дозировке СП.

Силикатные фазы цемента C_2S и C_3S в воде имеют отрицательный ξ – потенциал, в то время как C_3A и C_4AF – положительный. При введении в цементные системы пластифицирующих добавок потенциал поверхности цементных фаз увеличивается, обуславливая проявление сил электростатического отталкивания частиц твердой фазы. Таким образом, использование пластификаторов увеличивает расстояние, на котором проявляется сила отталкивания в 10 раз и более.

Исследованиями С.С. Каприелова доказано, что наибольшей адсорбционной способностью обладает трехкальциевый алюминат C_3A , а наименьшей – β - C_2S . Некоторые специалисты объясняют такой эффект значительным увеличением удельной поверхности за счет пептизации и образования высокодисперсных гидратных новообразований (гидроалюминатов), что обуславливает энергичное поглощение суперпластификатора из раствора. Высокодисперсная коагуляционная структура новообразований при поглощении большого количества суперпластификатора способствует неравномерному распределению последнего в цементном вяжущем и может снижать пластифицирующий эффект [75; 137; 245].

На адсорбционную способность СП значительное влияние оказывает содержание C_3A в клинкере и минеральной добавки с активным SiO_2 в цементе. С увеличением содержания в клинкере C_3A сверх 7 % адсорбционная способность цемента по отношению к СП существенно возрастает. Аналогично ведет себя цемент, в состав которого входят минеральные добавки, содержащие активный SiO_2 . Увеличение удельной поверхности цемента увеличивает адсорбцию СП, но в меньшей степени по сравнению с увеличением содержания C_3A и активной минеральной добавки [49; 235; 237].

Вместе с тем, суперпластификатор, адсорбируясь на частицах гидратирующегося портландцемента, препятствует поступлению в жидкую фазу продуктов растворения частиц цемента и первичных гидратов. Поскольку состав

жидкой фазы в значительной степени определяет условия формирования гидратных новообразований, их фазовые и морфологические характеристики, то введение СП способно влиять через жидкую фазу на формирование структуры затвердевшего цементного камня [77; 182].

1.6.3 Поликарбоксилатные суперпластификаторы

Начиная с 90-х годов прошлого века в строительной практике всё шире находят применение высокоэффективные поликарбоксилатные суперпластификаторы (ПКЭ). Реальные возможности снижения водоцементного отношения (до 40%) и разжижения бетонной смеси при применении ПКЭ в бетонах значительно выше, чем при использовании традиционных СНФ и СМФ [48; 49; 128; 170; 191].

В литературе описаны карбоцепные полимеры, благодаря своей своеобразной форме, названные «гребнеобразными» (рис. 1.9).

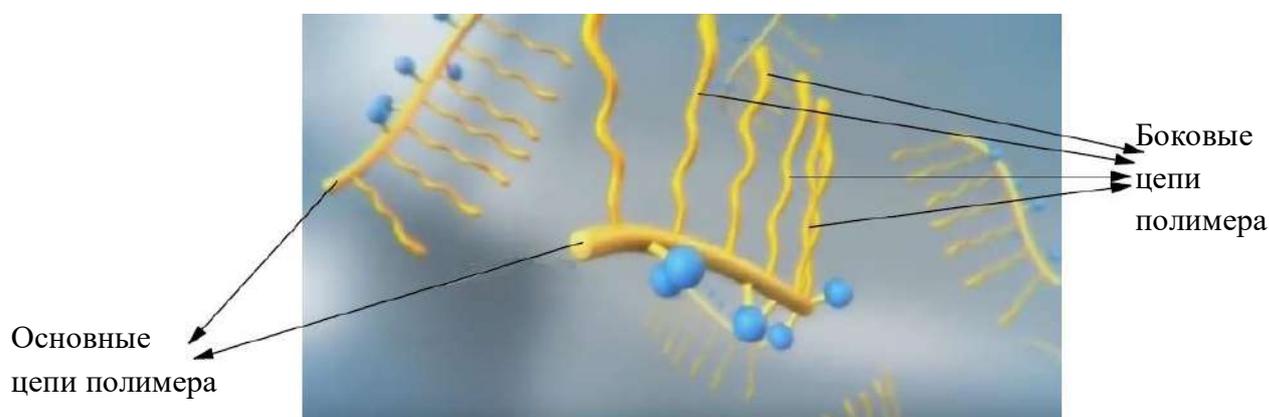


Рисунок 1.9 – Молекулы поликарбоксилатных суперпластификаторов

Боковые олигоалкиленоксидные цепи, прикрепленные к основной цепи, создают дополнительный пространственный барьер для коагуляции частиц цемента, создается стерическое отталкивание [77; 170; 171; 232]. В частности, особую роль ПКЭ приобрели при изготовлении так называемых

самоуплотняющихся и самонивелирующихся бетонных смесей, а также реактивных порошковых бетонов.

В целом, длительная долговечность цементных смесей требует низкого соотношения вода / цемент (В / Ц) [6; 28; 50; 51]. При низком содержании воды суперпластификаторы, представляющие собой полимеры, которые могут способствовать диспергированию цементных частиц, используются для обеспечения необходимой обрабатываемости. Суперпластификаторы адсорбируются на поверхности цементных частиц через их заряженный остов и обеспечивают электростатическое отталкивание. Они освобождают захваченную воду от флокулированных структур и модифицируют вязкость цементных смесей. Последние поколения суперпластификаторов на основе поли(карбоксилатного эфира) имеют акрилатные группы В основе, а также содержат боковые цепи (т. е. Поли(этиленоксид)), которые выступают из поверхности цемента в поровый раствор для получения стерического эффекта отталкивания [24; 170; 192; 206]. Эти привитые полимеры проявляют превосходную диспергирующую способность в сравнении с другими типами суперпластификаторов (например, поликонденсатами на основе меламина и нафталина) и эффективны при получении высокоэффективных бетонов [190; 208; 220; 237; 247].

Сроки схватывания цементных паст, модифицированных суперпластификаторами зависят от ряда факторов, включая тип суперпластификатора, состав цемента и, в частности, от того, происходит ли простое добавление добавки к бетону или происходит снижение водоцементного отношения. В целом можно констатировать о том, что при непосредственном добавлении суперпластификатора для получения высокоэффективного бетона начальное и конечное время схватывания неизменно увеличиваются в порядке СМФ < СНФ < ПКЭ. При нормальных дозировках увеличение сроков схватывания редко превышает два часа для материалов, которые намеренно не сформулированы для замедления. При снижении водоцементного отношения для придания аналогичного спада контрольной смеси время схватывания обычно очень похоже на контрольное; возможно небольшое уменьшение в случае СМФ и

СНФ [194] и небольшое увеличение в случае материалов на основе полиакрилата [199], обычно не более одного часа в любом случае [64; 65; 120; 216; 228; 232; 247].

В отличие от СНФ и СМФ основным механизмом действия у ПКЭ является стерическое отталкивание посредством боковых цепей адсорбированных макромолекул (рис. 1.10) при отсутствии ярко выраженного влияния потенциала на пластифицирующую способность.

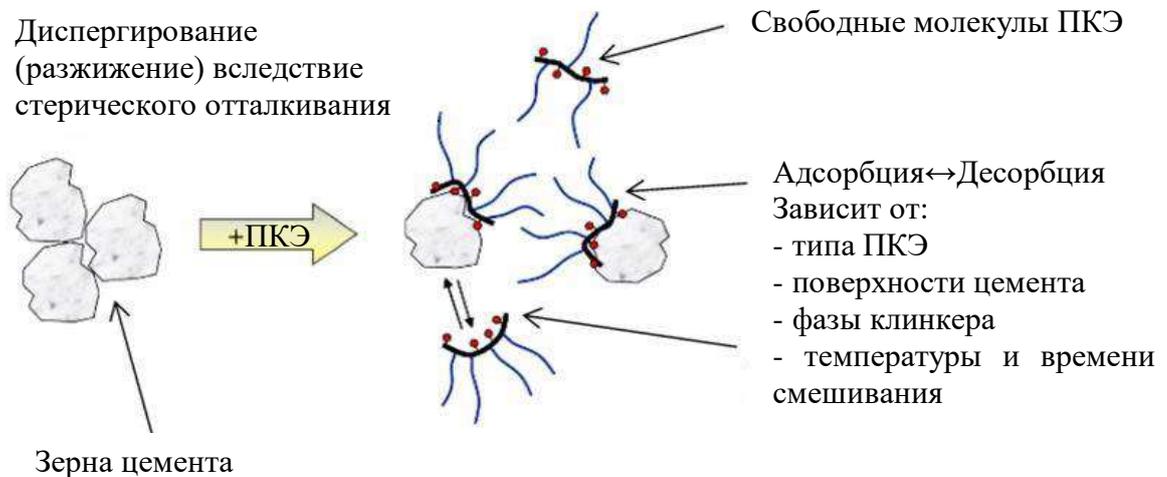


Рисунок 1.10 – Физико-химический механизм взаимодействия ПКЭ и поверхности частиц цемента

ПКЭ обладает избирательной адсорбцией, что не раз показано в исследованиях отечественных и зарубежных ученых. ПКЭ адсорбируется преимущественно на гидросульфоалюминатах, но дальнейшее фазообразование приводит к практически полному подавлению пластифицирующего действия за счет так называемого «перекрывания» зон стерических эффектов. В связи с этим, при синтезе молекул ПКЭ важно учесть конкурентные скорости адсорбции и гидратации с целью обеспечения необходимой продолжительности их действия. Нужно учитывать, что необходимо получить на выходе – длительный эффект сохранения подвижности цементных систем или некоторое ускорение набора прочности. Поэтому современные ПКЭ содержат в своем составе молекулы нескольких типов, действие каждого из которых начинается в строго определенное время [12; 235; 237].

Путем изменения химической структуры ПКЭ обеспечивается более эффективное его использование, что заметно снижает его дозировку (вплоть до 0,1-0,3 % от массы цемента), а также позволяет минимизировать их чувствительность к различным минералам цементного клинкера [6; 65; 150; 170; 171].

Еще один важный аспект, связанный с использованием ПКЭ состоит в том, что эти модификаторы имеют достаточно высокую поверхностную энергию на границе раздела «жидкость-газ», т.е. проявляют воздухововлекающее действие. Поэтому промышленные формы эфиров поликарбоксилатов содержат компоненты, подавляющие этот эффект. Данный факт нужно учесть, если появляется необходимость применения воздухововлекающих добавок с целью повышения морозостойкости бетона [51; 77; 170].

Как следует из исследований J. Petit, L. Regnaud и W. Schmidt адсорбция молекулы ПКЭ в основном происходит на поверхности C_3A и C_4AF изначально, а также на моносulfатах и эттрингите, в то время как адсорбция лигносульфонатов, СНФ и СМФ менее избирательна по отношению к цементным фазам [221; 231; 235; 237] (см. рис. 1.11).

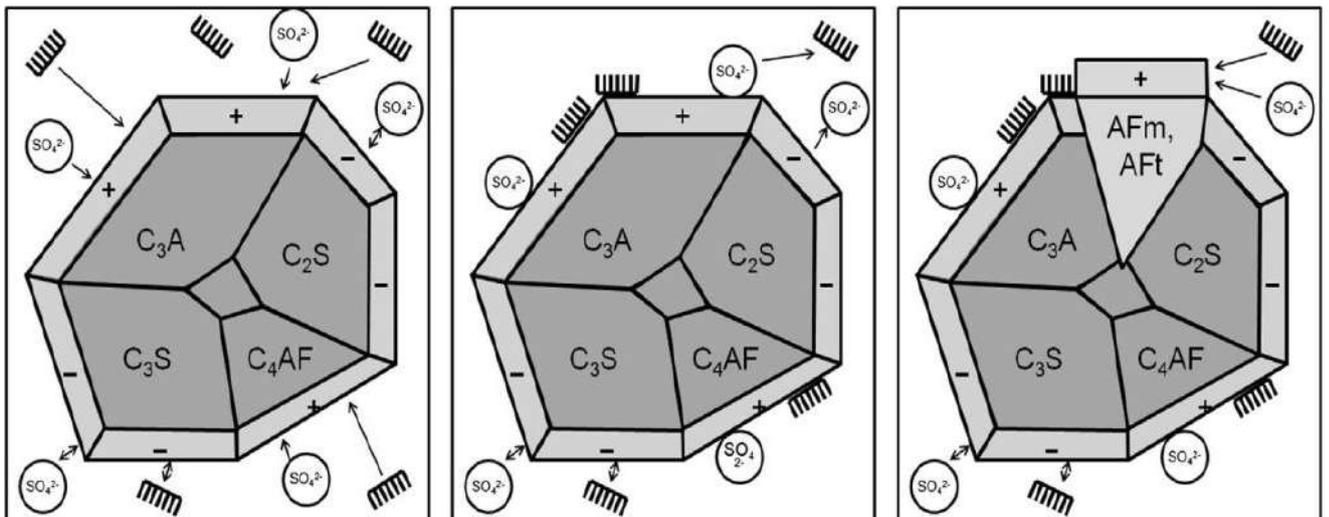


Рисунок 1.11 – Адсорбция поликарбоксилатов и сульфатов иона

При высокой дозировке поликарбоксилатов в цементной системе часть ПКЭ адсорбируются не одновременно, а со сдвигом во времени с образованием

этtringита. Это означает, что этtringит снижает удобоукладываемость цементных паст без суперпластификатора, и практически обеспечивает подвижность в системе, включающей большое количество СП. В данном случае можно наблюдать два противоположных эффекта, которые определяются температурой. В то время как повышение температуры отрицательно влияет на удобоукладываемость за счет ускорения гидратации, ускоренный рост этtringита быстро обеспечивает большие адсорбционные участки для пластификатора, что снова положительно влияет на подвижность. Снижение температуры положительно влияет на сохранение текучести, но в результате медленной гидратации может не генерировать достаточных адсорбционных участков для пластификатора, чтобы они оставались неэффективными в растворе.

При небольших концентрациях суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов происходит насыщение поверхностей алита и белита. С увеличением же содержания данного модификатора их скорость гидратации снижается.

При применении песков с большим содержанием глинистых частиц в качестве мелкого заполнителя использование молекулы поликарбоксилатных суперпластификаторов теряют свою эффективность. Это обусловлено тем, что ПКЭ вызывают диспергирование не только частиц цемента, но и глинистых частиц, что, несомненно, приводит к увеличению водопотребности. Иными словами, частицы ПКЭ могут легко интеркалировать, т.е. внедряться в слои глины, содержащейся в песке [49]. Стоит отметить, что в смесях с большим содержанием воды не реализуется водоредуцирующее действие суперпластификаторов [119]. В то же время анионоактивные суперпластификаторы типа ЛСТ, СНФ и СМФ при использовании мелкого заполнителя с большим содержанием глинистых частиц проявляют эффект пластифицирования. Такой эффект в данном случае объясняется тем, что эти суперпластификаторы оказывают на песок дефлокуляционное воздействие, которое зависит от их адсорбционной способности на поверхности минеральных частиц [7; 11; 45; 71; 72; 88].

Следует учесть, что пластификаторы даже в небольших количествах вызывают некоторое замедление гидратации цемента вследствие слабой проницаемости воды через создаваемые ими адсорбционные слои [8; 64]. В результате ранняя прочность бетонов с суперпластификаторами несколько ниже прочности аналогичного бетона без добавок. С увеличением дозировки пластификаторов адсорбционные слои становятся еще менее проницаемыми, и, как следствие, прочность бетона еще ниже. Однако современные технологии позволяют синтезировать молекулы суперпластификаторов на основе ПКЭ так, что можно регулировать длительность пластифицирования, сроки схватывания и в конечном счете и раннюю прочность бетонов, что особенно важно в условиях современной индустрии бетона.

1.6.4 Особенности применения суперпластификаторов с ТВО

На практике, в производстве железобетонных конструкций всё чаще применяют комплексный метод, включающий в себя несколько способов ускорения твердения, например, тепловлажностная обработка химически модифицированных бетонов, пропаривание в сочетании с минеральными добавками и т.д.

Наиболее распространен способ применения **суперпластификаторов совместно с ТВО**.

Применение традиционных суперпластификаторов (модифицированных лигносульфонатов, продуктов поликонденсации меламина, формальдегида, и др.) совместно с ТВО незначительно увеличивает прочность на ранних сроках, требует длительного изотермического прогрева при высоких температурах, не допускает сокращения определенных этапов пропаривания вследствие удлинения индукционного периода гидратации цемента.

Разработка новейших суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров позволяет применять более умеренный и

низкотемпературный режим ТВО [130; 148; 235; 239]. Как отмечено ранее, химическая модификация карбоксилсодержащих полимеров позволяет ввести в основную макромолекулу длинные боковые олигоалкиленоксидные цепи через образование соответствующих сложноэфирных или амидных групп, что в конечном итоге и приводит к стерическому отталкиванию. Известно, что уменьшение водопотребности бетонной смеси определяется электрическими зарядами и боковыми цепями, сохраняемость, связанная со скоростью адсорбции полимеров на частицах цемента, – функциональными мономерами, а развитие ранней прочности бетона – конфигурацией)полимерной молекулы, в целом [170; 171; 221; 236].

Таким образом, регулируя структуру полимеров поликарбоксилатного суперпластификатора существует возможность его свойств, в том числе, повышение ранней прочности. Исследования подтверждают возможность совместного применения названных суперпластификаторов и ТВО [130; 132; 151; 211; 221; 235–237; 239]. В данном случае реакция на гидратацию цемента неоднозначна, поликарбоксилатный СП может аналогично традиционным пластификаторам адсорбироваться на частицах цемента, снижать водоцементное отношение, но за счет линейной структуры, сроки схватывания не удлинять, а оставлять на уровне аналогичных показателей составов без добавок, а за счет определенной структуры позволяет набирать высокую механическую прочность цементных систем.

1.7 Выводы по главе 1

1. Проведённый анализ литературных источников и других публикаций отечественных и зарубежных исследователей по рассматриваемой проблеме показал, что основное количество работ посвящены исследованиям использования классических пластификаторов и суперпластификаторов, которые сильно замедляют гидратацию цемента и твердение бетонов, и недостаточно исследовано влияние современных суперпластификаторов.

2. Существующие технологии ТВО имеют ряд недостатков, связанных с ухудшением структуры цементного камня; высоким расходом вяжущего и энергоресурсов. За последние пятьдесят лет технология производства ЖБИ изменилась незначительно, что на фоне быстро развивающихся научных достижений в области направленного формирования структуры и свойств бетонов является препятствием в повышении долговечности и качества изделий, а также снижения энергоёмкости и себестоимости производства.

3. В связи с вышеизложенным, технология производства сборного железобетона с комплексным применением тепловлажностной обработки и современных суперпластификаторов требует дальнейшего исследования и обоснования.

4. Проведенный анализ состояния вопроса позволил определить и сформулировать рабочую гипотезу, положенную в основу научных исследований в рамках настоящей диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

На основе выполненного анализа состояния вопроса сформулированы следующие цель и задачи исследования:

Цель исследования – разработка низкотемпературных режимов тепловлажностной обработки бетонов с использованием добавок на основе поликарбоксилатных эфиров, обеспечивающих получение в ранние сроки высокой проектной прочности.

Задачи исследования, которые необходимо решить для выполнения поставленной цели:

1. Исследовать влияние пластифицирующих добавок на формирование свойств цементных паст, растворов и бетонов.

2. Исследовать влияние технологии тепловлажностной обработки на формирование структуры пластифицированных цементных паст, растворов и бетонов.

3. Экспериментально установить влияние суперпластификаторов на физико-механические свойства и структурообразование цементных систем.

4. Экспериментально исследовать низкотемпературные режимы ТВО на формирование свойств пластифицированных цементных систем: цементных паст, растворных смесей и тяжелого бетона.

5. Разработать математические модели описания ранней прочности пластифицированных бетонов в зависимости от содержания модификаторов, длительности и температуры изотермического прогрева и времени предварительного выдерживания ТВО.

6. Применить результаты исследований в производственных условиях при изготовлении железобетонных сборных конструкций с использованием низкотемпературного режима ТВО.

ГЛАВА 2 ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

2.1 Характеристика материалов, используемых в исследованиях

2.1.1 Портландцемент

В качестве вяжущего при исследовании свойств цементных паст, растворов и бетонных смесей в настоящей диссертации применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н цементного завода ООО «Горнозаводскцемент». Контроль качества используемого в работе цемента проведен по методике ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема» и ГОСТ 31108-2016 «Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии» [35; 213].

Портландцементный клинкер ЦЕМ I 42,5Н ООО «Горнозаводскцемент» относится к среднеалюминатному. Физико-механические, химические и минералогические показатели используемого цемента приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Показатели качества портландцемента ЦЕМ I 42,5Н ПАО
«Горнозаводскцемент»

№ п/п	Наименование характеристики	Ед. измерения	Фактические показания
Физико-механические показатели цемента			
1	Начало схватывания	мин	115
2	Конец схватывания	мин	150
3	Нормальная плотность цементного теста	%	27,0
4	Предел прочности при сжатии после ТВО	МПа	36,0
5	Группа по эффективности после ТВО		I
6	Прочность на сжатие в возрасте 2 суток	МПа	20,0
7	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток	МПа	50,0
Химический состав клинкера			
1	Массовая доля нерастворимого остатка	%	1,5
2	Массовая доля оксида серы VI(SO ₃)	%	3,00
3	Массовая доля оксида магния (MgO)	%	2,5±0,5
Химические и минералогические показатели клинкера			

№ п/п	Наименование характеристики	Ед. измерения	Фактические показания
1	Содержание трехкальциевого силиката ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)	%	60,7
2	Содержание двухкальциевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)	%	13,4
3	Содержание трехкальциевого алюмината ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)	%	7,5
4	Содержание четырехкальциевого алюмоферрита ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)	%	12,8
Санитарно-эпидемиологические свойства цемента			
1	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, $A_{\text{эфф}}$	Бк/кг	60,3

Анализ технических характеристик показывает, что портландцемент ООО «Горнозаводскцемент» удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2020 [29].

2.1.2 Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок модулем крупности 1,9. Свойства песка определялись по методике, описанной в ГОСТ 8735-88 [39]. Содержание глины в комках составляет 0,1-0,2%. Зерновой состав песка приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав песка

Остатки	Остатки на ситах с размером отверстий, мм						
	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные, %	0	1,6	12,4	8,8	37,2	32,0	8,0
Полные, %	0	1,6	14,0	22,8	60,0	92,0	100,00

По результатам оценки зернового состава установлено, что по модули крупности ($M_k=1,9$) песок относится к мелкой группе песков. По полному остатку на ситах 0,63 песок также относится к группе мелких. Песок соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [40].

Основные свойства песка приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Свойства песка

Наименование показателей	Нормативные показатели	Фактические показатели
Насыпная плотность, кг/м ³		1494
Истинная плотность, кг/м ³		2631
Содержание пылевидных и глинистых частиц, в % по массе	Не более 10	4,2
Содержание глины в комках, в % по массе	Не более 1	0,1
Коэффициент фильтрации, м/сут.		8,21

Таким образом, применяемый в исследованиях песок удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-2014 [40], относится к группе мелких песков по модулю крупности и соответствует I классу по зерновому составу и пригоден для приготовления растворных и бетонных смесей.

2.1.3 Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя применялся щебень из глубинных пород с крупностью 5-20 мм.

Результаты исследования зернового и гранулометрического состава приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Зерновой состав щебня

Остатки	Остатки на ситах с размером отверстий, мм			
	>20	10	5	<5
Частные, %	2,4	64,5	32,0	1,0
Полные, %	2,4	66,9	99,0	100,0

Основные свойства щебня приведены в таблице 2.5. Свойства щебня определялись по методике ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» [38].

Таблица 2.5 – Свойства щебня

Показатель	Значение
Насыпная плотность, г/см ³	1,4
Истинная плотность, г/см ³	2,7
Марка по дробимости	1200
Содержание пылеватых частиц, %	0,5
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, %	11,5

Таким образом, применяемый в исследованиях щебень соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» [37] и рекомендован для использования в качестве крупного заполнителя в составе бетонов.

2.1.4 Суперпластификаторы

При приготовлении цементных паст, цементно-песчаных растворов и тяжелого бетона применялся суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika Viscocrete 24 HE швейцарского концерна Sika. Для сравнения использован суперпластификатор на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов С-3 производства ООО «Полипласт Новомосковск».

Sika Viscocrete 24 HE – высокоэффективный современный суперпластификатор со способностью ускоренного набора ранней прочности. Добавка предназначена для производства высокопрочных ЖБИ на современных технологических линиях [49; 163]. Соответствует суперпластифицирующей группе добавок в соответствии с ГОСТ 24211 [34]. Изготовлен в соответствии с ТУ 2493-009-13613997-2011 в г. Лобня Московской области.

В табл. 2.6 указаны основные физические, химические и технологические показатели добавки Sika Viscocrete 24 HE.

Таблица 2.6 – Основные свойства поликарбоксилатного суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE

Показатель	Значение показателя
Внешний вид	Водная композиция модифицированных поликарбоксилатных эфиров
Плотность при 20 °С, г/см ³	1,085±0,01
Водородный показатель, рН	4,0-6,0
Содержание хлорид-ионов, в % от массы, менее	0,1
Дозировка согласно паспорту качества	0,3 – 2,0% от массы вяжущего

На основании анализа свойств и области применения Sika Viscocrete 24 HE сделан вывод о рекомендации его использования для исследования свойств цементных паст, растворов и тяжелого бетона. Добавка не содержит хлоридов и других веществ, вызывающих коррозию арматуры, поэтому этот суперпластификатор может использоваться для железобетонных конструкций, в том числе и предварительно напряженных.

С-3 – суперпластификатор на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов. Его производят методом органического синтеза целлюлозных соединений. Изготавливается в соответствии с ТУ 5870-002-58042865-03 в г. Новомосковск Тульской области. Соответствует суперпластифицирующей группе добавок в соответствии с ГОСТ 24211-2008 [34].

Сухой пластификатор С-3 представляет собой полидисперсный коричневый порошок, который добавляют к исходному материалу в виде водного раствора с концентрацией от 15 % до 35 %.

По физико-химическим и технологическим показателям добавка С-3 соответствует требованиям и нормам, приведенным в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Основные свойства суперпластификатора на основе сульфированных нафталинформальдегидных соединений С-3

Показатель	Значение показателя
Внешний вид	Порошок коричневого цвета
Массовая доля активного порошка в пересчете на сухой продукт, % не менее	69
Водородный показатель, рН	7,0-9,0
Содержание хлорид-ионов, в % от массы, менее	0,1
Рекомендуемая дозировка	0,3 – 1,5% от массы цемента

2.1.5 Вода

В качестве воды для приготовления цементных паст, растворных и бетонных смесей использовалась проточная вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011 [33].

2.2 Методы исследования

2.2.1 Методика определения сроков схватывания цементных паст

Для определения нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста по ГОСТ 310.3 [35] и EN-196 [213] применялся прибор Вика.

Особенностью данного эксперимента являлось то, что кольца к прибору Вика с цементными пастами твердели при различных температурных условиях (20...40...60 °С) и относительной влажности воздуха $95\pm 5\%$ в пропарочной камере ТС-100 производства завода Щекино-ВНИИР Тульской области. Установка для эксперимента показана на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Выдерживание модифицированных цементных паст в камере ТС-100 при 40 °С

Крышка термостата при проведении эксперимента закрывалась, через каждые 3-5 минут образцы цементных паст вынимались и немедленно проверялись на сроки схватывания.

2.2.2 Методика определения прочности, плотности и открытой капиллярной пористости цементного камня

Для оценки физико-механических свойств цементного камня формировались образцы размерами 20x20x20 мм. Измерялись прочность на сжатие после ТВО, на 3, 7 и 28 сутки, а также плотность и открытая капиллярная пористость согласно ГОСТ 12730.1-2020 и ГОСТ 12730.4-2020 [31; 32].

2.2.3 Методика определения прочности растворов по контрольным образцам

Образцы изготавливались из раствора, состоящего из цемента и стандартного песка в соотношении 1:2 по массе при водоцементном отношении, контролируемом по подвижности растворной смеси. Для приготовления одного замеса раствора, необходимого для изготовления трех образцов-балочек взвешивалось 600 г цемента, использовался песок общей массой 1200 г, предварительно просеянный на фракции в соотношении, указанной в табл. 2.8. Были приготовлены равноподвижные растворные смеси. Водоцементное отношение подбиралось исходя из условия равноподвижности растворных смесей, контролируемой расплывом на встряхивающем столике в пределах 108–115 мм.

Таблица 2.8 – Расход фракций песка для приготовления трех образцов-балочек цементно-песчаного раствора

Фракция	Фр. <0,315 мм	Фр. 0,315-0,63 мм	Фр. 0,63-2,5 мм
Доля фракции	51,8 %	32,2 %	16 %
Расход доли фракции, г на форму	621	387	192
Общий расход, г на форму	1200		

В предварительно протертую влажной тканью чашу затворения высыпают песок, выливают воду и добавляют цемент. Суперпластификаторы добавлялись с

последней третью-четвертью воды затворения в предварительно перемешанную бетонную смесь. После приготовления растворные смеси уложены в формы-балочки согласно ГОСТ 310.4-81[36].

Время вибрирования растворных смесей в зависимости от типа добавляемого суперпластификатора показано в табл. 2.9.

Таблица 2.9 –Время вибрирования растворных смесей

Добавка	Время вибрирования, с
Без добавок	80
СП на основе СНФ (С-3)	40
СП на основе ПКЭ (Sika Viscocrete 24 HE)	10

Образцы твердели в пропарочной камере КПУ-1М в условиях тепловлажностной обработки по установленному режиму (см. рис. 2.2). После ТВО формы распалубливались и образцы испытывались на сжатие согласно ГОСТ 310.4-81 [36] на разные сроки: после ТВО, на 3, 7 и 28 сутки.



Рисунок 2.2 – Пропарочная камера КПУ-1М для ТВО бетонов

2.2.4 Методика определения прочности бетонных образцов по контрольным образцам

Для определения прочности бетонов на сжатие согласно ГОСТ 10180-2012 [30] изготавливались образцы-кубы с ребром длиной 100 мм.

В качестве опалубки применялась трехсекционная форма ЗФК-100 (рис. 2.3) для изготовления контрольных образцов бетона.



Рисунок 2.3 – Форма ЗФК-100 для изготовления образцов бетона

Образцы без добавок подвергались вибрированию в течение 20 с, с суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE – в течение 5 с. Подвижность по осадке конуса Абрамса – П2. Формы с бетонными смесями помещались в пропарочную камеру КПУ-1М.

Образцы испытывались на прочность при сжатии после ТВО, на 7 и 28 сутки.

2.2.5 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ выбран в качестве основного для определения минералогического состава, изменения и идентификации продуктов новообразований в процессе твердения цементного камня. Исследования проводился на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance, оборудованном приставкой Vario и линейным координатным детектором Vantec (рис. 2.4).

Использовано излучение $\text{CuK}\alpha$, монохроматизированное ($\lambda(\text{Cu-K}) = 1,54060 \text{ \AA}$) германиевым изогнутым монохроматором Йохансона, режим работы рентгеновской трубки 30-40 kV, 20-30 mA, шаг сканирования 0.05° . Эксперименты выполнены при температуре 20°C в геометрии Брэгг-Брентано с плоским образцом. Построение и анализ дифрактограмм выполнены с использованием программы Bruker DiffracEva.



Рисунок 2.4 – Дифрактометр D8 ADVANCE для определения фазового состава продуктов новообразований цементного камня

Особое внимание уделялось подготовке образцов для испытания в возрасте 2 часов ТВО. Образцы цементного камня немедленно раздавлены и стерты в порошок, далее порошок просеивался через сито размером ячейки $0,27 \text{ мм}$. Просеянный образец помещался в пластмассовую емкость объемом 50 мл и заливался $99,9\%$ -ным раствором изопропилового спирта.

2.2.6 Оптическая микроскопия

Плотность структуры цементного камня оценивалась с помощью поляризационно-интерференционного микроскопа BIOLAR, подключенного к ПК (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Поляризационно-интерференционный микроскоп BIOLAR

2.2.7 Сканирующая электронная микроскопия

Исследования полученных образцов цементного камня проводились с использованием электронного микроскопа, оснащенного спектрометром дисперсии энергии Aztec X-MAX. Разрешающая способность спектрометра составляет 127 эВ. Цементный камень напыляли сплавом золота на турбомолекулярном насосном распылителе T150 ES (Quorum Technologies, Великобритания) под вакуумом. СЭМ образцов осуществлена на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе Merlin компании CARL ZEISS (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Сканирующий электронный микроскоп Merlin (компании CARL ZEISS)

2.3 Планирование эксперимента с помощью математического моделирования

Процесс получения многофакторных математических моделей включает следующие этапы: выбор объекта исследования и параметра моделирования, выбор переменных факторов и интервалов их варьирования, выбор математического плана и условия проведения эксперимента, проведение эксперимента по выбранному плану, статистическую обработку результатов эксперимента, расчет коэффициентов модели, проверку статистических гипотез, получение математической модели зависимости параметра оптимизации от выбранных переменных факторов.

Выбрана локально-интегральная полиномиальная модель для решения практических задач.

Результаты опытов обработаны методами математической статистики, получая при этом в алгебраической форме уравнения, выражающие зависимости исследуемых свойств бетона от исходных факторов.

Двухфакторная модель второго порядка имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2,$$

и, в зависимости от наличия коэффициентов b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij} представляет собой одну из поверхностей второго порядка. Проекция поверхности Y на плоскость факторов x_1 и x_2 изображается в виде линий равного выхода (изолиний) во всех точках которых выход Y имеет постоянное значение Y_A независимо от координат x_1 и x_2 [108].

2.3.1 Концепция математического моделирования

Данные по обследованию для каждого из параметров выхода Y , целесообразно представлять в виде информационной таблицы результатов (см.

табл. 2.10), где можно фиксировать и проводить первичную статистическую обработку.

Таблица 2.10 – Результаты обследования статистической обработки

№ п/п	Объект, обследования	Значения факторов, X_i	Число измерений, n	Значения параметра выхода, Y_i	Среднее арифм., \bar{Y}	Дисперсия, S^2_i
1		$X_{11} X_{22} \dots X_{in}$	Удобно, если число замеров $n = \text{const}$	$Y_{11} Y_{12} Y_{13} \dots Y_{1n}$	Y_1	S^2_1
2		$X_{11} X_{22} \dots X_{in}$		$Y_{21} Y_{22} Y_{23} \dots Y_{2n}$	Y_2	S^2_2
3		$X_{11} X_{22} \dots X_{in}$		$Y_{31} Y_{32} Y_{33} \dots Y_{3n}$	Y_3	S^2_3
...	
N		$X_{11} X_{22} \dots X_{in}$		$Y_{N1} Y_{N2} Y_{N3} \dots Y_{1n}$	Y_I	S^2_N

После обследования необходимо исключить из рассмотрения аномальные измерения – промахи, грубые погрешности. Критерий проверки:

$$V_{\max(\min)} = \frac{(Y_{\text{подозр}} - \bar{Y})}{S \sqrt{\frac{n-1}{n}}}$$

Если $V_{\max(\min)}$ превышает $V_{\text{кр}}$, оно исключается из дальнейшей статистической обработки.

На основании данных обследования рассчитывают среднее арифметическое параметра выхода. Обследование должно отвечать принципу эффективности, то есть минимума дисперсий. Наилучшими оценками параметров модели являются те, для которых сумма квадратов отклонений от опытных значений минимальна.

2.3.2 Регрессионный анализ

Основной задачей регрессионного анализа является вычисление параметров и статистическое исследование математических моделей, полученных по экспериментальным данным.

Регрессионный анализ предполагает вычисление оценок методом наименьших квадратов и проверку статистических гипотез об однородности дисперсий во всех точках обследования, значимости коэффициентов регрессии и в проверке адекватности математической модели полученным экспериментальным данным.

Следует проверять статистическую гипотезу об однородности оценок дисперсии, полученных в разных точках области обследования. Если в каждой точке, намеченной для обследования, выполняется одинаковое число параллельных измерений m , проверка однородности дисперсий проводится по G -критерию Кохрена.

Критерий Кохрена обеспечивает проверку воспроизводимости результатов с заданной доверительной вероятностью. Последовательность проверки статистической гипотезы включает следующие действия. Для каждой точки обследования вычисляют выборочное среднее $\bar{Y}_u = \frac{1}{m} \sum_{uv} Y_{uv}$ и выборочную дисперсию:

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum (Y_{um} - Y_{uv})^2.$$

Выбирают максимальную по величине дисперсию и сумму дисперсий для всех точек объекта обследования. Вычисляют расчетный критерий Кохрена:

$$G_{расч} = \frac{S_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{\{Yu\}}^2}; \text{ где } S_{\{Yu\}}^2 = \frac{1}{m-1} = \sum_{w=1}^m (Y_{um} - Y_{uw})^2.$$

Критическое значение критерия Кохрена $G_{кр}$ выбирают по таблице в зависимости от числа степеней свободы $F=m-1$, от числа обследованных точек по объекту с учетом выбранной доверительной вероятности P_d . Оценки дисперсий признаются однородными, если по G -критерию нуль- гипотеза подтвердится:

$$G_{кр} > G_{расч}.$$

С риском, соответствующим принятой доверительной вероятности можно допустить гипотезу об однородности дисперсий и рассчитать среднюю дисперсию по всему проведенному обследованию:

$$S_{\{Y\}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_{\{Y_u\}}^2$$

Оценка $S_{эв} = \sqrt{S_{\{Y\}}^2}$ называется ошибкой эксперимента.

При проверке гипотезы о значимости коэффициентов уравнения регрессии используется t - критерий Стьюдента при числе степеней свободы $f=(m-1)N$. Оценка дисперсии измерений в определении среднего рассчитывается по формуле

$S_{\{Y\}}^2 = \sum_{u=1}^N S_u^2 : (Nm)$, где S_u^2 - дисперсия измерения в u -ой строке математического плана эксперимента, N – число опытных точек в матрице эксперимента, m – число дублирующих измерений в одной опытной точке.

Оценка ошибки эксперимента по измерениям определяется по формуле:

$$S_{э} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{Nm}}$$

Проверка адекватности моделей проводится по критерию Фишера при доверительных значимых коэффициентов вероятности P_d и числе степеней свободы $f_1=N-k$, $f_2=(m-1)N$ по приведенной сумме квадратов отклонений $SS_{на}$ средних экспериментальных значений параметра оптимизации \bar{Y}_u от предсказываемых моделью значений \hat{Y}_u .

Оценка дисперсии неадекватности модели вычисляется по формуле:

$$S_{на}^2 = \frac{SS_{на}}{N-k}$$

Адекватность модели по критерию Фишера рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{S_{на}^2}{S_{\{Y\}}^2}$$

Уравнение регрессии считается адекватным при $F_{расч} < F_{табл}$.

2.4 Выводы по главе 2

- Проведены испытания используемых материалов на соответствие требованиям нормативных документов;
- Анализ свойств применяемых крупного и мелкого заполнителя, суперпластификаторов и ускорителей твердения показал возможность их использования для исследований цементных паст, растворных смесей и тяжелого бетона;
- Выбраны стандартные методики, описанные в ГОСТ и EN для исследования свойств цементных паст, растворов, бетонных смесей и получаемых из них бетонов;
- Рассмотрена возможность планирования эксперимента с помощью математического моделирования.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В УСЛОВИЯХ ТВО

3.1 Исследование сроков схватывания модифицированных цементных паст при различных температурах

3.1.1 Сроки схватывания цементных паст, модифицированных СП на основе ПКЭ

Исследования сроков схватывания проводили на равноподвижных цементных пастах. Водоцементное отношение подбиралось исходя из одинаковой нормальной густоты цементного теста. Водоцементное отношение цементных паст снижалось благодаря водоредуцирующему действию ПКЭ на 13,3 – 33,3 %. План эксперимента показан в табл. 1.

Таблица 3.1 – Значения водоцементного отношения цементных паст в зависимости от содержания добавки Sika Viscocrete 24 HE

№	Дозировка Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц	В/Ц
1	-	0,27
2	0,4 %	0,234
3	1,2 %	0,20
4	2,0 %	0,18

Образцы помещались в термостат ТС-100 производства завода Щекино-ВНИИР Тульской области.

Графическое изображение набора схватывания цементных паст в зависимости от и дозировки суперпластификатора показано на рисунке 3.1.

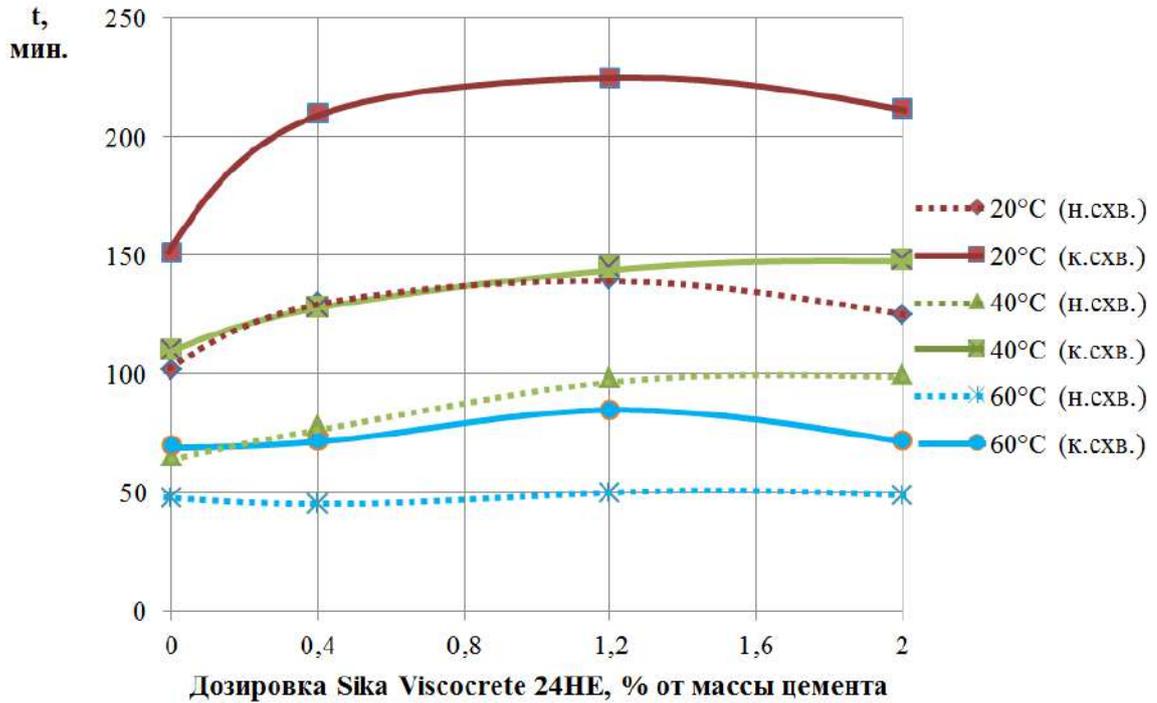


Рисунок 3.1 – Сроки схватывания цементных паст твердеющих при вариативных значениях температуры в зависимости от дозировки ПКЭ

Исследования показали, что при 20 °C сроки схватывания цементных паст увеличиваются при введении Sika Viscocrete 24 HE в количестве до 1,2 %. Дальнейшее повышение количества вводимого СП не приводит к значительному увеличению или уменьшению сроков начала и конца схватывания цемента [53; 91; 92; 105; 111; 154; 155]. Удельная поверхность цементной пасты постоянно увеличивается в течение первых 120 минут после добавления воды. Последние изменения происходят быстрее при высокой температуре. Следовательно, увеличение температуры является более критичным фактором влияния на кинетику твердения цементного камня, чем действие ПКЭ. С другой стороны, количество пластификатора в цементном камне может быть достаточным для адсорбции на поверхности образующихся продуктов гидратации, и повышение его содержания с 1,2 % до 2,0 % неэффективно [53; 105; 204].

Сроки схватывания модифицированных ПКЭ цементных паст в зависимости от температуры пропаривания изображено на рисунке 3.2.

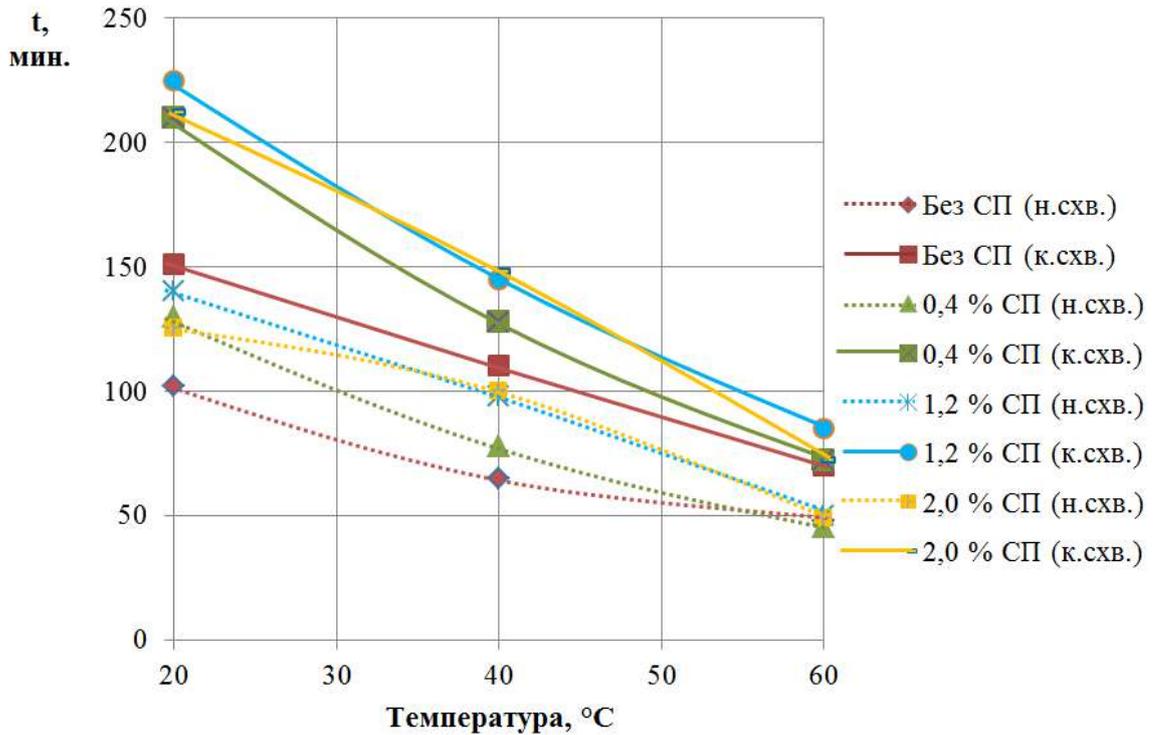


Рисунок 3.2 – Сроки схватывания цементных паст, твердеющих при различных значениях дозировки ПКЭ в зависимости от температуры пропаривания

Результаты эксперимента, представленные на рис. 3.2 также свидетельствуют о более значительном влиянии температуры твердения, чем содержание ПКЭ в цементной системе [204].

3.1.2 Сроки схватывания цементных паст, модифицированных СП на основе СНФ

Для сравнения проведено исследование сроков схватывания при аналогичных условиях твердения п. 3.1.1. цементных паст, модифицированных суперпластификатором на основе СНФ.

Исследование сроков схватывания цементных паст, модифицированных добавкой С-3, показало увеличение времени начала и конца схватывания с увеличением дозировки суперпластификатора при различном ТВО, что не наблюдается при применении ПКЭ (см. рис. 3.3-3.4) [53; 204].

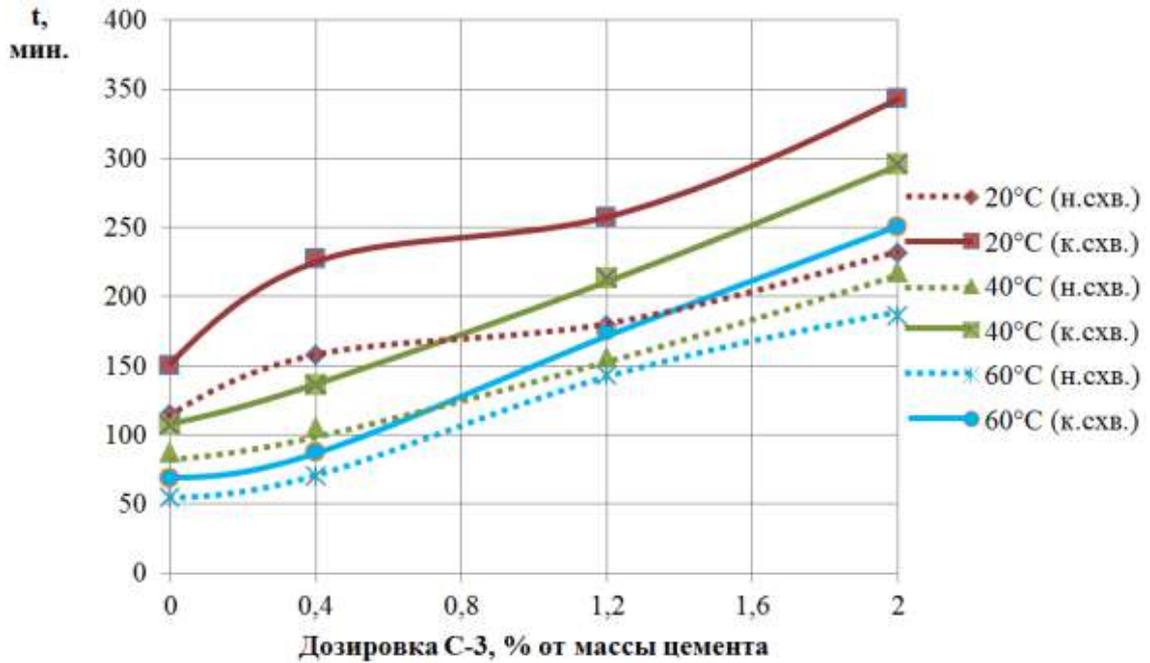


Рисунок 3.3 – Сроки схватывания цементных паст, твердеющих при вариативных значениях температуры в зависимости от дозировки С-3

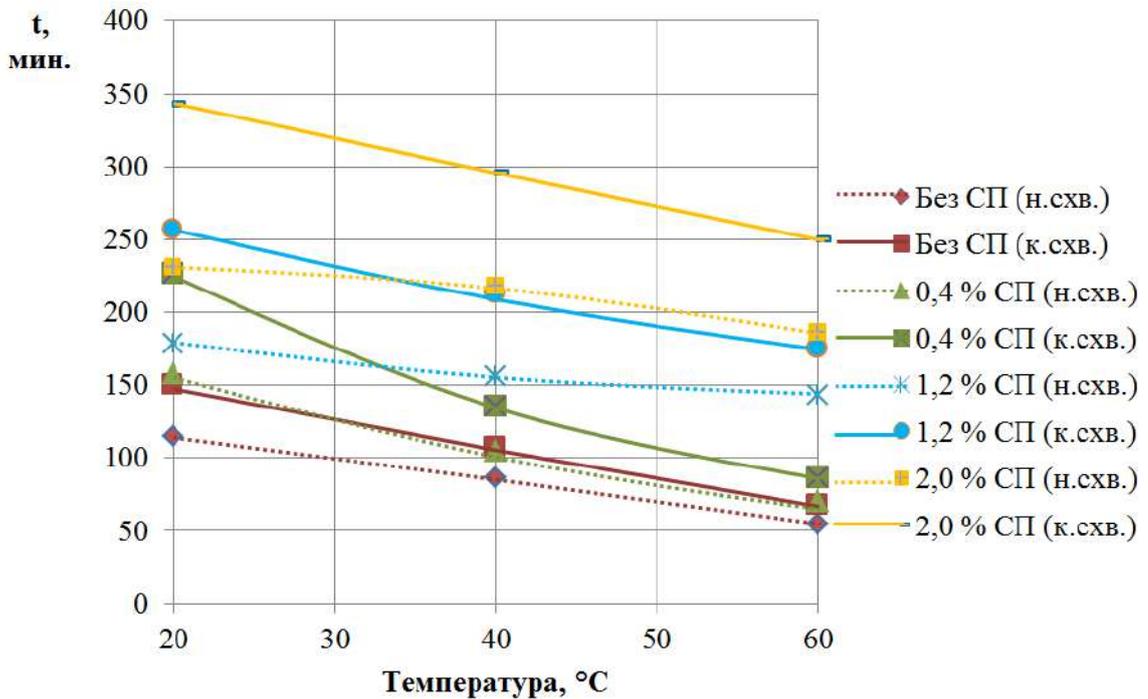


Рисунок 3.4 – Сроки схватывания цементных паст, твердеющих при различных значениях дозировки С-3 в зависимости от температуры пропаривания

Результаты показывают, что введение С-3 в цементные пасты даже в небольших количествах **вызывают замедление гидратации цементного камня** вследствие уменьшения проницаемости воды через создаваемые ими

адсорбционные слои. С увеличением дозировки С-3 адсорбционные слои становятся менее проницаемыми и скорость гидратации снижается. Совместное применение суперпластификаторов с ускорителями твердения может быть использовано для увеличения ранней прочности [1; 53; 58; 93; 94; 99; 102; 103; 105; 126]. Основным механизмом действия анионоактивных суперпластификаторов, к которым относится С-3, является эффект электростатического отталкивания частиц цемента, вызванный увеличением абсолютного значения ξ – потенциала поверхности частиц в результате адсорбции суперпластификатора. При этом с ростом величины адсорбции повышается значение ξ – потенциала и, как следствие, усиливается пластифицирующий эффект добавки [3; 82; 107].

3.2 Исследование физико-механических свойств цементного камня, модифицированного ПКЭ

Исследованы физико-механические свойства модифицированного Sika Viscocrete 24 HE цементного камня размером 20x20x20 мм на прочность при сжатии после проведения ТВО и на 28-е сутки. Методом гидростатического взвешивания определялась плотность цементного камня, проведено измерение открытой капиллярной пористости. Аналогичные показатели были определены для образцов, не подвергающихся ТВО [204].

Суперпластификатор позволил снизить водопотребность цементных паст на 17 % при его дозировке в 0,4 % от массы цемента при условии сохранения равноподвижности.

Составы исследуемых образцов цементного камня, показатели прочности после ТВО и на 28-е сутки, плотности камня, открытой капиллярной пористости приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Составы исследуемых образцов цементного камня с показателями физико-механических свойств

№	Характеристика состава			Прочность, в МПа				Плотность камня, г/см ³	Открытая капиллярная пористость, %
	В/Ц	Режим ТВО	Sika Viscocrete 24 HE, % массы цемента	после ТВО	на 3 сутки	на 7 сутки	через 28 суток		
1	0,267	0-6-2	–	31,8	45,2	45,8	47,5	2,09	15,46
2	0,231	0-6-2	0,4	35,7	58,1	60,1	60,8	2,25	10,16
3	0,267	2-6-2	-	36,5	47,3	49,2	49,3	2,11	13,66
4	0,231	2-6-2	0,4	39,2	60,4	62,7	61,7	2,25	9,74
5	0,267	Без ТВО	-	-	23,1	32,6	50,2	2,12	16,50
6	0,231	Без ТВО	0,4	-	18,2	38,6	64,4	2,27	11,49

Прочность после ТВО цементного камня, модифицированного суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE, возрастает на 7,4-12,3 % в сравнении с прочностью образцов без добавок. Наблюдается незначительное снижение прочности камня после ТВО без предварительного выдерживания (за 8 часов твердения при режиме 0-6-2 ч прочность отстает на 9,0-13,0 % в сравнении с прочностью цементного камня, твердевшего в течение 10 часов при режиме 2-6-2 ч).

Однако, прочностные показатели камня, твердеющего при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч на 28-е сутки практически равны, расхождение в пределах 1,5-1,9%, что свидетельствует о возможности снижения времени предварительного выдерживания и возможности сокращения времени ТВО.

Прочность на сжатие цементного камня, твердеющего при ТВО по схеме (0-6-2) ч на 28 сутки ниже прочности камня, твердеющего при нормальных условиях на 5,7 % (для бездобавочного состава) и на 5,9 % (для состава, модифицированного поликарбоксилатным СП Sika Viscocrete 24 HE), что связано с возникновением растягивающих напряжений в структуре цементного камня при повышенных температурах.

Плотность цементного камня, модифицированного суперпластификатором, выше плотности образцов без добавок до 7,8 %, что свидетельствует об уплотнении его структуры.

Открытая капиллярная пористость камня с 0,4% от массы цемента Sika Viscocrete 24 HE ниже данных показателей бездобавочных составов на 24,1-37,0 %, в то время как отказ от периода предварительного выдерживания малозначительно влияет на данный показатель. Снижение капиллярной пористости может косвенно свидетельствовать об улучшении показателей долговечности модифицированных цементных систем.

3.3 Особенности формирования фазового состава гидратных новообразований в модифицированном цементном камне при различных режимах ТВО

3.3.1 Структурообразование цементного камня при различных периодах предварительного выдерживания ТВО

Для выявления характера изменений фазового состава при гидратации и структурообразовании цементных систем выполнен рентгенофазовый анализ образцов цементного камня непосредственно после ТВО и на 28-е сутки [204].

Исследовано 4 состава цементного камня, из которых 2 состава бездобавочные, 2 состава с модификатором на основе эфиров поликарбоксилатов (см. табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Составы исследуемых образцов цементного камня, твердеющих при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч при T=60°C

№	Характеристика состава		
	В/Ц	Режим ТВО	Sika ViscoCrete 24HE, % от массы цемента
1	0,267	0-6-2	–
2	0,231	0-6-2	0,4
3	0,267	2-6-2	-
4	0,231	2-6-2	0,4

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены рентгенограммы цементного камня после ТВО по режиму (0-6-2) ч бездобавочного состава и пластифицированного 0,4 % Sika Vicsocrete 24 HE соответственно. Анализ полученных дифрактограмм показывает, что цементный камень с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора характеризуется относительно бóльшим количеством пиков непрореагировавших минералов:

- алита (Ca_3SiO_5) с набором межплоскостных расстояний $d = [5,93; 3,03; 2,97; 2,78; 2,74; 2,60; 2,32; 2,18; 1,98 \text{ \AA}]$;
- белита ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) с $d = [2,88; 2,74; 2,60; 2,29; 1,98 \text{ \AA}]$;
- браунмиллерита ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe}^{+3})_2\text{O}_5$) с $d = [7,29; 3,66; 2,77; 2,66; 2,63; 2,05; 1,93 \text{ \AA}]$;
- трехкальциевого алюмината ($2,68 \text{ \AA}$).

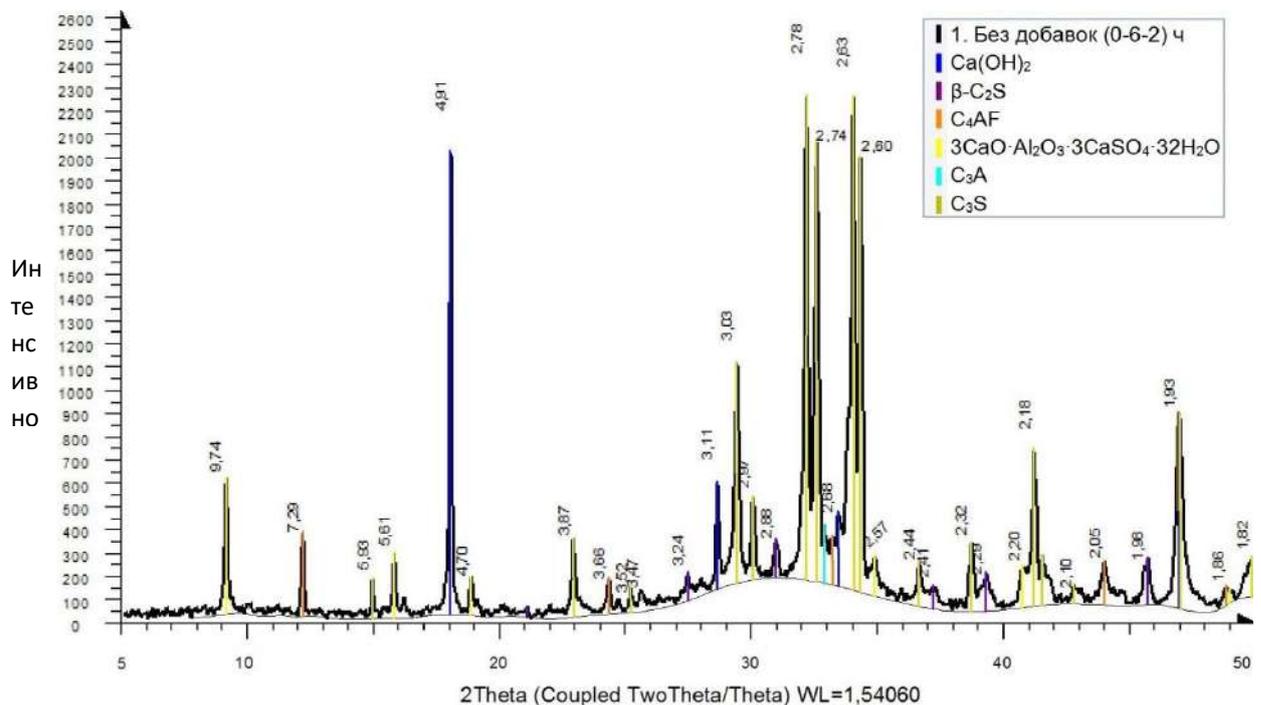


Рисунок 3.5 – Рентгенограмма образца цементного камня без добавок после ТВО по режиму (0-6-2) ч (образец № 1)

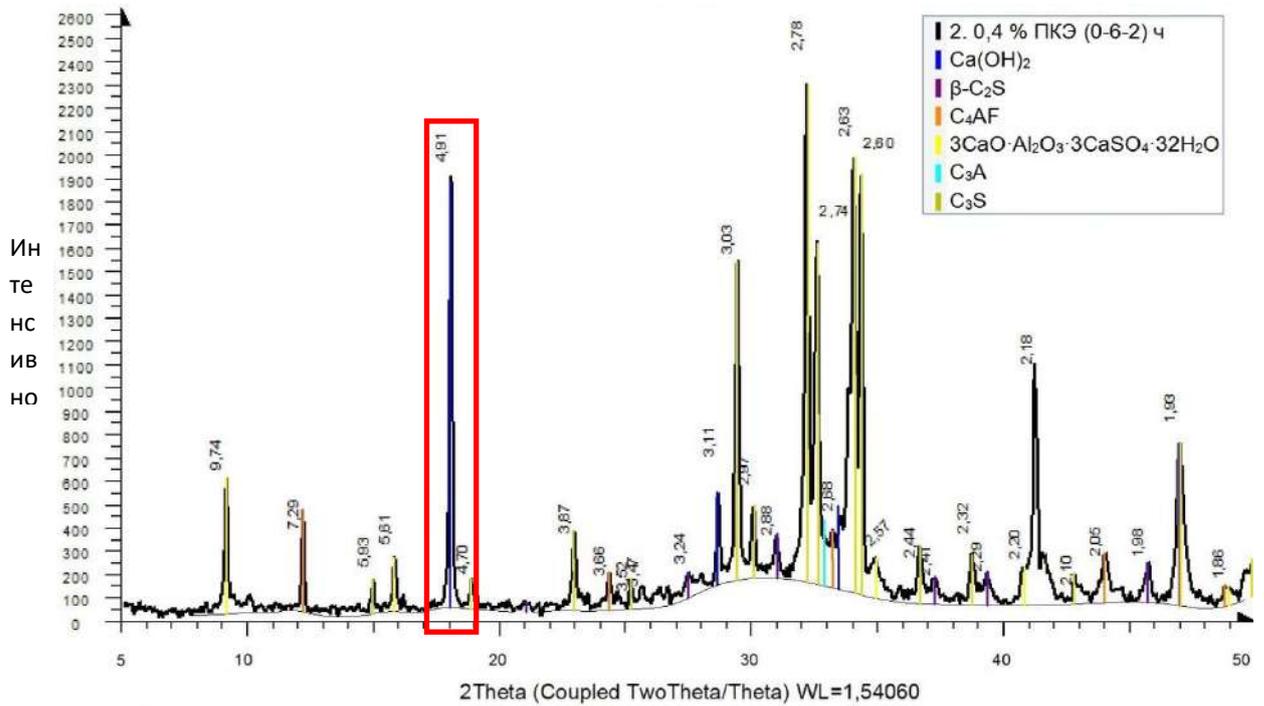


Рисунок 3.6 – Рентгенограмма образца цементного камня с 0,4 % ПКЭ после ТВО по режиму (0-6-2) ч (образец № 2)

Наблюдается пониженное содержание портландита $d = [4,91; 3,11; 2,63; 1,93 \text{ \AA}]$ для пластифицированного ПКЭ состава (образец № 2) в сравнении с бездобавочным цементным камнем. Аналогично, содержание этtringита ниже в образце № 2, о чем свидетельствуют дифракционные максимумы с межплоскостными расстояниями $d = [9,73; 5,61; 4,70, 2,20 \text{ \AA}]$, что связано с замедлением гидратации цемента вследствие избирательной адсорбции ПКЭ на минералах C_3A и C_4AF , а также на новообразованиях этtringита и моносульфата.

На рисунках 3.7-3.8 представлены рентгенограммы образцов цементного камня после ТВО по режиму (2-6-2) ч.

Анализ дифракционных максимумов показывает аналогичную тенденцию снижения количества минералов этtringита и портландита в цементном камне в присутствии суперпластификатора.

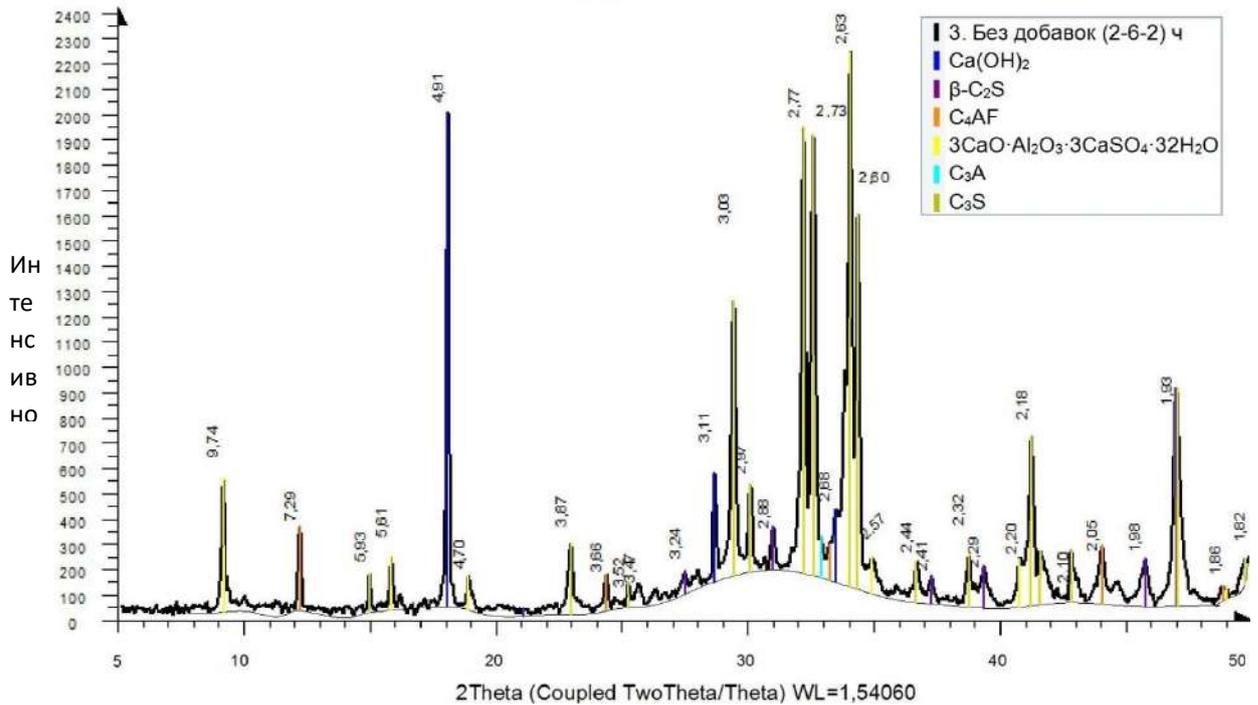


Рисунок 3.7 – Рентгенограмма образца цементного камня без добавок после ТВО по режиму (2-6-2) ч (образец № 3)

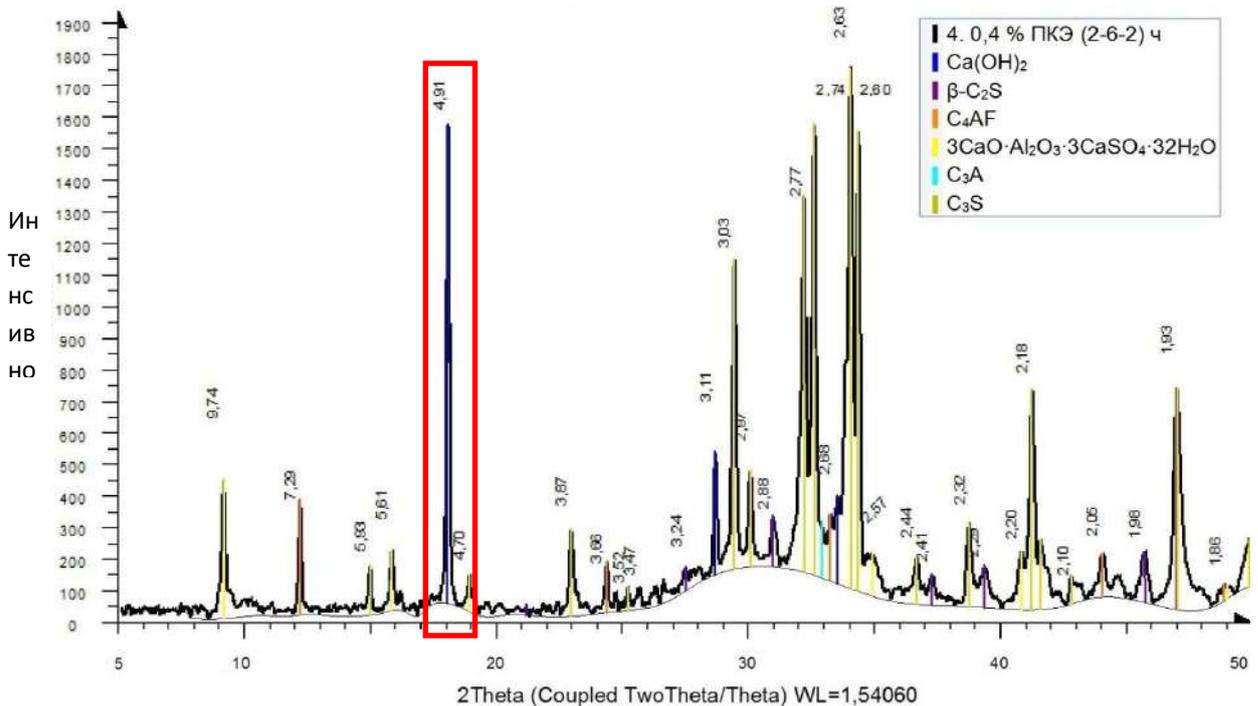


Рисунок 3.8 – Рентгенограмма образца цементного камня с 0,4 % ПКЭ после ТВО по режиму (2-6-2) ч (образец № 4)

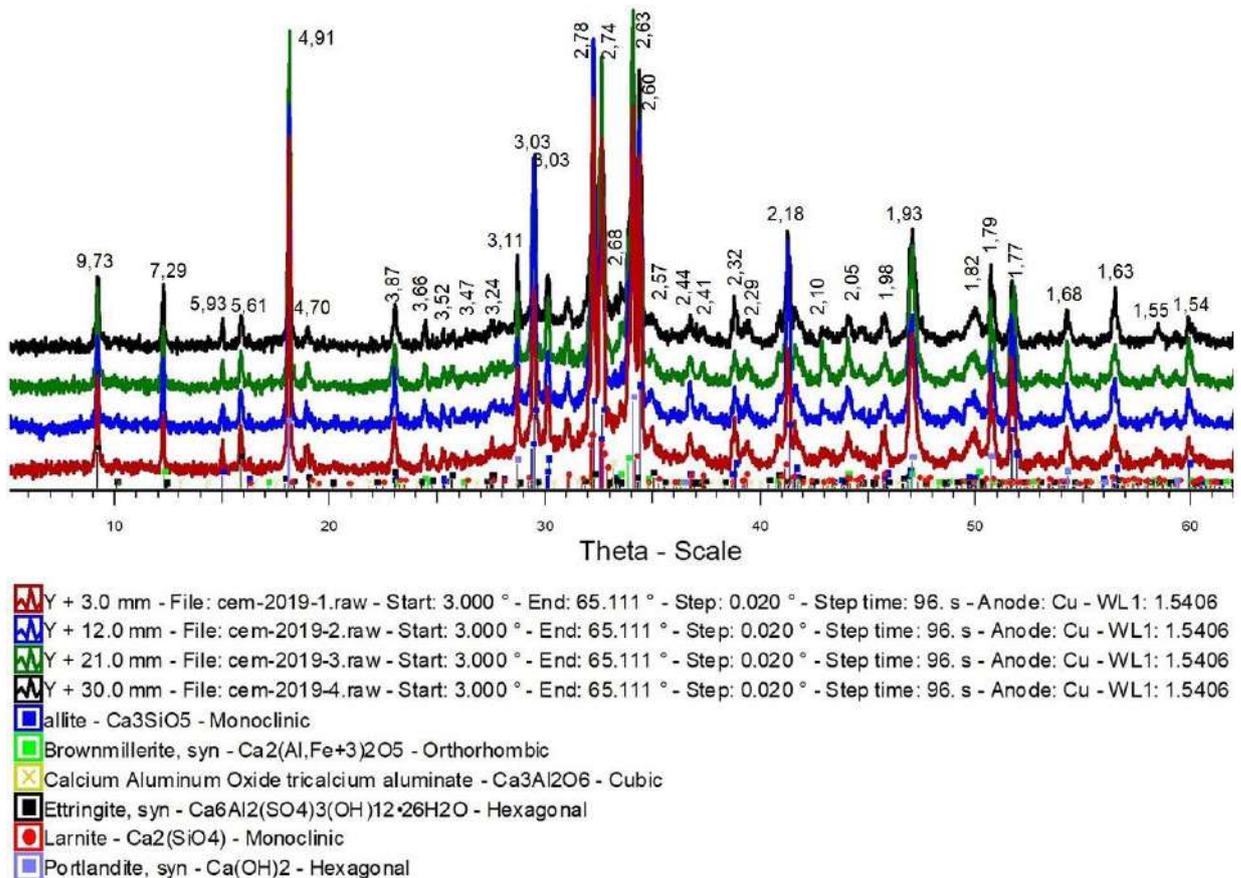
Дифракционные максимумы, соответствующие непрореагировавшему алиту $d = [3,03; 2,97; 2,77; 2,74; 2,32; 2,18 \text{ \AA}]$ имеют большую интенсивность для составов с суперпластификатором по сравнению с образцом без добавок, что свидетельствует о замедлении процессов его гидратации. Содержание

браунмиллерита $d = [7,29; 3,66; 2,05 \text{ \AA}]$ и трехкальциевого алюмината $d = [7,29; 3,66; 2,05 \text{ \AA}]$ в пластифицированных составах выше, что подтверждает высокую способность адсорбции поликарбоксилатного модификатора на вышеназванных минералах [95; 106; 113; 156].

Небольшое снижение степени гидратации алита в образце № 4 привело к уменьшению количества портландита $d = [4,91; 3,11; 2,63; 1,93 \text{ \AA}]$ по сравнению с образцом без добавок.

Аналогично, проведен рентгенофазовый анализ этих же образцов цементного камня на 28-е сутки твердения.

Рентгенограммы показаны на одном рисунке с целью лучшей наглядности и относительного сравнения различных гидратных новообразований (см. рис. 3.9).



Примечание: Дифрактограмма образца № 1 (без СП по режиму (0-6-2)) ч выделена красным цветом; образца № 2 (0,4 % СП по режиму (0-6-2) ч) – синим цветом; образца № 3 (без СП по режиму (2-6-2) ч) – зеленым цветом; образца № 4 (0,4 % СП по режиму (2-6-2) ч) – черным цветом

Рисунок 3.9 – Рентгенограммы образцов цементного камня после ТВО по режимам (0-6-2) ч и (2-6-2) ч на 28-е сутки твердения (образцы № 1-4)

Количественный анализ содержания минералов в образцах цементного камня показан в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Минералогический состав цементного камня

№	Режим ТВО	Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Содержание минерала, % масс.					
			C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	Ca(OH) ₂	AFt	C ₃ A
После ТВО								
1	0-6-2	-	43,3	22,4	11,8	17,4	0,6	4,5
2	0-6-2	0,4 %	47,7	20,3	12,2	16,1	0,5	3,2
3	2-6-2	-	43,7	22,5	12,1	17,3	0,6	3,8
4	2-6-2	0,4 %	47,4	20,6	12,4	16,3	0,5	2,8
Через 28 суток								
1	0-6-2	-	43,1	21,9	11,6	23,2	0,2	-
2	0-6-2	0,4 %	44,5	20,3	12,1	23,0	0,1	-
3	2-6-2	-	43,2	21,5	11,5	23,7	0,1	-
4	2-6-2	0,4 %	44,0	21,1	11,9	22,9	0,1	-

Анализ минералогического состава цементного камня свидетельствует о незначительных структурных изменениях при отказе от периода предварительного выдерживания цементных систем, модифицированных ПКЭ. Исследование минералогического состава цементного камня в возрасте 28 суток показало тенденцию выравнивания содержания минералов.

3.3.2 Исследование фазового состава продуктов новообразований при модифицировании цементного камня суперпластификаторами различного действия

Для получения дополнительных данных о минералогическом составе цементного камня при модифицировании цементных паст выполнено исследование 3 различных составов (см. табл. 3.5). Причем рентгенофазовый анализ выполнялся после 2 часов ТВО при 60 °С и после ТВО по режиму (0-6-2) ч.

Таблица 3.5 – Составы исследуемых образцов цементного камня

№ образца	Режим ТВО при T=60 °С	Добавка	Дозировка добавки
1	2 ч	-	-
2	2 ч	Sika Viscocrete 24 HE	0,4 %
3	2 ч	C-3	0,4 %
4	(0+6+2) ч	-	-
5	(0+6+2) ч	Sika Viscocrete 24 HE	0,4 %
6	(0+6+2) ч	C-3	0,4 %

На рисунке 3.10 представлена рентгенограмма образца цементного камня без добавок после 2 часов ТВО (образец № 1).

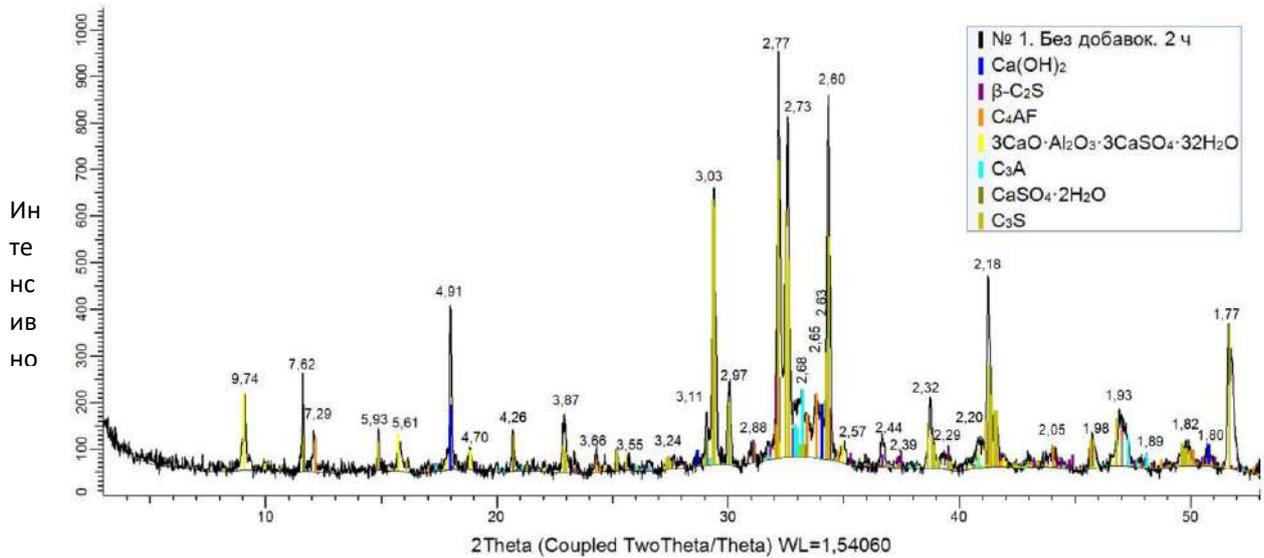


Рисунок 3.10 – Рентгенограмма образца цементного камня без добавок после 2 часов ТВО при 60 °С (образец № 1)

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены рентгенограммы образца цементного камня с 0,4 % поликарбоксилатного суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE и 0,4 % добавки C-3 (продукта поликонденсации нафталин сульфокислоты и формальдегида) после 2 часов ТВО (образцы № 2 и № 3 соответственно).

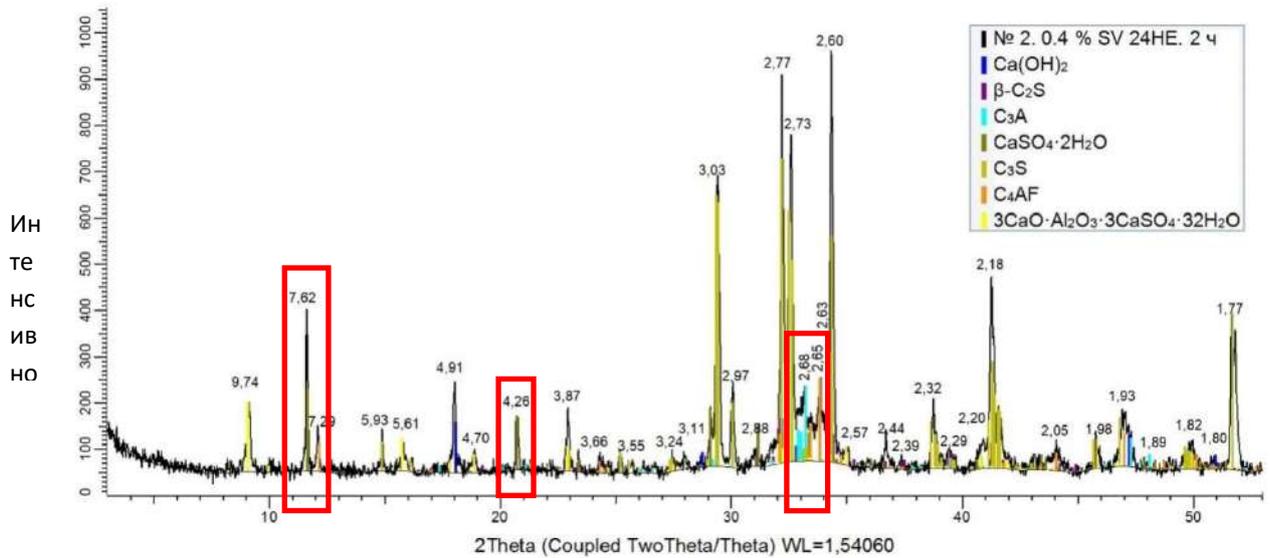


Рисунок 3.11 – Рентгенограмма образца цементного камня с Sika Viscocrete 24 HE после 2 часов ТВО при 60 °С (образец № 2)

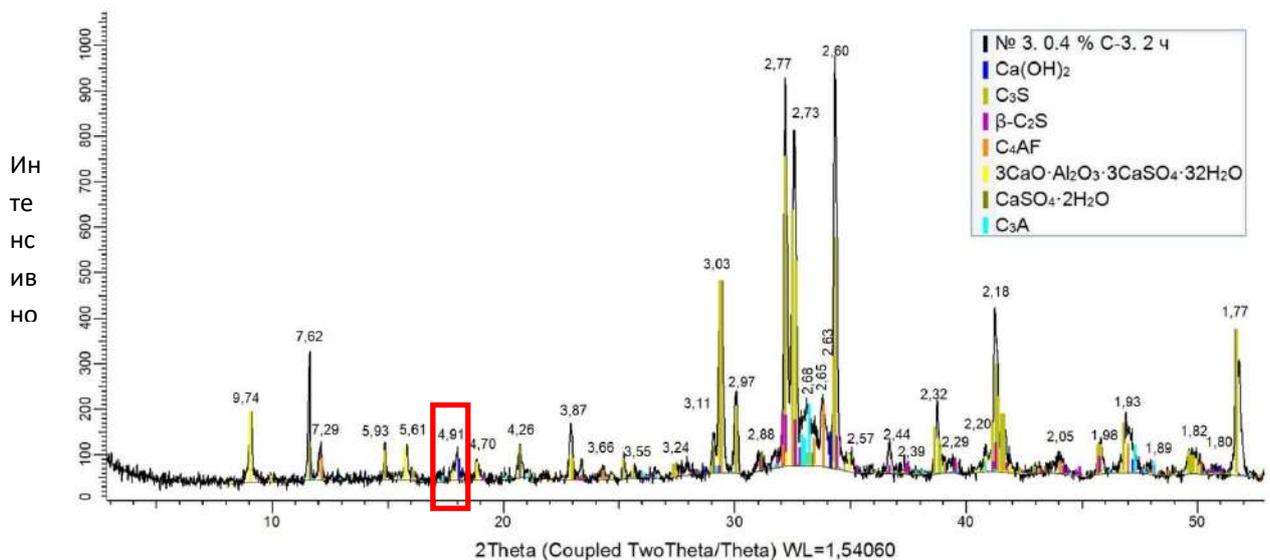


Рисунок 3.12 – Рентгенограмма образца цементного камня, модифицированного С-3, после 2 часов ТВО при 60 °С (образец № 3)

Установлено, что модифицирование цементных паст добавкой поликарбоксилатного типа приводит к блокированию положительно-потенциальных минералов трехалюмината с $d = [2,68 \text{ \AA}]$ и браунмиллерита с $d = [7,29; 2,65; 2,05 \text{ \AA}]$, о чем свидетельствует увеличение интенсивности соответствующих дифракционных максимумов по сравнению с образцами № 1 (без добавок) и № 3 (с добавкой СП на основе сульфированных нафталинформальдегидов). Кроме того, в образце № 2 снизилось количество

этtringита с $d = [9,73; 5,61; 4,70; 2,20 \text{ \AA}]$, что является следствием адсорбции ПКЭ на данном минерале, а также отсутствия допуска воды к минералу C_3A .

Количество клинкерных минералов алита и белита в образце с поликарбоксилатным СП выше по сравнению с бездобавочным образцом № 1 и с СП на основе СНФ № 3, о чем свидетельствует увеличение дифракционных максимумов с межплоскостными расстояниями $d = [5,93; 5,48; 3,03; 2,96; 2,77; 2,74; 2,60; 2,32; 1,98; 1,77 \text{ \AA}]$ и $d = [2,88; 2,77; 2,60; 2,29 \text{ \AA}]$ соответственно.

Модифицирование цементных паст СП на основе СНФ привело к уменьшению содержания портландита $d = [4,91; 3,11; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}]$ по сравнению с образцами № 1 и № 2. При этом количество образовавшегося этtringита $d = [9,73; 5,61; 4,70; 2,20 \text{ \AA}]$ значительно больше, чем у образца № 1 (без добавок) и № 2 (с ПКЭ), что свидетельствует об образовании рыхлой алюминатной структуры на первые 2 часа твердения у образца с С-3. Данный феномен объясняется различным типом действия поликарбоксилатного СП (преимущественно стерический эффект отталкивания) и СП на основе продуктов поликонденсации СНФ (электростатический эффект).

В образцах с поликарбоксилатным СП на 2 часа ТВО зафиксированы отчетливые пики с $d = [7,62; 4,26 \text{ \AA}]$, соответствующие минералу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, добавляемого в цемент для регулирования сроков схватывания. В образцах № 1 и № 3 относительная интенсивность пиков ниже на 29 и 41 % соответственно в сравнении с пиком гипса образца № 2, что позволяет сделать вывод о блокировке трехкальциевого алюмината, вследствие чего обнаружены несвязанные минералы $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

На рисунках 3.13, 3.14 и 3.15 представлены рентгенограммы образцов цементного камня без добавок и с различными суперпластификаторами после ТВО по режиму (0-6-2) ч (образцы № 4, 5 и 6 соответственно).

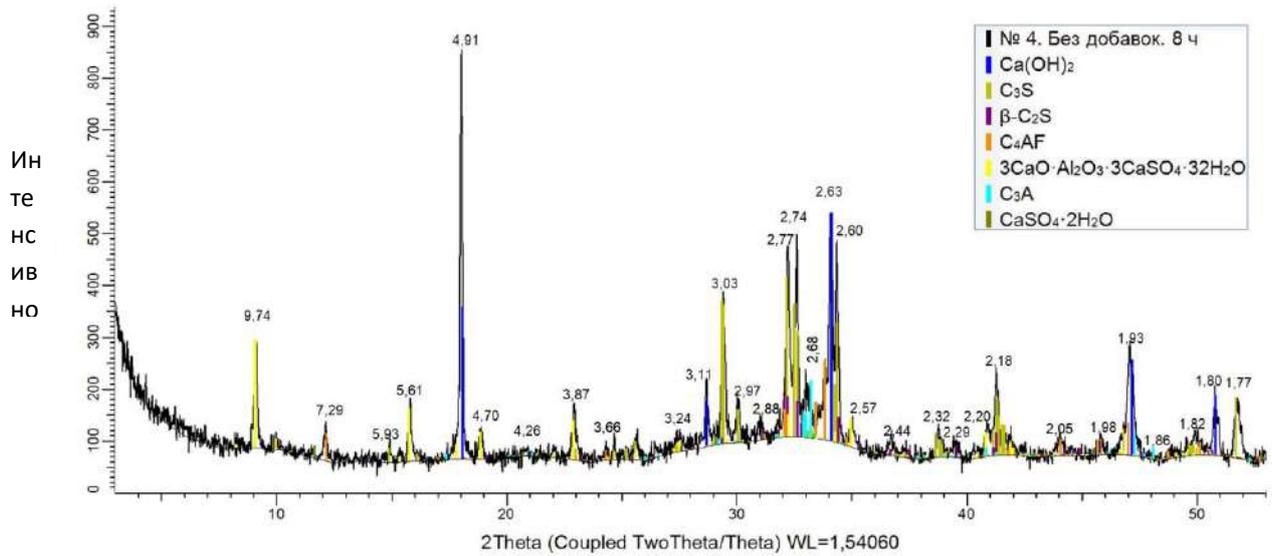


Рисунок 3.13 – Рентгенограмма образца цементного камня без добавок после ТВО по режиму (0-6-2) ч при 60 °С (образец № 4)

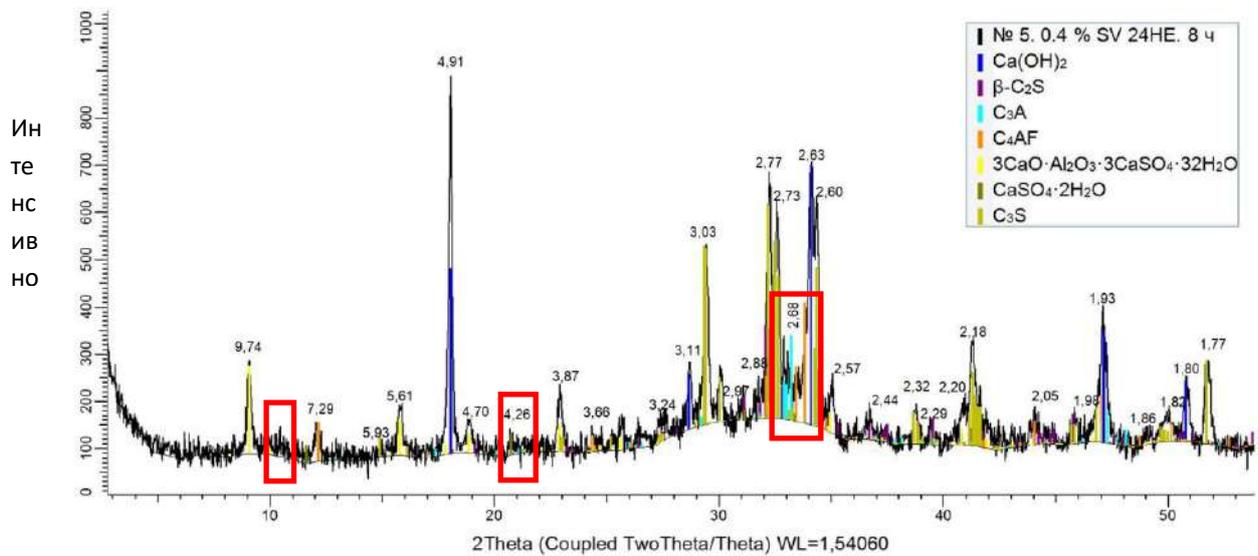


Рисунок 3.14 – Рентгенограмма образца цементного камня с Sika Viscocrete 24 HE после ТВО по режиму (0-6-2) ч при 60 °С (образец № 5)

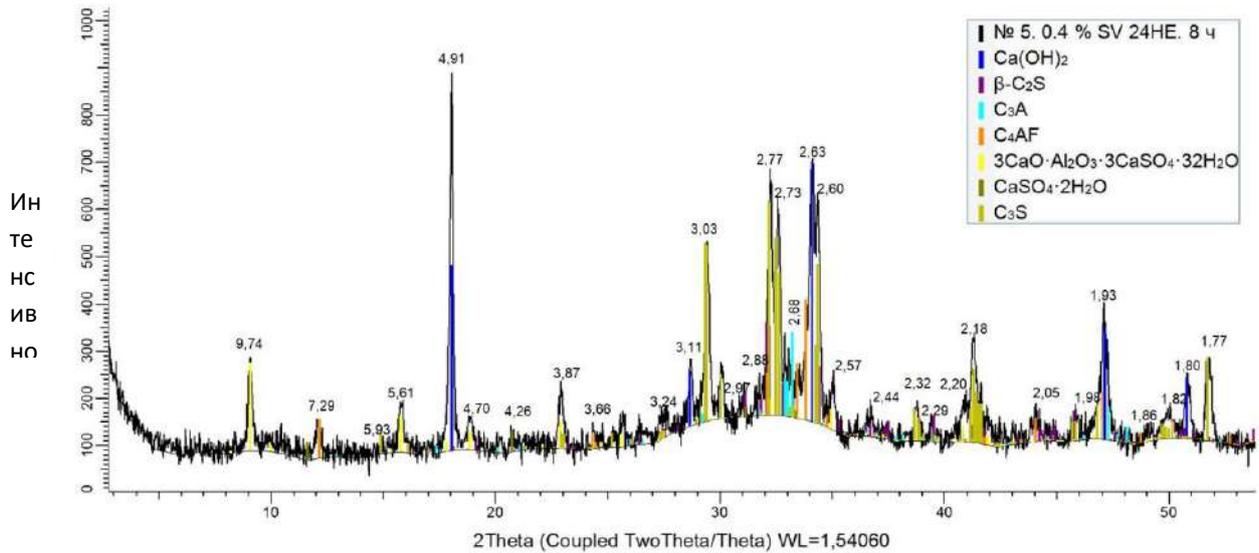


Рисунок 3.15 – Рентгенограмма образца цементного камня, модифицированного С-3, после ТВО по режиму (0-6-2) ч при 60 °С (образец № 6)

Аналогично, как и в первые 2 часа ТВО при 60 °С в образце № 5 с поликарбоксилатным суперпластификатором после режима ТВО по схеме (0-6-2) ч количество непрореагировавших клинкерных минералов алита $d = [5,93; 3,03; 2,96; 2,77; 2,74; 2,60; 2,32; 1,98; 1,77 \text{ \AA}]$, C_3A с $d = [2,68 \text{ \AA}]$, браунмиллерита с $d = [7,29; 2,65; 2,05 \text{ \AA}]$ ниже, чем в образцах без добавок и с СП на основе СНФ, что свидетельствует о некотором замедлении гидратации.

Учитывая единую методику исследований и идентичные условия съемки образцов разных составов, для сравнения концентраций основных фаз цементного камня интенсивности их дифракционных отражений были приведены к соответствующим интенсивностям рефлексов минералов. Величины относительных рефлексов показаны в таблице 3.6. За 100 % принята интенсивность пиков бездобавочных составов (образцы № 1 и № 4).

Таблица 3.6 – Относительная интенсивность рефлексов клинкерных минералов и гидратных фаз в исследуемых образцах

№ образца	Интенсивность, %						
	C_3S 3,03 Å	$\beta-C_2S$ 2,29 Å	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 4,26 Å	C_4AF 7,29 Å	C_3A 2,68 Å	$Ca(OH)_2$ 4,91 Å	Эттрин- гит 9,73 Å
За 2 часа ТВО при 60 °С							
1 (б/д)	100	100	100	100	100	100	100
2 (24HE)	106	105	140	112	109	93,0	85
3 (С-3)	97	95	82	92	93	80,1	90

За 6 часов ТВО при 60 °С + 2 часа охлаждения							
4 (б/д)	100	100	100	100	100	100	100
5 (24НЕ)	122	100	229	104	111	95	85
6 (С-3)	84	83	75	86	80	101	93

Анализ интенсивностей отдельных рефлексов показывает, что при добавке в цементную пасту ПКЭ СП на первые 2 часа пропаривания повышается количество непрореагировавших минералов: алита на 5,7 % и 8,5 %; белита – на 4,8 % и 9,5 %; гипса – на 28,6 % и 41,4 %; браунмиллерита – на 10,7 % и 17,9 %, С₃А – 8,3 % и 14,7 % в сравнении с интенсивностями рефлексов бездобавочного и модифицированного СП на основе СНФ составов соответственно. Как следствие, в составе с ПКЭ ниже интенсивность портландита (на 7,5–13,9 %) и этtringита (на 5,9–17,6 %).

С увеличением времени ТВО до 6 часов (режим 0-6-2) ч в целом наблюдается тенденция выравнивания клинкерных минералов при модифицировании ПКЭ.

Произведен рентгенофазовый анализ образцов цементного камня. Полуколичественный расчет выполнен с учетом 19-29 % аморфной фазы. Содержание минералов в образцах цементного камня показано в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты количественного расчета цементного камня

Наименование фазы	2 часа ТВО			Режим (0+6+2) ч		
	Б/д	24НЕ	С-3	Б/д	24НЕ	С-3
C ₃ S	36,3	39	40,5	24,9	25,7	25,1
β-C ₂ S	13,5	14,0	15,1	9,2	9,6	12,6
CaSO ₄ ·2H ₂ O	3,4	6,0	3,1	0,7	1,4	0,7
C ₄ AF	5,3	5,8	5,7	5,0	5,5	5,3
C ₃ A	6,1	6,9	6,5	5,7	6,7	6,4
Ca(OH) ₂	4,6	3,6	3,1	14,2	13,5	14,7
3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O	6,8	4,8	7,1	11,4	8,5	11,2

Для лучшей наглядности характера изменения продуктов новообразований построены графики, приведённые на рис. 3.16-3.19.

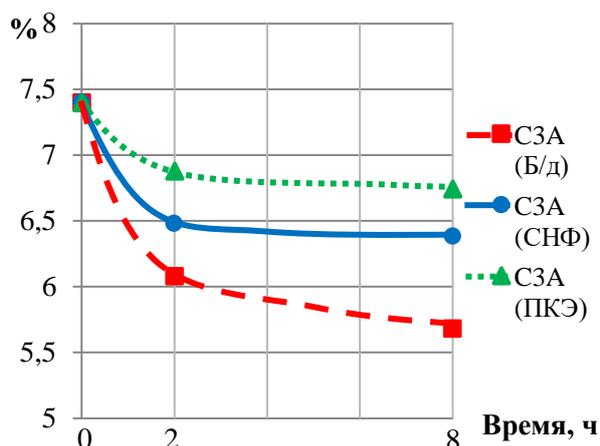


Рисунок 3.16 – Изменение содержания C_3A в цементном камне во время ТВО при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по режиму (0-6-2) ч

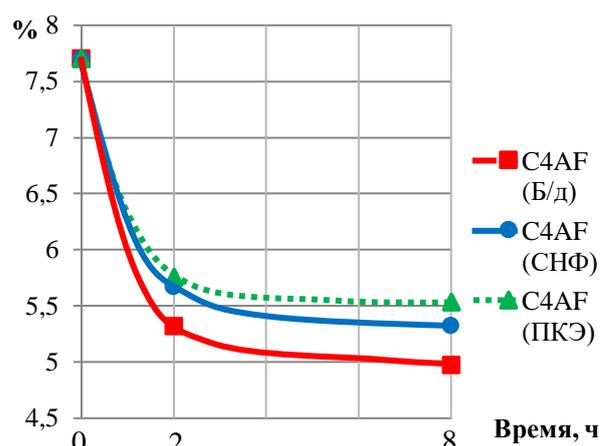


Рисунок 3.17 – Изменение содержания C_4AF в цементном камне во время ТВО при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по режиму (0-6-2) ч

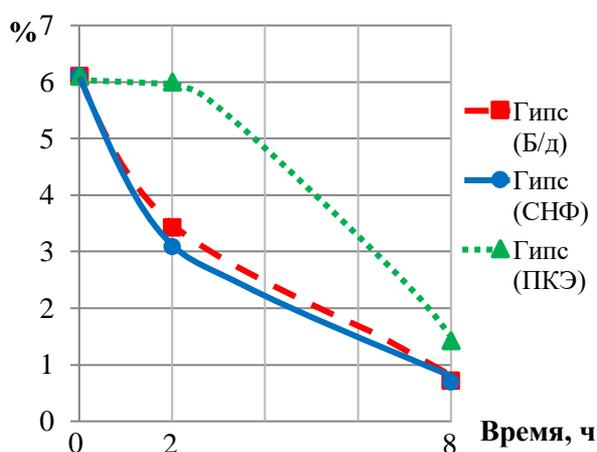


Рисунок 3.18 – Изменение содержания гипса в цементном камне во время ТВО при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по режиму (0-6-2) ч

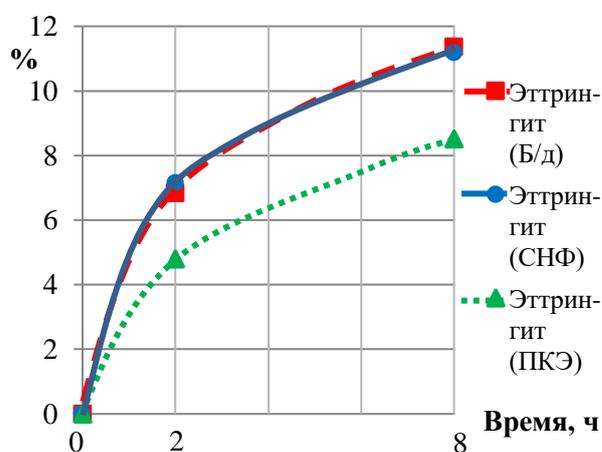


Рисунок 3.19 – Изменение содержания этtringита в цементном камне во время ТВО при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по режиму (0-6-2) ч

По результатам исследования установлено, что применение суперпластификаторов на основе ПКЭ и СНФ приводит к замедлению процессов гидратации портландцемента на первые 2 часа ТВО.

Однако замедление гидратации сильнее выражается у состава с поликарбоксилатным СП, что отражается в значительном количестве не прореагированных минералов трехкальциевого алюмината и браунмиллерита, а также алита и белита. Ситуация объясняется избирательной адсорбцией СП на основе ПКЭ на клинкерных минералах C_3A и C_4AF , а также на этtringите [92; 204]. Как следствие, содержание $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ вдвое выше в составах с ПКЭ.

Установлено заметное снижение концентрации портландита в образце с СП на основе СНФ в возрасте 2 часов и существенное увеличение содержания этtringита на ранней стадии твердения портландцемента в присутствии данной добавки, что объясняет низкую прочность состава.

С увеличением времени до 8 часов (при режиме 0-6-2) ч количество клинкерных минералов в составе с ПКЭ также ниже, чем в образце без добавок и с СП на основе СНФ, однако расхождения существенно ниже, чем при 2 ч ТВО.

3.4 Исследование структуры цементного камня при различных периодах предварительного выдерживания ТВО методом электронной микроскопии

Дальнейшее исследование структуры цементного камня выполнено с помощью поляризационно-интерференционной микроскопии с 800-кратным увеличением [204].

Проводилась съемка скола цементного камня без добавок и с ПКЭ, твердеющего при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч. Переменный фактор – период предварительного выдерживания ТВО.

На рисунке 3.20а и 3.20б показаны микрофотографии цементного камня при режиме ТВО (0-6-2) без добавок и с СП на основе ПКЭ.

На рисунке 3.21а и 3.21б иллюстрированы характерные микрофотографии цементного камня за 10 часов (при режиме ТВО (2-6-2) ч).

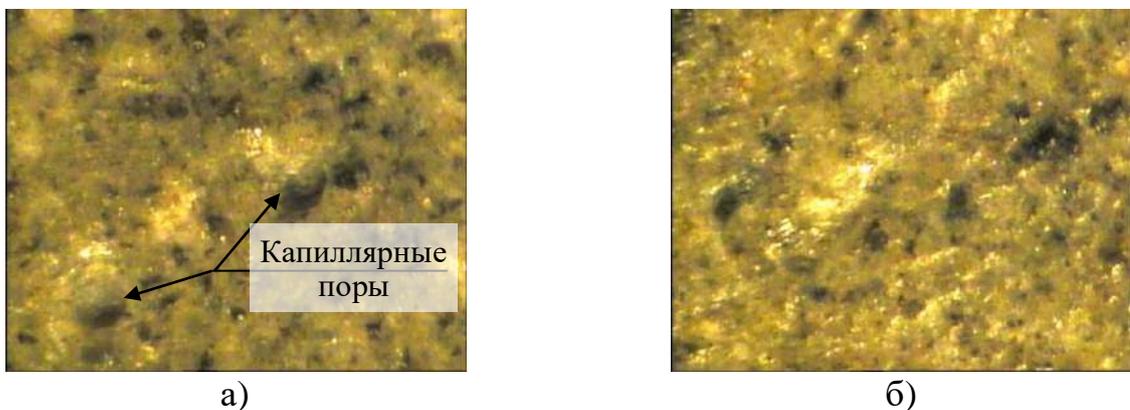


Рисунок 3.20 – Микроструктура цементного камня: а) - контрольного образца без добавок (режим 0-6-2) ч; б) - образца с ПКЭ (режим 0-6-2) ч при 800-кратном увеличении

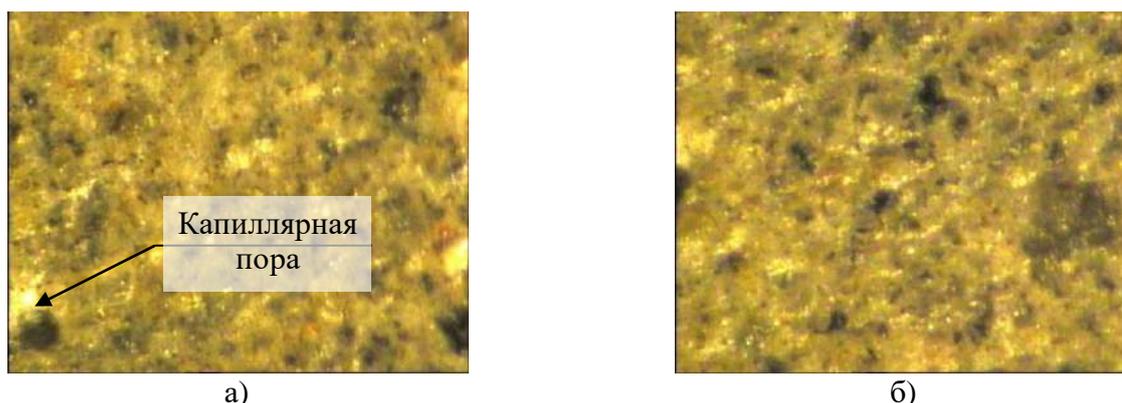


Рисунок 3.21 – Микроструктура цементного камня: а) - контрольного образца без добавок (режим 2-6-2) ч; б) - образца с ПКЭ (режим 2-6-2) ч при 800-кратном увеличении

Из представленных микрофотографий видно, что введение ПКЭ в рецептуру цементных паст способствует уплотнению структуры камня и уменьшению количества пор. Данные рисунков 3.20б и 3.21б свидетельствуют о хорошо сформировавшихся кристаллах $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Новообразования, которые формируются при добавлении ПКЭ, заполняют поры и капилляры цементного камня, что приводит к уплотнению, а также упрочнению структуры. Также очевидно, что поры, формирующиеся в цементном камне с ПКЭ, имеют существенно меньший размер и более однородны относительно поровой структуры образца без добавок [204].

Не зафиксировано значительных изменений поровой структуры цементного камня в зависимости от длительности предварительного выдерживания.

3.5 Исследование микроструктуры цементного камня методом сканирующей электронной микроскопии

Методом сканирующей электронной микроскопии при увеличении в 100х выявлено, что количество и размер пор образца с ПКЭ ниже, что согласуется с ранее проведенными исследованиями авторов этой статьи (см. рис. 3.22-3.24). Выявлено, что введение в цементные системы как добавки СНФ, так и ПКЭ приводит к уплотнению структуры, причём поры в составах с

суперпластификаторами более однородные и имеют меньший размер [198; 200; 204].

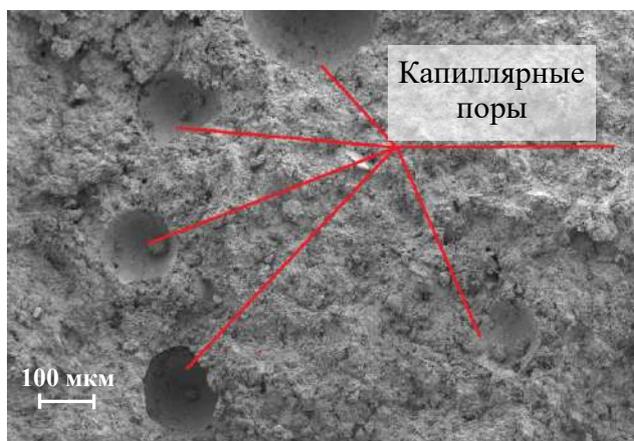


Рисунок 3.22 – СЭМ-изображение образца без добавок при 100-кратном увеличении

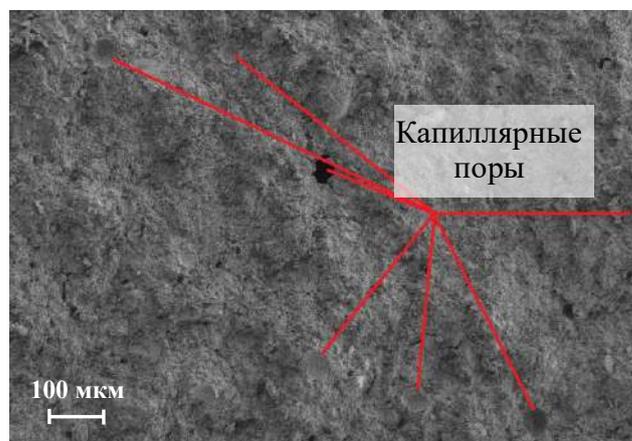


Рисунок 3.23 – СЭМ-изображение образца с СНФ при 100-кратном увеличении



Рисунок 3.24 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 100-кратном увеличении

Обнаружены термические трещины внутри пор в образце без добавок при более высоком разрешении 1000x (см. рис. 3.25).

Кроме того, исследовано кристаллообразование по краям капиллярных пор. В зоне контакта выявлено активное образование игольчатого AFt. Уплотнение и отверждение структуры на данном этапе происходит из-за того, что гидратированный сульфоалюминат кальция кристаллизуется с увеличением объема в поровых пространствах цементного камня (см. рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – СЭМ-изображение образца без добавок при 1000-кратном увеличении. Иллюстрация трещин в порах

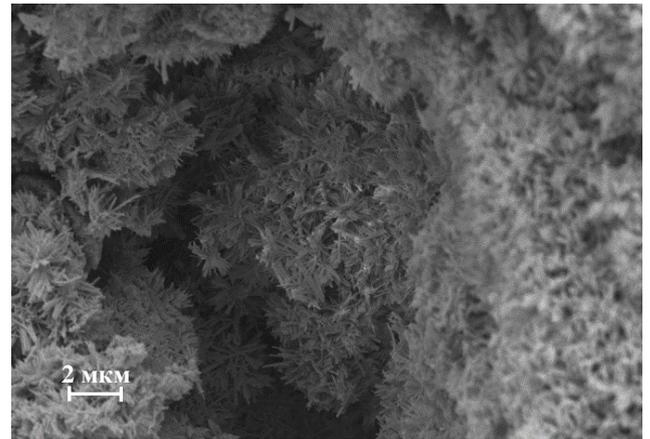


Рисунок 3.27 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 5000-кратном увеличении. Иллюстрация роста AFt в поре

Микроструктура образцов при увеличении в 1000х показана на рисунках 3.28-3.30.

Кристаллы этtringита отлагаются либо в виде отдельных кристаллов, либо в виде уплотненной и агломерированной массы, где отдельные кристаллы едва различимы.

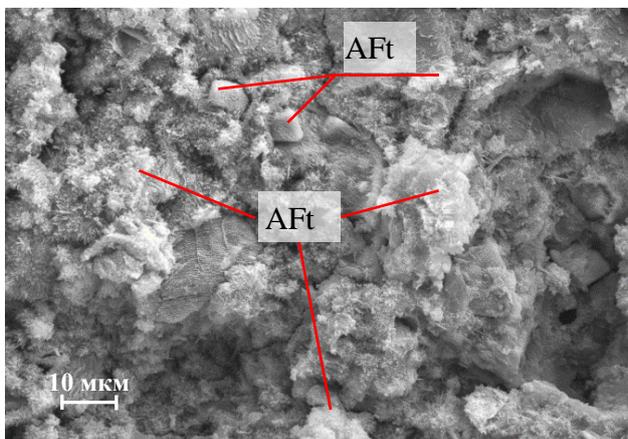


Рисунок 3.28 – СЭМ-изображение образца без добавок при 1000-кратном увеличении

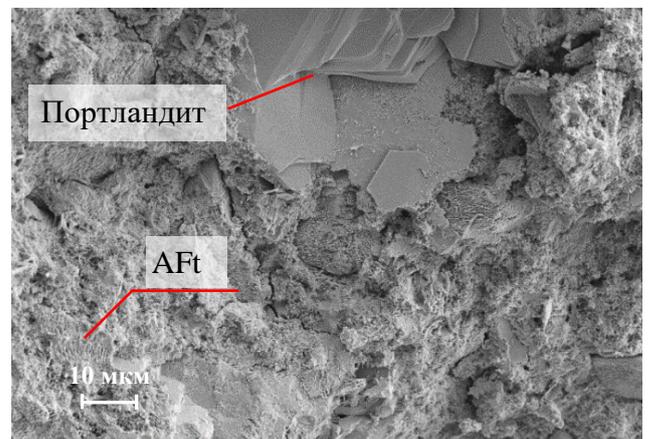


Рисунок 3.29 – СЭМ-изображение образца с СНФ при 1000-кратном увеличении

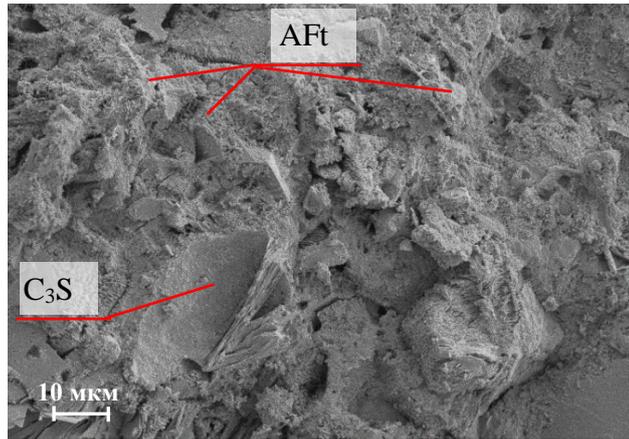


Рисунок 3.30 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 1000-кратном увеличении

Для более конкретного осмотра образовавшихся фаз выполнена съемка при разрешении 5000x на рисунках 3.31-3.33. Выявлено, что в цементном камне после ТВО по режиму (0-6-2) сформировались однородные длинные игольчатые гидросульфоалюминаты кальция, длиной до 3 мкм. В то же время в камне с СНФ реакция гидратации существенно замедлилась, длина минералов AFt от 100 до 500 нм, что объясняет его низкую прочность на этом сроке [205; 225; 250].

Замедление гидратации в системах с ПКЭ связано с высокой адсорбционной способностью суперпластификатора на частицах цемента и, в частности, его взаимодействием с этtringитом приводит к задержке его осаждения и значительному изменению морфологии. Также в составах с ПКЭ и СНФ содержится относительно большее количество негидратированных цементных частиц [207; 217; 242; 251].

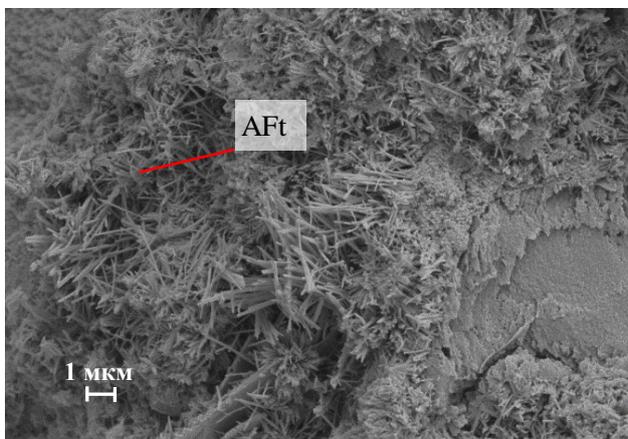


Рисунок 3.31 – СЭМ-изображение образца без добавок при 5000-кратном увеличении

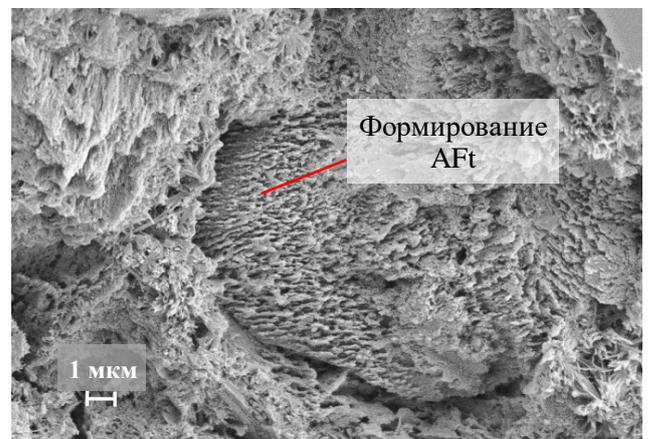


Рисунок 3.32 – СЭМ-изображение образца с СНФ при 5000-кратном увеличении



Рисунок 3.33 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 5000-кратном увеличении

Дальнейшее исследование проводилось при увеличении в 10000 раз. Микрофотографии показаны на рис. 3.34-3.36. Структура образца без добавок представлена длинными игольчатыми гидросульфоалюминатами кальция, а также скоплениями C-S-H фаз, что сходится с предыдущими исследованиями [233; 244]. Количество клинкерных минералов в составе с ПКЭ также выше, чем в образце без добавок и с СП на основе СНФ. Т.к. адсорбционная составляющая молекулы ПКЭ имеет гребенчатую форму [247], в то время как СНФ имеет плоскую жесткую стержневую форму, таким образом, СНФ может адсорбироваться на поверхности частиц гипса слой за слоем, что приводит к увеличению количества адсорбции, а значит и существенному замедлению гидратации [188]. Распределение продуктов гидратации пропаренного цементного камня более равномерное и упорядоченное [251].

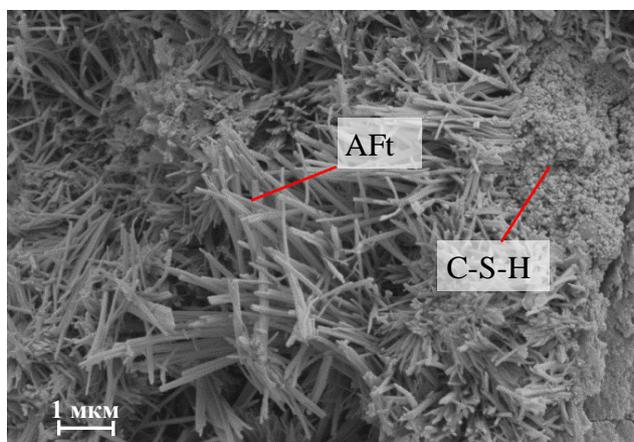


Рисунок 3.34 – СЭМ-изображение образца без добавок при 10000-кратном увеличении

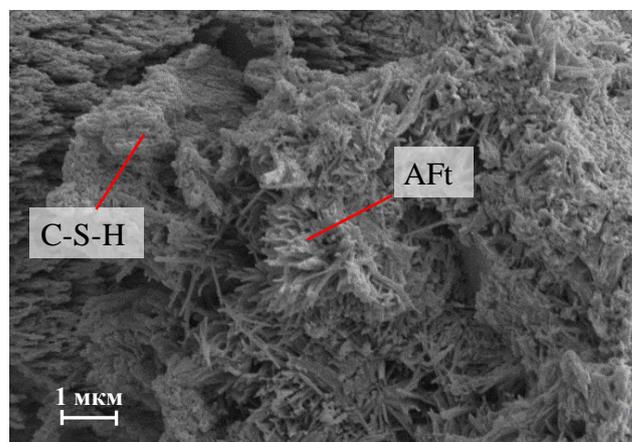


Рисунок 3.35 – СЭМ-изображение образца с СНФ при 10000-кратном увеличении

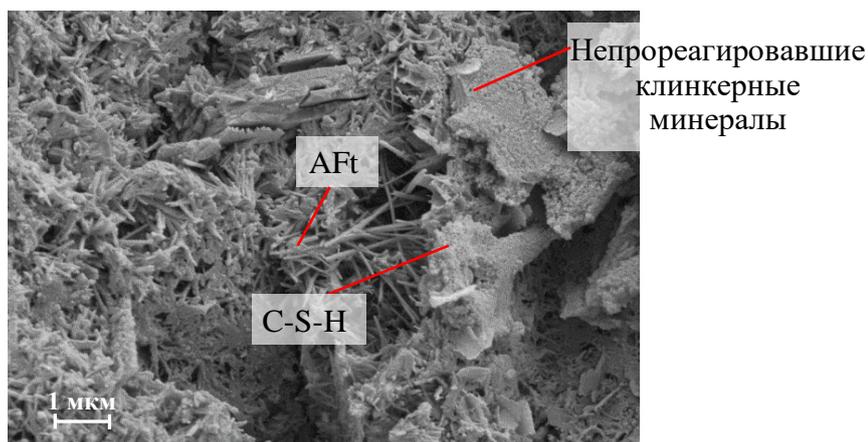


Рисунок 3.36 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 10000-кратном увеличении

Также выявлены непрореагировавшие минералы $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в образцах цементного камня, что может свидетельствовать об избирательной адсорбции ПКЭ на минералах, в частности на C_3A (см. рис. 3.37). Известно, что этtringит образуется при взаимодействии трехкальцевого алюмината с образованием трехсульфатной формы гидросульфалюмината кальция. Этtringит, образующий короткие кристаллы длиной до нескольких сотен нанометров, отчетливо проявляется относительно зерен C_3A и непрореагировавших минералов гипса [201].

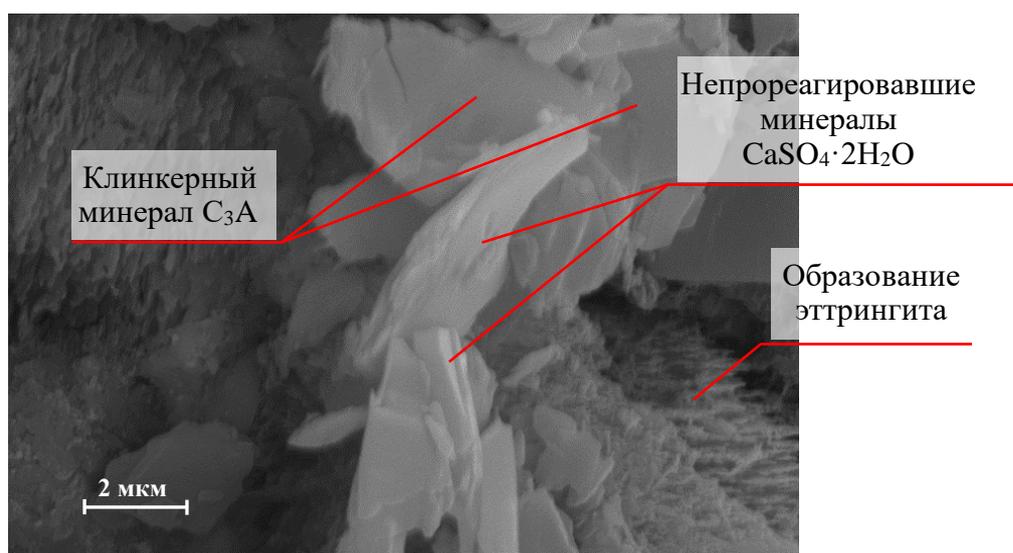


Рисунок 3.37 – СЭМ-изображение образца с ПКЭ при 7500-кратном увеличении

3.6 Рабочая гипотеза

Проведенный анализ состояния вопроса позволил определить и сформулировать рабочую гипотезу о возможности и целесообразности применения низкотемпературных режимов ТВО при использовании суперпластификаторов нового поколения и сокращении времени предварительной выдержки бетона до начала его разогрева, положенную в основу научных исследований в рамках настоящей диссертации.

Она заключается в следующем:

Анализом литературных источников, приведённым в главе 1, и результатами исследований, изложенными в главе 3, установлено, что суперпластификаторы на основе ПКЭ и СНФ, значительно пластифицируя бетонную смесь, в то же время существенно замедляют процессы гидратации портландцемента в первые 2 часа ТВО. Кроме того, ПКЭ адсорбируются избирательно на клинкерных минералах C_3A и C_4AF , а также на этtringите [92; 204]. В связи с этим, на начальном этапе гидратации цемента суперпластификаторы блокируют его зёрна по принципу работы гипса, что приводит к значительному количеству непрореагированных минералов трехкальциевого алюмината и браунмиллерита, а также алита и белита. При этом, как следствие, в этот период содержание несвязанных минералов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ вдвое выше, чем в составах без суперпластификаторов. В дальнейшем, под действием возрастающего осмотического давления происходит разрушение образовавшихся оболочек и интенсивная гидратация цемента.

Таким образом, в этот период времени степень гидратации цемента очень мала и предварительная выдержка перед подъёмом температуры теряет свой смысл.

Прогрев смеси после непродолжительной выдержки или без неё приведёт к интенсивной гидратации цементных минералов, в связи с чем, в одни и те же сроки ТВО прочность цементного камня, твердевшего без предварительной

выдержки, будет опережать прочность составов, подвергнутых предварительному выдерживанию. Таким образом, возможно сократить время ТВО и энергозатраты на неё или использовать низкотемпературные режимы ТВО, а также получать более высокую раннюю прочность. При последующем твердении эта тенденция сохраняется, но постепенно, к длительным срокам твердения прочность составов выравнивается.

3.7 Выводы по главе 3

1. Предложена рабочая гипотеза о возможности и целесообразности применения низкотемпературных режимов ТВО при использовании суперпластификаторов нового поколения и сокращении времени предварительной выдержки бетона до начала его разогрева.

2. Увеличение сроков схватывания цементных паст, модифицированных современными СП на основе ПКЭ, показывает возможность регулирования режимов ТВО, в частности длительности предварительного выдерживания. Установлено, что наиболее эффективно применение низких дозировок поликарбоксилатных СП при использовании ТВО, причем температурный фактор играет бóльшую роль при схватывании, чем дозировка СП, чего не наблюдается у анионоактивных СП.

3. Выявлено увеличение прочности при сжатии после ТВО и на 28 сутки на 7,4-12,3%, повышение плотности на 6,6-7,7 % и снижение открытой капиллярной пористости на 24-37 % пластифицированных образцов цементного камня в сравнении с бездобавочными составами.

4. Установлено незначительное снижение прочности модифицированного ПКЭ цементного камня после ТВО без предварительного выдерживания: за 8 часов твердения при режиме (0-6-2) ч прочность при сжатии отстает на 9,0-13,0 % в сравнении с прочностью цементного камня, твердевшего в течение 10 часов при режиме (2-6-2) ч. Прочностные показатели камня, твердеющего при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч на 28-е сутки практически равны, расхождение составляет 1,5-1,9 %, что свидетельствует о возможности снижения времени предварительного выдерживания и возможности сокращения времени ТВО.

5. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что применение СП на основе ПКЭ приводит к замедлению процессов гидратации портландцемента в первые 2 часа ТВО, что подтверждается высокой интенсивностью рефлексов клинкерных минералов. Вследствие избирательной

адсорбции СП ПКЭ на C_3A и C_4AF наблюдается пониженное количество этtringита, и как следствие, релаксация температурных напряжений в теле твердеющего цементного камня, чего не наблюдается при модифицировании паст СП на основе СНФ.

6. На рентгенограммах цементного камня с СП на основе ПКЭ выявлен несвязанный минерал $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ вдвое больше, чем в составе с СП на основе СНФ и без добавок, что позволяет сделать вывод о блокировке трехкальциевого алюмината и образовании рыхлой алюминатной структуры при модифицировании цементных систем анионоактивными СП.

7. Методом сканирующей электронной микроскопии в цементном камне с добавкой ПКЭ выявлены зоны непрореагировавших минералов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ после ТВО по режиму (0-6-2) ч. В контактной зоне с трехкальциевым алюминатом зафиксировано постепенное образование этtringита.

8. Не зафиксировано существенных отличий в минералогическом составе образцов модифицированного СП на основе ПКЭ цементного камня непосредственно после ТВО, твердеющих при ТВО с предварительным выдерживанием и без вышеназванного периода. Исследование минералогического состава цементного камня в возрасте 28 суток показало тенденцию выравнивания содержания формирующихся новообразований в составах с ПКЭ вне зависимости от времени предварительного выдерживания.

9. Микрофотографии скола цементного камня, полученные методом оптической и электронном микроскопии свидетельствуют об уплотнении структуры камня и уменьшении количества пор при введении в цементные системы СП на основе ПКЭ, причем поры в составах с ПКЭ более однородны. Структура цементных паст на 8 часов твердения (по схеме (0-6-2) ч и на 10 часов твердения (по схеме (2-6-2) ч) мало отличается друг от друга, что допускает возможность регулирования режима ТВО для цементосодержащих систем с точки зрения ускорения темпов набора прочности и увеличения оборачиваемости опалубки.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТВО

В данной главе представлены исследования прочностных показателей после ТВО, а также на 7-ые и 28-ые сутки цементно-песчаных растворов. Были приготовлены равноподвижные растворные смеси. Соотношение цемента к песку составляло 1:2. Водоцементное отношение подбиралось исходя из условия равноподвижности растворных смесей, контролируемой по диаметру расплыва конуса Хаггермана (108-115 мм).

4.1 Прочностные свойства цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификаторами различного типа

На первом этапе проанализировано влияние суперпластификаторов различного типа на прочность цементно-песчаных растворов. Водоцементное отношение растворных смесей снижалось благодаря водоредуцирующему действию суперпластификаторов. Количество модификатора было принято равным для всех образцов и составляло 1,2 % от массы цемента. План эксперимента показан в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения водоцементного отношения цементных паст в зависимости от содержания суперпластификаторов

№	Название суперпластификатора	Основа суперпластификатора	Водоцементное отношение
1	-	-	0,40
2	Sika Vicsocrete 24 HE	Поликарбоксилатные эфиры	0,35
3	MasterPozzolith MR 55	Лигносulfонаты	0,375
4	SikaPlast-520 N	Лигносulfонаты	0,365
5	С-3	Сульфированные нафталинформальдегидные смолы	0,388
6	MasterPolyheed 3553	Эфиры полиарила	0,355
7	Лаурилсульфат натрия	Лаурилсульфат натрия	0,36

Анализ водопотребности показал, что наибольшей водоредуцирующей способностью при равных дозировках обладает поликарбоксилатный суперпластификатор Sika Viscocrete 24 HE, снижение водоцементного отношения в сравнении с бездобавочным составом на 12,5 %. Суперпластификаторы на основе технических лигносульфонатов MasterPozzolith MR 55 и SikaPlast-520 N позволили снизить В/Ц на 6,25 % и 8,75 % соответственно. Добавка на основе эфиров полиарила MasterPolyheed 3553 – сильно водоредуцирующая, при ее применении наблюдается снижение водоцементного отношения на 11,3 %, в то время как применение ПАВ на основе лаурилсульфата натрия снижает В/Ц на 10 %. Наименьшей водоредуцирующей способностью обладает добавка на основе сульфированных нафталинформальдегидных смол С-3, значение снижения В/Ц при данной дозировке равно 3 % [95; 104; 107; 155].

На рисунке 4.1 иллюстрировано семейство кривых набора прочности цементно-песчаных растворов, твердеющих при ТВО по схеме (0-6-2) ч, т.е. без предварительного выдерживания, в течение 6 ч изотермического прогрева при температуре 60 °С, и остывание в течение 2 ч.

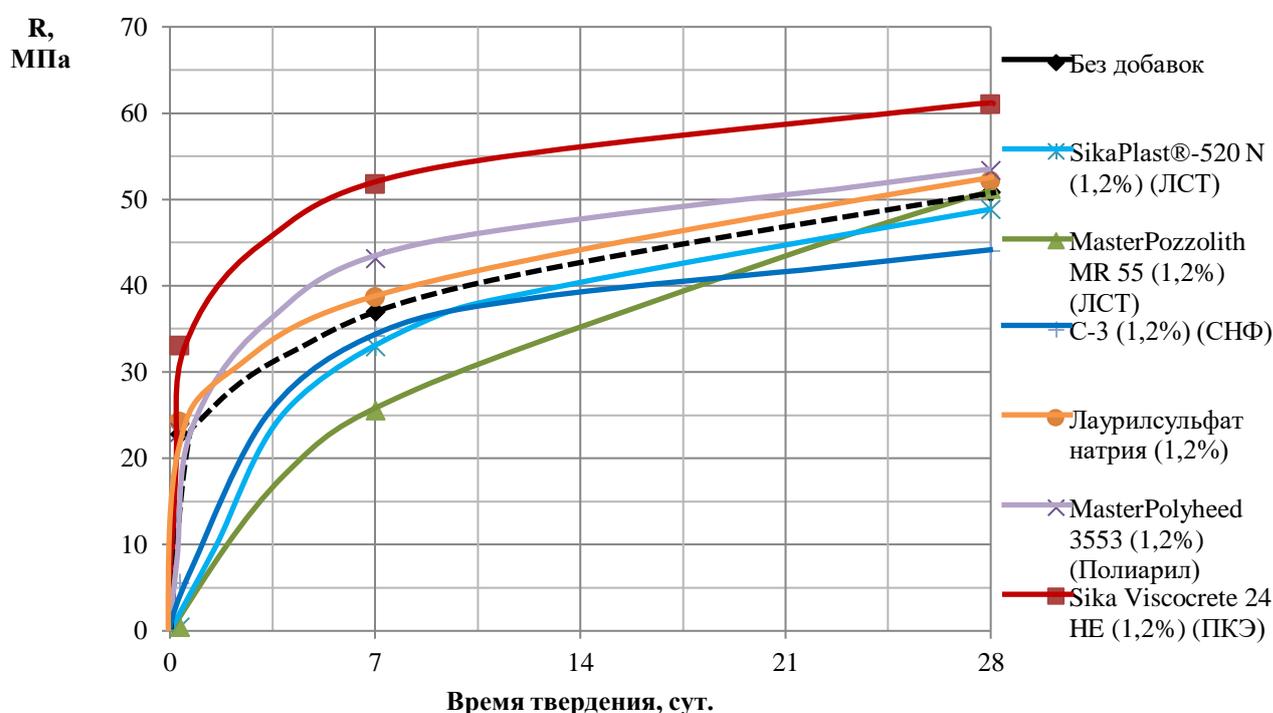


Рисунок 4.1 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных с суперпластификаторами различного типа при режиме ТВО (0-6-2) ч

Наблюдается увеличение прочности образцов с содержанием добавки типа ПКЭ Sika Vicsocrete 24 HE в сравнении с образцом без модификаторов после ТВО (за 8 часов) на 45 %, на 40 % – в возрасте 7 суток, и на 20 % – в возрасте 28 суток.

Наименьшая прочность после ТВО по заданному режиму у растворов, модифицированных суперпластификаторами на основе лигносульфонатов и сульфированных нафталинформальдегидных смол. В количественном отношении прочность не более 5 МПа у состава с С-3, а прочность растворов с лигносульфонатами (MasterPozzolith MR 55 и SikaPlast®-520 N) не более 0,5 МПа, что свидетельствует о неэффективности использования этих добавок при ТВО по заданному режиму. Прочность после ТВО цементно-песчаных растворов с добавкой на основе эфиров полиарила практически не отличается от прочности бездобавочного состава (больше на 1 %), а с ПАВ на основе лаурисульфата натрия более на 6 % [95].

Показатели прочности при сжатии на 7-ые сутки формируются следующим образом: при введении в состав добавки на основе ПКЭ Sika Vicsocrete 24 HE – выше на 40 %, добавки MasterPolyheed 3553 – выше на 16,5 %, ПАВ на основе лаурисульфата натрия – выше на 4,5 % в сравнении с раствором без добавок. Модифицирование смесей добавками на основе лигносульфонатов и сульфированных нафталинформальдегидов приводит к некоторому снижению прочности, причем наименее низкие показатели прочности на 7-е сутки у составов с ЛСТ, введение которых в состав растворов снижает прочность на 11-31 % в сравнении с бездобавочным образцом [155].

Анализ полученных данных по прочности пропаренных составов с суперпластификаторами на 28-ые сутки показывает тенденцию некоторого выравнивания прочности растворов, модифицированных добавками на основе технических лигносульфонатов, сульфированных нафталинформальдегидов и эфиров полиарилов, расхождение в сравнении с прочностью бездобавочного состава от -11 % до +4,5 %. Наибольший показатель прочности на 28-ые сутки, как и после ТВО и на 7-ые сутки у раствора с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора, прочность при сжатии составляет 61 МПа, что на 20 %

выше, чем у бездобавочного состава, что свидетельствует о высокой эффективности использования данной добавки при низкотемпературном режиме ТВО, в том числе без предварительного выдерживания и относительно низкой температуры изотермического прогрева (60 °С).

4.2 Прочностные свойства цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификаторами на основе ПКЭ и СНФ при режиме ТВО с предварительным выдерживанием и без него

На дальнейшем этапе исследованы показатели прочности цементно-песчаного раствора, модифицированного двумя типами суперпластификаторов:

- на основе эфиров поликарбоксилатов (Sika Vicsocrete 24 HE);
- на основе сульфированных нафталинформальдегидных смол (С-3).

Показатели водоцементного отношения модифицированных растворов показаны в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Значения водоцементного отношения цементных паст в зависимости от содержания суперпластификаторов

№	Дозировка суперпластификатора	В/Ц при модифицировании	
		Sika Vicsocrete 24 HE	С-3
1	-	0,4	0,4
2	0,4 %	0,374	0,395
3	1,2 %	0,35	0,388
4	2,0 %	0,325	0,38

Растворные смеси твердели при режиме ТВО с 6-часовым изотермическим прогревом. Время предварительного выдерживания варьировалось от 0 до 2 часов.

Графическое изображение набора прочности цементно-песчаных растворов при твердении по режиму (2-6-2) ч показано на рисунке 4.2.

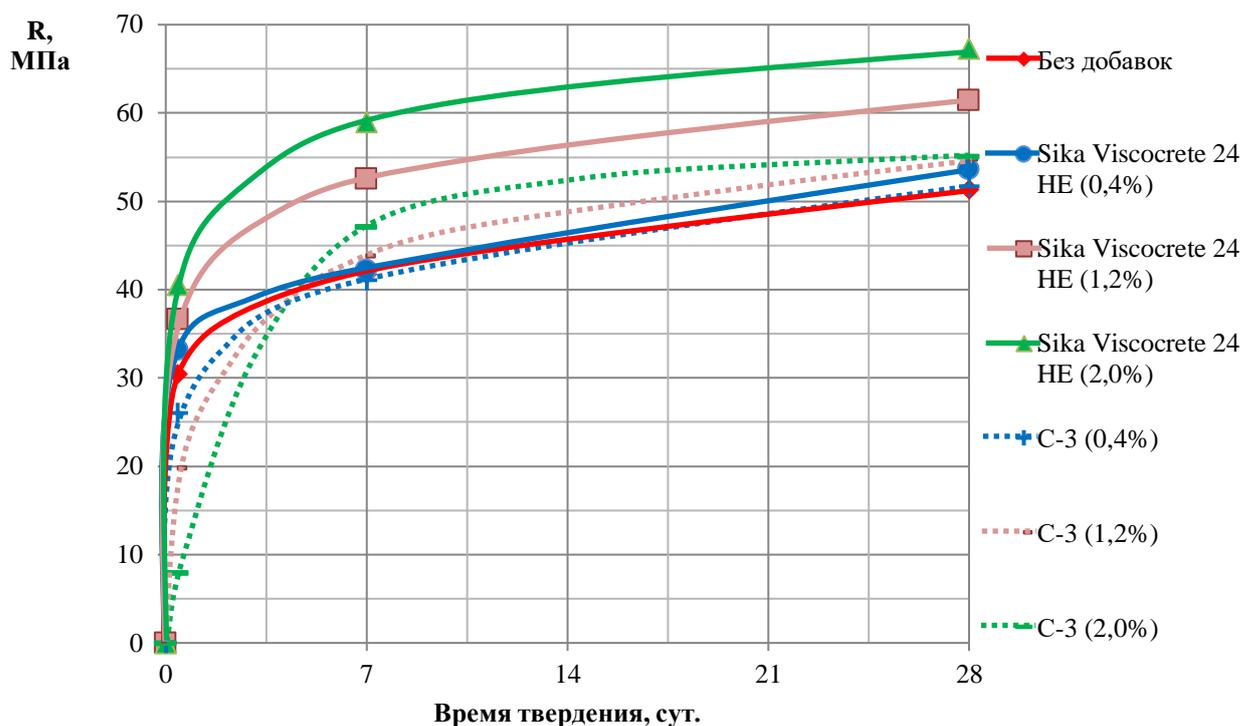


Рисунок 4.2 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных ПКЭ (Sika Viscocrete 24 HE) и СНФ (C-3) при режиме ТВО (2-6-2) ч

Анализ полученных данных показывает, что модифицирование цементно-песчаных растворов добавкой поликарбоксилатного типа положительно влияет как на прочность при сжатии после ТВО, так и на проектную [1; 2; 58; 100; 158]. Прочность на 10 часов твердения выше прочности бездобавочного состава на 9 %, 20,4 %, 33 % при модифицировании суперпластификатором на основе ПКЭ при дозировке 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % соответственно относительно состава без добавок.

Противоположная картина наблюдается при модифицировании растворов добавкой на основе СНФ, причем чем выше дозировка, тем ниже прочность после ТВО. Таким образом прочность после ТВО снизилась на 14,5 %, 34,9 % и 73,8 % при введении добавки C-3 в количестве 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % соответственно при сравнении с раствором без добавок.

Прочность на 7-ые сутки пропаренных растворов с добавкой на основе ПКЭ по режиму (2-6-2) ч выше до 43 %, на основе СНФ – до 13 % относительно

бездобавочного состава, что связано с водоредуцирующей способностью суперпластификаторов и ростом силикатной структуры цементного камня.

Проектная прочность растворов с Sika Viscocrete 24HE выше на 4,4 % - 31 %, с С-3 на 0,7 % - 7 % в сравнении с составом без добавок. Данный феномен отчасти объясняется тем, что образование силикатной структуры цементного камня с повышенным ранней этtringитной составляющей приводит к некоторой потере прочности на поздних сроках, т.к. остаточный объем карбонизированного этtringита по сравнению с первоначальным объемом АFt-фазы составляет 56 %, и соответственно объем возникших пор достигает 44 % [145].

Для оценки влияния времени предварительного выдерживания проведен аналогичный эксперимент при такой же длительности пропаривания (6 часов при температуре 60 °С) и времени остывания (2 часа), но без первоначальной выдержки при нормальных условиях. Полученные графики набора прочности цементно-песчаных растворов с добавками на основе ПКЭ и СНФ показаны на рис. 4.3.

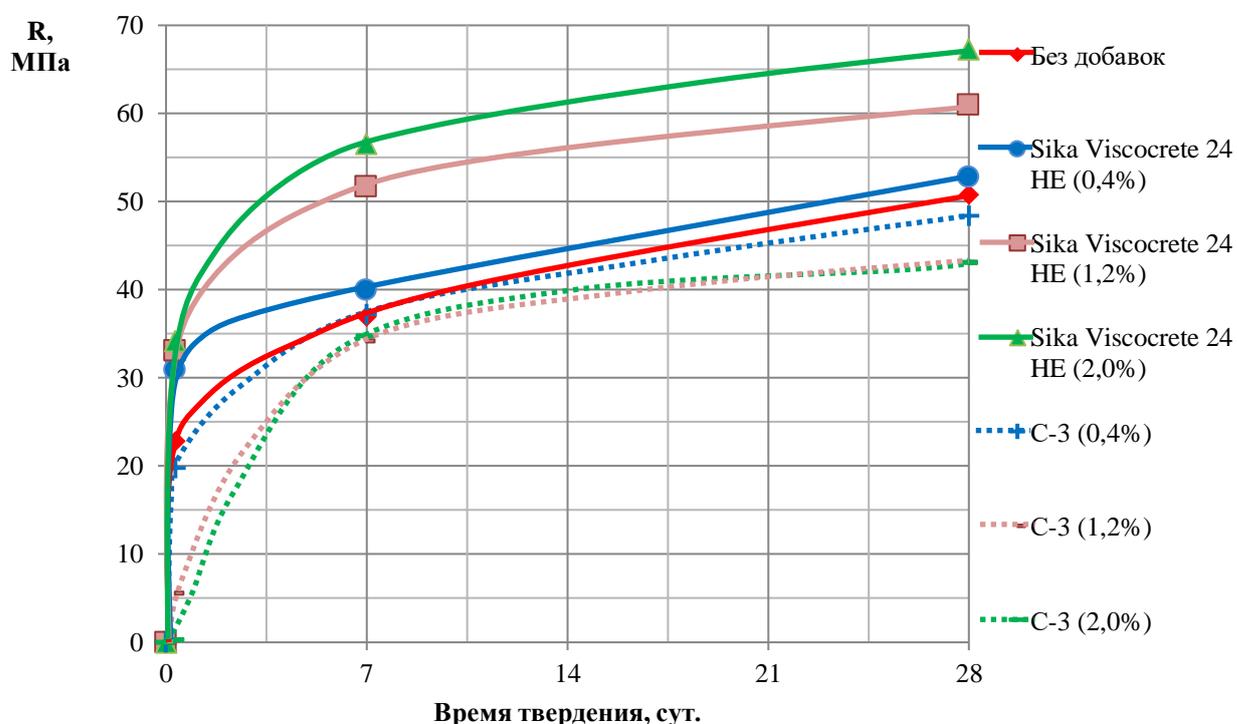


Рисунок 4.3 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных ПКЭ (Sika Viscocrete 24 HE) и СНФ (С-3) при режиме ТВО (0-6-2) ч

Анализ результатов по прочности для составов, модифицированных поликарбоксилатным суперпластификатором в целом не отличается от данных по прочности при режиме с 2-х часовым предварительным выдерживанием.

Сравнение значений прочности из рис. 4.2 и рис. 4.3 показывает незначительное снижение прочности после ТВО для составов с Sika Viscocrete 24 HE: на 7,0 %, 9,6 % и 15,7 при модифицировании с 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % соответственно, что объясняется разностью времени твердения (8 часов при режиме (0-6-2) ч и 10 часов при режиме (2-6-2) ч.

Однако, модифицирование цементно-песчаных композитов добавкой на основе СНФ (С-3) привело к существенному снижению прочности при отказе от предварительной выдержки в сравнении с составом без добавок. Прочность после ТВО снизилась на 24 %, 72 % и 96 % при добавлении 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % добавки С-3 от массы цемента соответственно. Данный факт сопоставляется с исследованием в главе 3, объясняется формированием преимущественно рыхлой алюминатной структурой при модифицировании данной добавкой [204].

Дальнейший рост прочности до 7-ми суток показал следующие результаты: прочность при модифицировании добавкой ПКЭ ниже на 1,6-5,2 %; при введении СНФ ниже на 9,2-26,3 %, что также свидетельствует о возможности снижения и даже отказа от периода предварительного выдерживания ТВО при добавлении в цементные системы ПКЭ.

При сравнении данных по проектной прочности составов с предварительной выдержкой перед ТВО и без нее, получены следующие данные: отклонение прочности на 28-е сутки при введении добавки поликарбоксилатного типа составляет не более 1,5 %, в то время как при модифицировании СНФ отклонение достигает 22 %, что позволяет сделать вывод о неэффективности последней для режимов ТВО с укороченным периодом предварительного выдерживания [203].

Для наглядности ниже показаны разница между прочностными кривыми модифицированных составов с предварительным выдерживанием перед ТВО и без данного периода (см. рис. 4.4-4.6).

Различие между показателями прочности после ТВО с отказом от предварительного выдерживания составило 7,4 % и 31,3 % при модифицировании растворов добавками поликарбоксилатного типа и СНФ соответственно при дозировке 0,4 % от массы вяжущего. С ростом дозировки добавки Sika Viscocrete 24 HE до 1,2 % отставание по прочности после проведения ТВО состава без предварительной выдержки равно 10,6 %, в то время как для добавки СНФ типа (С-3) прочность отстает в 3,6 раза. При наибольшей дозировке СП (2,0 %) разница по прочности раствора после ТВО с добавкой ПКЭ в пределах 18,5 % с отказом от предварительного выдерживания, а с СНФ – в 25 раз, что свидетельствует о нецелесообразности применения высоких дозировок последней при пропарке.

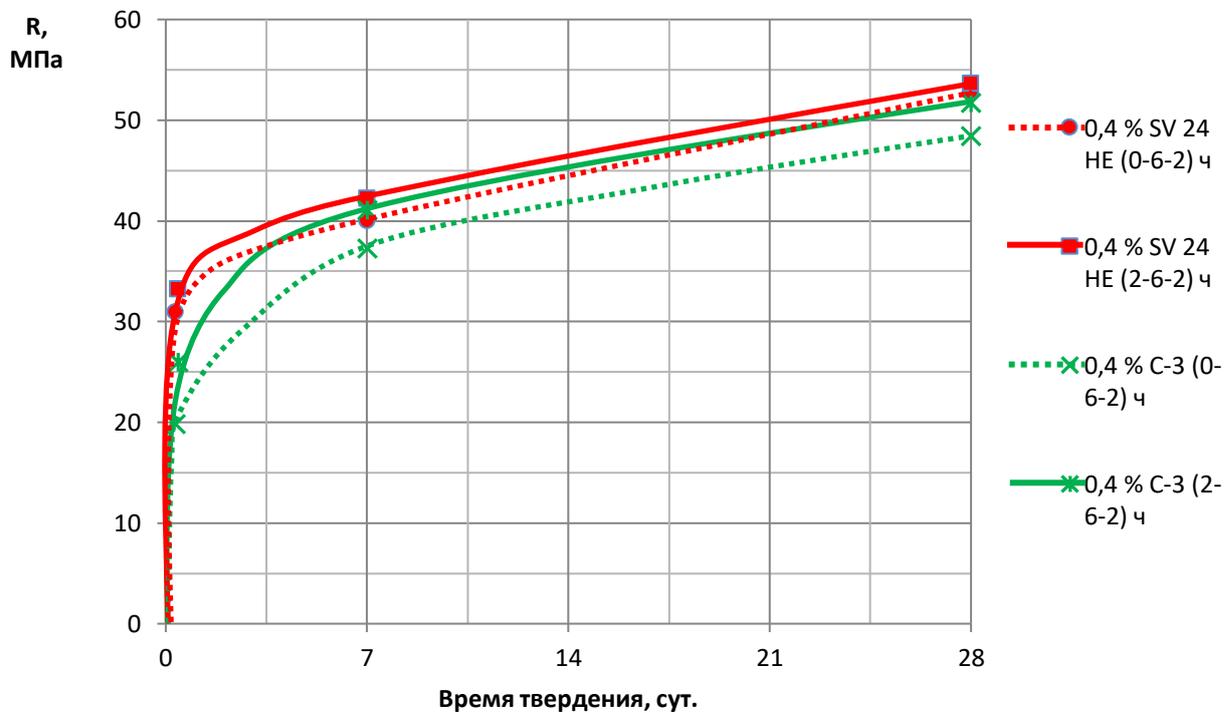


Рисунок 4.4 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных 0,4 % Sika Viscocrete 24 HE и С-3 при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч

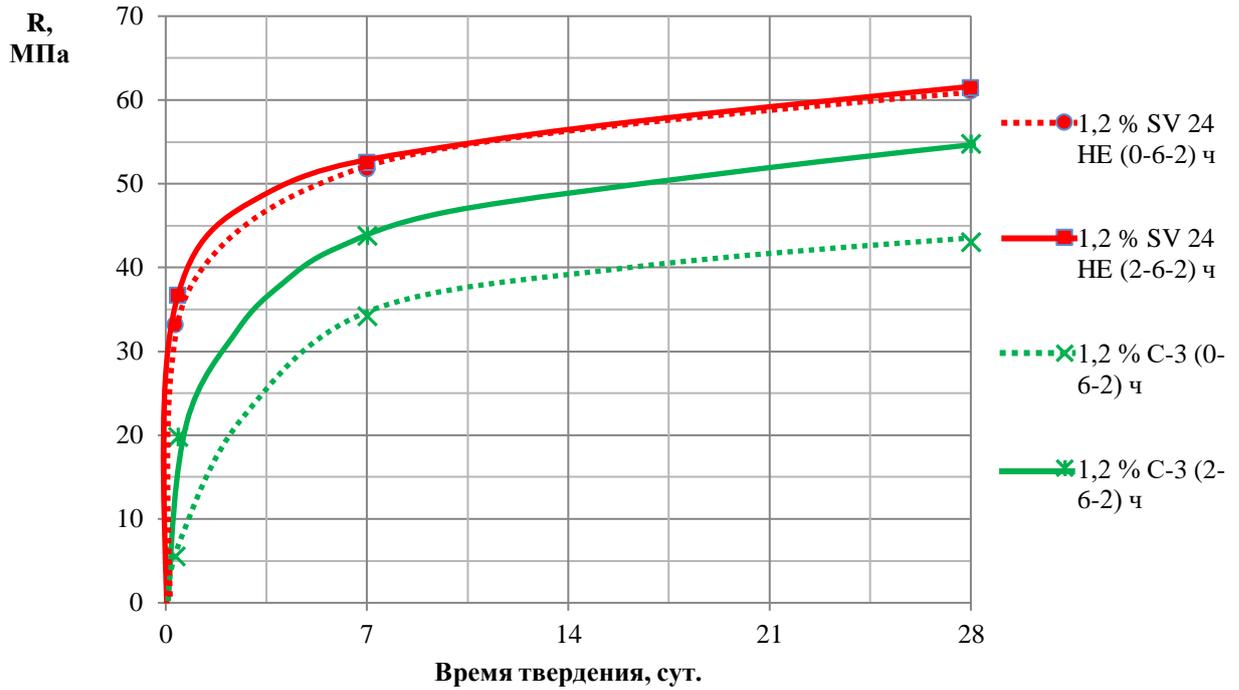


Рисунок 4.5 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных 1,2 % Sika Viscocrete 24 HE и C-3 при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч

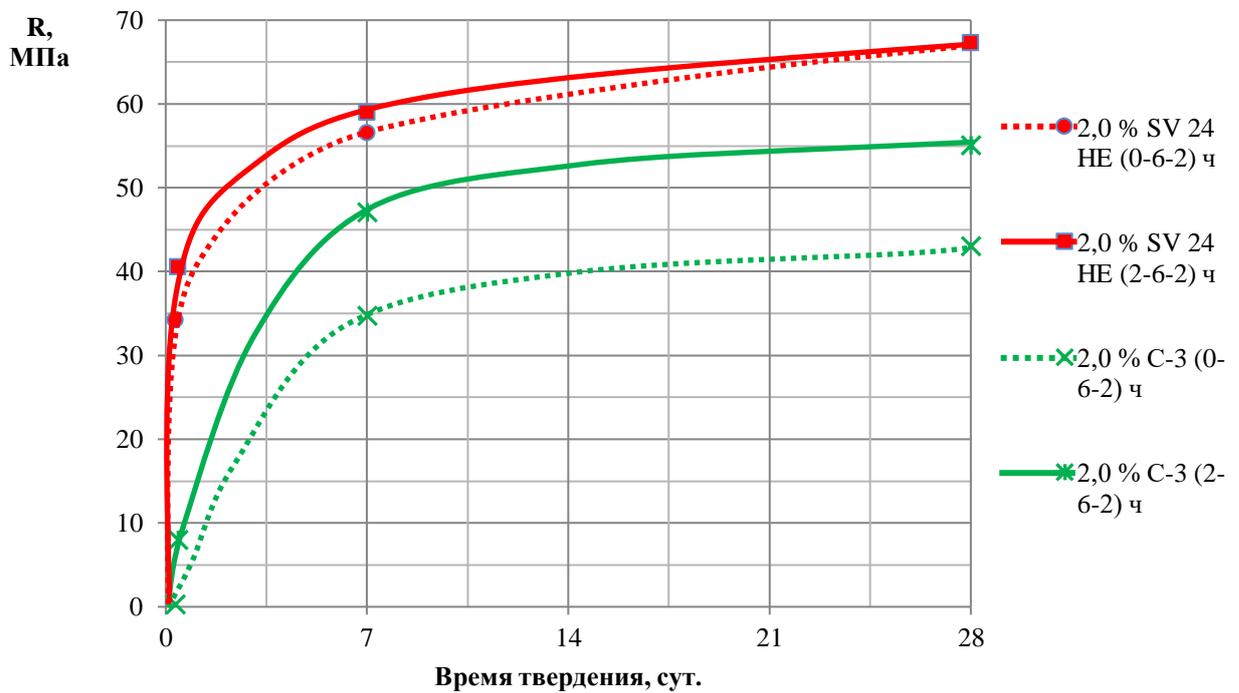


Рисунок 4.6 – Кинетика набора прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных 2,0 % Sika Viscocrete 24 HE и C-3 при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч

Как показывают сравнительные данные, при модифицировании цементных систем добавкой типа ПКЭ дивергенция показателей прочности между составами с предварительной выдержкой и без нее прочность на 7 сутки составляет 5,5 %, 1,6 %, 4,3 % при дозировках 0,4 %, 1,2 %, 2,0 % соответственно, а на 28 сутки различие в пределах статистической погрешности (до 1,5 %). Данные указывает на то, что отказ от первоначального традиционного этапа ТВО, а именно предварительного выдерживания целесообразно при модифицировании цементных композитов суперпластификатором на основе поликарбоксилатов.

Уменьшение прочности на 7 сутки цементно-песчаных растворов с добавкой на основе СНФ при отказе от предварительного выдерживания варьируется с 10,2 % до 35,6 %, а на 28 сутки с 6, 8 % до 28,0 %, причем различие возрастает с ростом дозировки суперпластификатора.

Результаты относительных показателей прочности сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Относительное различие прочности цементно-песчаных растворов при ТВО с предварительным выдерживанием и без нее

Добавка (тип)	Дозировка СП, % от массы Ц	Уменьшение прочности при отказе от 2 ч предварительного выдерживания перед ТВО с 6-часовым пропариванием при 60 °С и 2 часов остывания, в %		
		После ТВО	На 7 сутки	На 28 суток
С-3 (СНФ)	0,4	31,3	10,2	6,8
SV 24 HE (ПКЭ)		7,4	5,5	1,5
С-3 (СНФ)	1,2	256,8	28,1	27,1
SV 24 HE (ПКЭ)		10,6	1,6	0,7
С-3 (СНФ)	2,0	2648,3	35,6	28,0
SV 24 HE (ПКЭ)		18,6	4,3	0,0

Для анализа преобразования кривых в осях «дозировка суперпластификатора/прочность на сжатие» построены дополнительные графики (см. рис. 4.7-4.8).

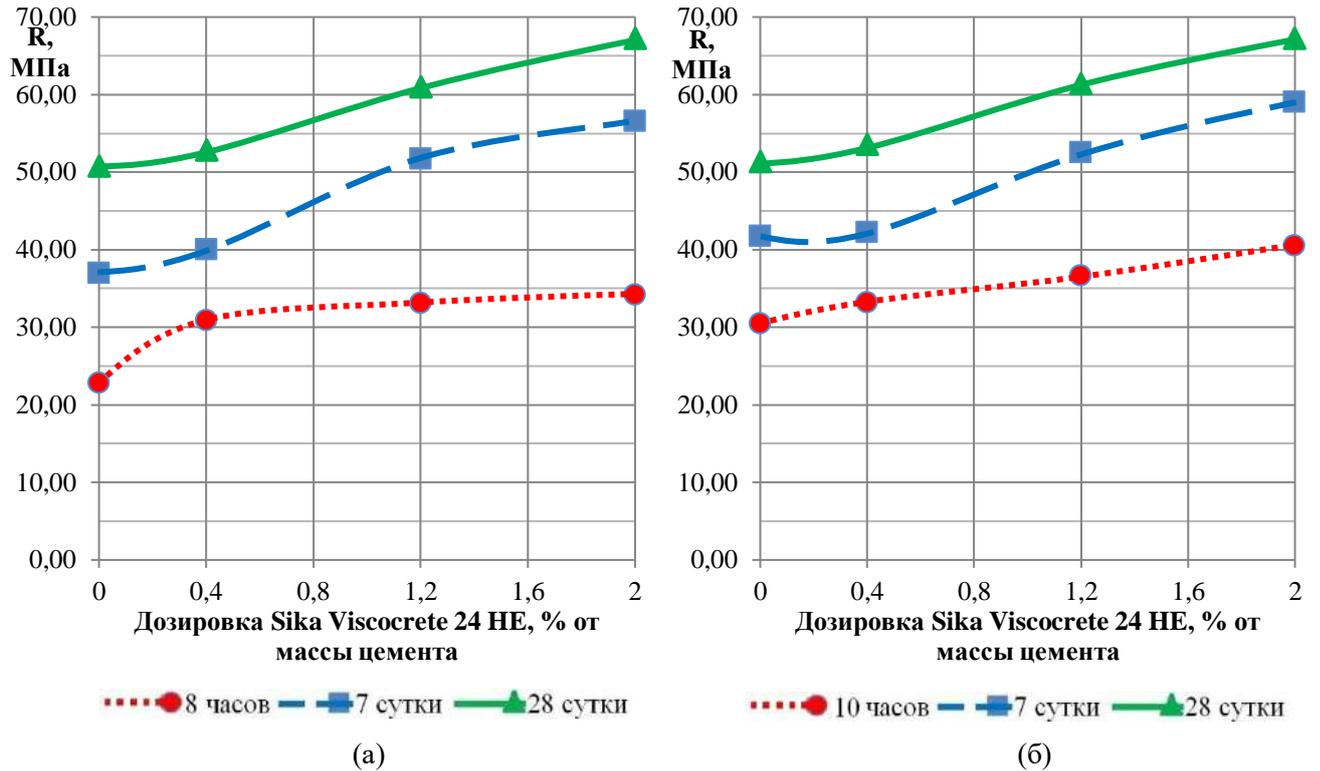


Рисунок 4.7 – Зависимость прочности цементно-песчаных растворов от дозировки добавки ПКЭ типа (Sika Viscocrete 24 HE) при режимах ТВО по схемам: (а) (0-6-2) ч; (б) (2-6-2) ч

Анализ рис. 4.7 показывает, что характер изменения прочности как после ТВО (за 8-10 часов), так и на поздних сроках (7-28 суток) незначительный, что даёт основание судить о возможности регулирования периода предварительного выдерживания перед ТВО в сторону уменьшения вплоть до нуля при модифицировании цементных систем поликарбоксилатными суперпластификаторами.

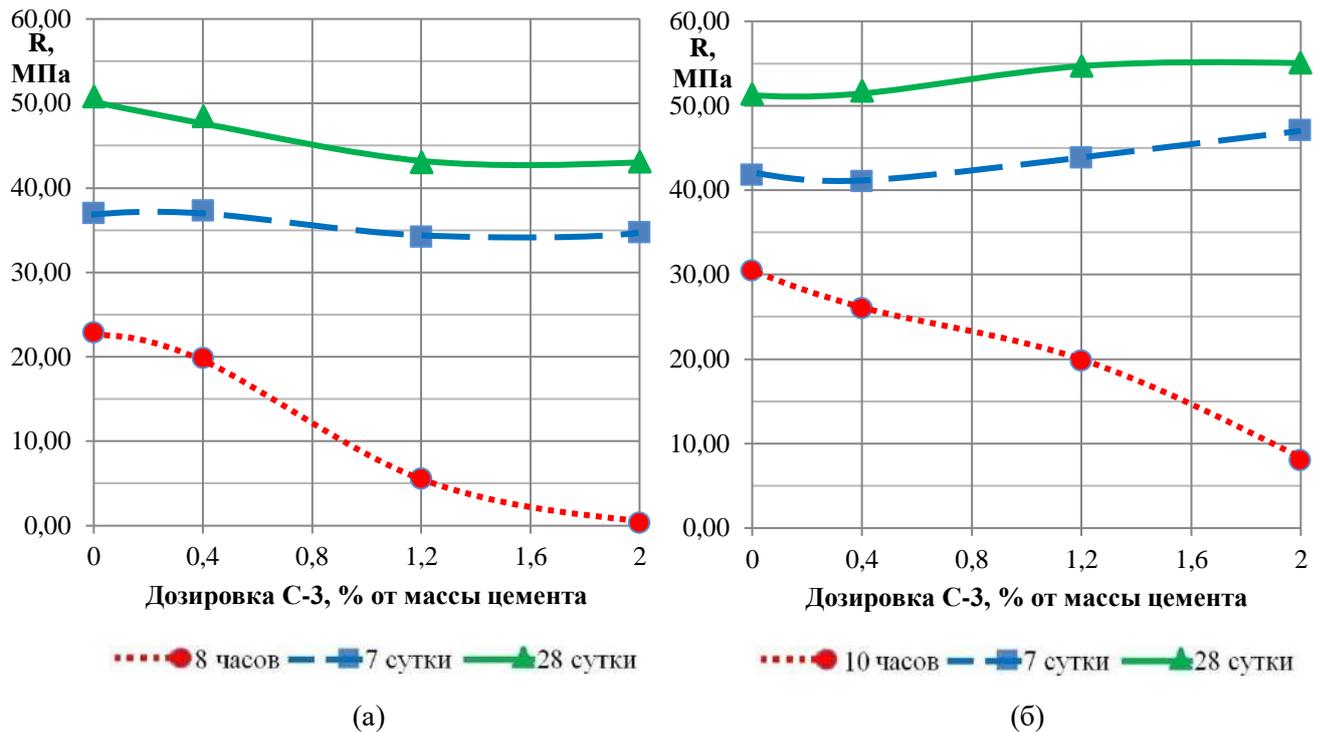


Рисунок 4.8 – Зависимость прочности цементно-песчаных растворов от дозировки добавки СНФ типа (С-3) при режимах ТВО по схемам: (а) (0-6-2) ч; (б) (2-6-2) ч

При модифицировании цементно-песчаных растворов СП на основе СНФ (см. рис. 4.8) выявлены существенные изменения в прочностных показателях при отказе от времени предварительного выдерживания, в особенности прочности после ТВО, что в значительной степени связано со структурообразованием цементных систем с добавкой данного типа на ранних сроках, в частности формированием рыхлой алюминатной структуры и уменьшенным количеством силикатной, что подтверждается исследованиями в главе 3.

4.3 Исследование набора прочности после ТВО цементно-песчаных растворов относительно 28-суточной

4.3.1 Сравнение набора прочности при режимах с различными периодами предварительного выдерживания

Исследована динамика набора прочности модифицированных цементно-песчаных растворов в относительном сравнении с проектной прочностью образца

без добавок при низкотемпературном режиме ТВО с 6-часовым периодом изотермического прогрева при температуре 60 °С и 2-ух часов остывания. Переменный фактор – период предварительного выдерживания. На рис. 4.9 (а) показан набор прочности при ТВО без предварительной выдержки, на рис. 4.9 (б) – с двухчасовой выдержкой.

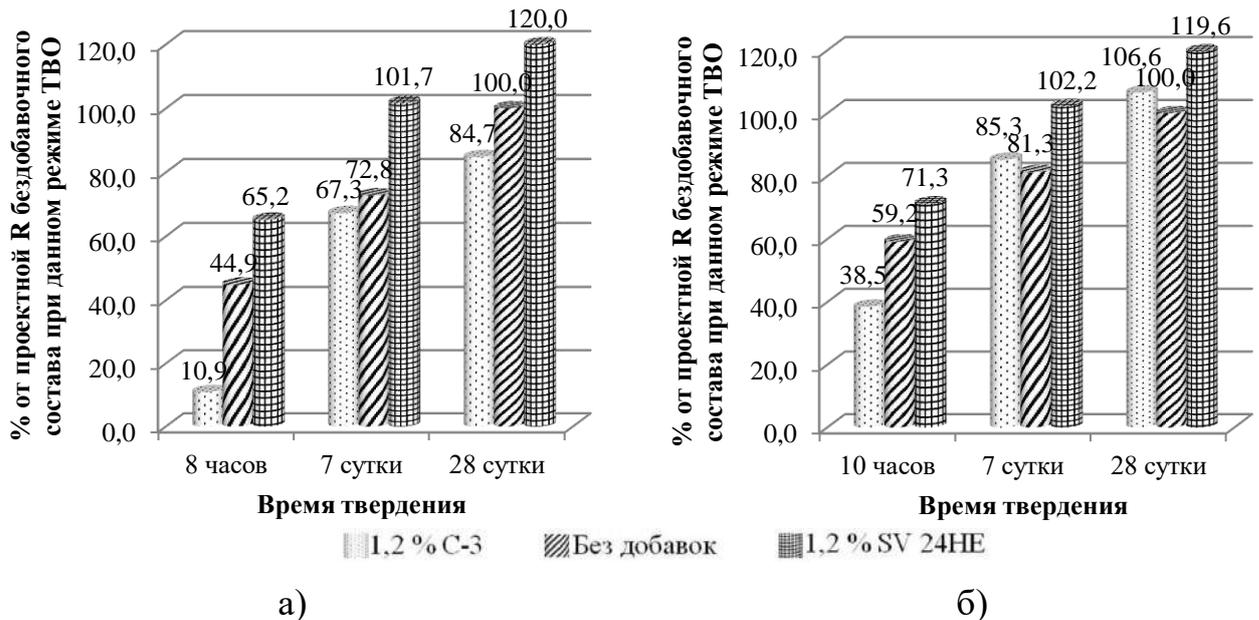


Рисунок 4.9 – Набор прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификатором ПКЭ типа (Sika Viscocrete 24 HE) и СНФ (С-3), в сравнении с проектной прочностью бездобавочного состава, при режиме ТВО: а) (0-6-2) ч б) (2-6-2) ч

Анализ полученных результатов показывает, что отказ от предварительного выдерживания при модифицировании цементно-песчаных растворов добавкой на основе СНФ отрицательно влияет на набор прочности – 38,5 % от проектной прочности бездобавочного состава при режиме ТВО (2-6-2) ч, и лишь 10,9 % – при режиме (0-6-2) ч. В то же время данный показатель при введении в растворы добавки типа ПКЭ (Sika Viscocrete 24 HE) составляет **71,3 %** при режиме с предварительным выдерживанием в течение 2 часов, и **65,2 %** без первоначальной выдержки, т.е. несмотря на снижение продолжительности всей ТВО на 20 % набор прочности снижается лишь на 6,5 %. Данный факт, несомненно, свидетельствует о возможности регулирования периода

предварительной выдержки цементных систем с суперпластификаторами на основе ПКЭ.

Мониторинг набора прочности на 7 сутки твердения показывает, что модифицирование цементно-песчаных растворов добавкой ПКЭ позволяет получить камень прочнее на 1,7-2,2 %, чем бездобавочный состав на 28 сутки, при этом время предварительного выдерживания практически не влияет на прочность на данном сроке твердения. Противоположный результат при добавлении в цементно-песчаный раствор добавки типа СНФ: на 7 сутки после режима ТВО (2-6-2) ч камень набирает прочность 85,3 %, а после ТВО по режиму (0-6-2) ч лишь 67,3 %.

На 28-ые сутки прочность состава с суперпластификатором ПКЭ типа составляет 120 %, независимо от периода предварительного выдерживания, в то время как прочность раствора с добавкой СНФ 84,7 % и 106,6 % при режимах ТВО (0-6-2) ч и (2-6-2) ч соответственно.

Полученные результаты дают основание утверждать, что введение в цементные системы суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов положительно влияет как на прочность после ТВО, так и на 7-суточную и проектную прочность, в частности при отказе от периода предварительного выдерживания модифицированных составов набор прочности за 8 часов ТВО (при режиме (0-6-2) ч) несущественно отличается от прочности за 10 часов (при режиме (2-6-2) ч. Данного феномена не наблюдается при модифицировании нафталинформальдегидными суперпластификаторами.

4.3.2 Сравнение набора прочности при режимах с различной длительностью изотермического прогрева ТВО

Исследовано влияние суперпластификаторов различного типа на набор прочности относительно проектной прочности бездобавочного состава при том же режиме ТВО в зависимости от длительности изотермической выдержки,

составляющей 4 и 8 ч. Результаты показаны на рис. 4.10 (а-б). Результат набора прочности с режимом 6 ч представлен выше на рис. 4.9 (а).

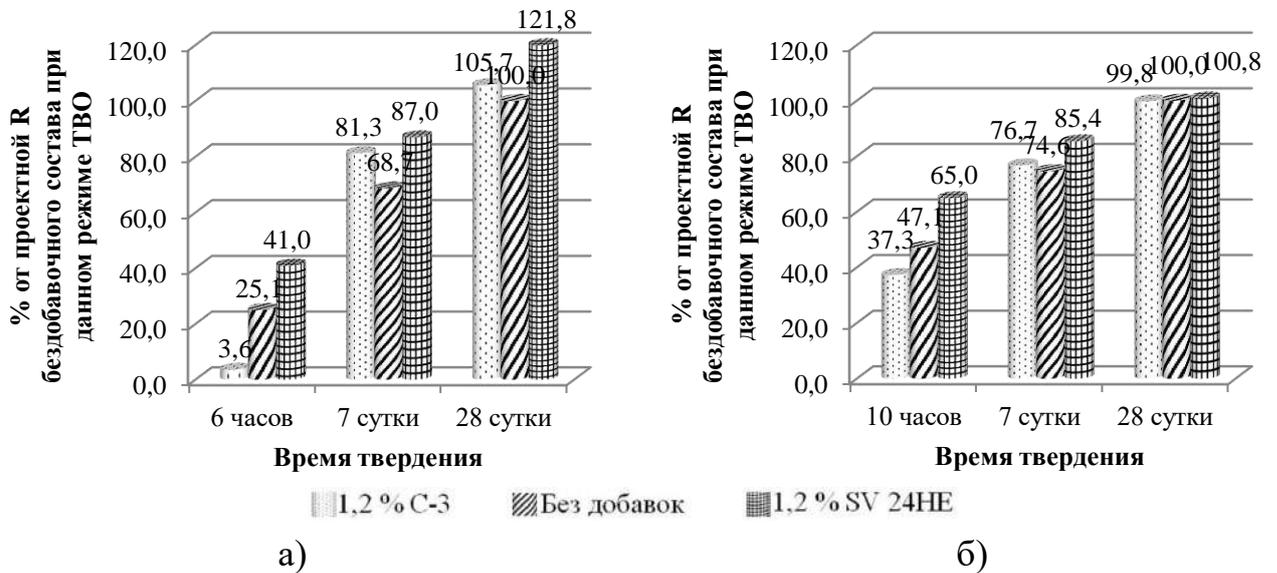


Рисунок 4.10 – Набор прочности цементно-песчаных растворов, модифицированных суперпластификатором ПКЭ типа (Sika Viscocrete 24 HE) и СНФ (С-3) в сравнении с проектной прочностью бездобавочного раствора, при режиме ТВО: а) (0-4-2) ч б) (0-8-2) ч

Набор прочности цементно-песчаных растворов с добавкой на основе СНФ существенно замедляется при режиме ТВО по схеме (0-4-2) ч (прочность при сжатии раствора составляет всего 3,6 % от проектной прочности бездобавочного раствора), а прочность раствора с СП на основе ПКЭ при этом же режиме составляет 41 % от прочности раствора без добавок. Однако прочность на 7 и 28 сутки схожа с показателями при режимах ТВО как (0-6-2) ч, так и (0-8-2) ч. Данные свидетельствуют о неэффективности снижения времени изотермического прогрева до 4 часов ввиду значительного снижения набора прочности (с 65,2 % до 41 % от проектной прочности бездобавочного раствора при сравнении режимов (0-6-2) ч и (0-4-2) ч при введении ПКЭ в растворы, и с 10,9 % до 3,6 % – при введении СНФ).

Незначительное отличие набора прочности при режимах (0-6-2) ч и (0-8-2) ч составов с ПКЭ (65,0-65,2 % после ТВО относительно 28-суточной прочности бездобавочного раствора) свидетельствует о том, что увеличение времени изотермического прогрева с 6 часов до 8 часов малоэффективно [96; 112; 203].

Данное явление не наблюдается при модифицировании цементно-песчаных растворов добавкой СНФ типа, для этих составов, напротив, увеличение времени пропаривания с 6 до 8 часов положительно влияет на прочностные показатели.

Также проведено сравнение набора прочности цементно-песчаных растворов относительно проектной прочности бездобавочного раствора, твердеющего при нормальных условиях (см. рис. 4.11).

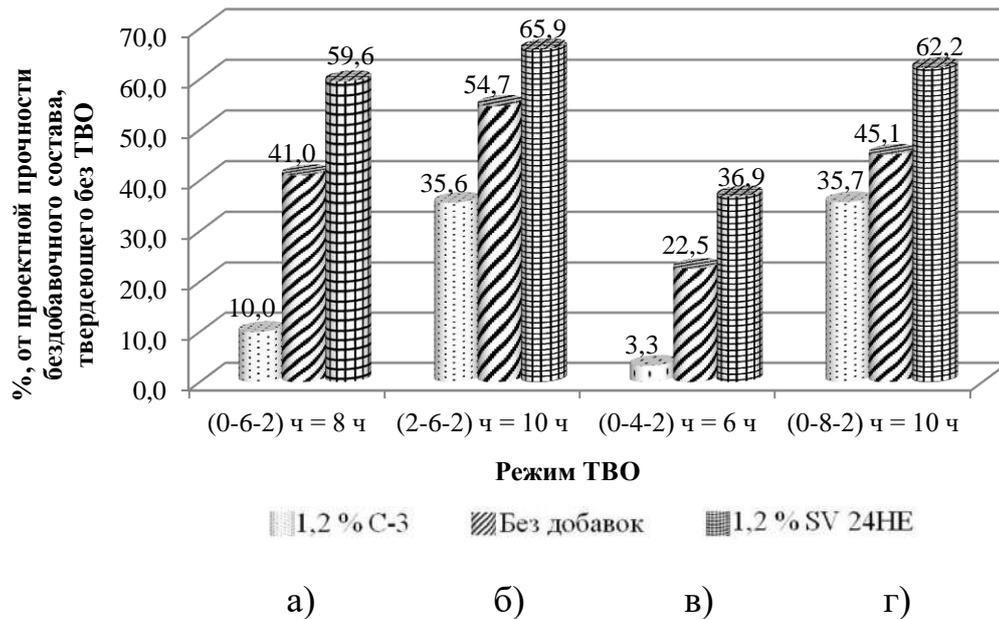


Рисунок 4.11 – Набор прочности цементно-песчаных растворов, модифицированными суперпластификаторами типа ПКЭ (Sika Viscocrete 24 HE) и СНФ (С-3), при различных режимах ТВО в сравнении с проектной прочностью бездобавочного раствора без ТВО:

а) (0-6-2) ч б) (0-8-2) ч в) (0-4-2) ч г) (0-8-2) ч

Данные иллюстрируют о наборе прочности в пределах 59,6-65,9 % в сравнении с 28-суточной прочностью бездобавочного раствора, твердеющего без ТВО при модифицировании поликарбоксилатным суперпластификатором, этот же показатель для составов с СНФ не выше 36 %. С отказом от предварительного выдерживания при 6-часовом изотермическом прогрева прочности после ТВО у цементно-песчаных растворов с ПКЭ снижается несущественно.

4.4 Выводы по главе 4

1. Сравнение кинетики набора прочности после низкотемпературного режима ТВО показывает наибольшую эффективность составов, модифицированных добавкой поликарбоксилатного типа. Прочности растворов с содержанием добавки типа ПКЭ в сравнении с образцом без модификаторов выше после ТВО по режиму (0-6-2) ч на 45 %, на 40 %– за 7 суток, на 20 % – за 28 суток твердения

2. Наблюдается незначительное снижение прочности при сжатии после ТВО для составов с поликарбоксилатным суперпластификатором: на 7 %, 9,6 % и 15,7 при модифицировании с 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % соответственно, что объясняется разностью времени твердения (8 часов при режиме (0-6-2) ч и 10 часов при режиме (2-6-2) ч.

3. Отказ от предварительного выдерживания отрицательно влияет как на прочность после ТВО, так и на 7-е и 28-е сутки цементно-песчаных растворов с добавкой типа СНФ.

4. Характер изменения прочности растворов с поликарбоксилатным суперпластификатором как после низкотемпературного режима ТВО, так и на поздних сроках твердения (7-28 суток) незначительный, что даёт основание судить о возможности регулирования периода предварительного выдерживания перед ТВО в сторону уменьшения.

5. Набор прочности при введении в растворы добавки типа ПКЭ составляет 71,3 % от прочности бездобавочного состава при режиме с предварительным выдерживанием в течение 2 часов, и 65,2 % без данного этапа, т.е. несмотря на снижение продолжительности всей ТВО на 20 % набор прочности снижается незначительно.

6. Нецелесообразно увеличение времени изотермического прогрева с 6 часов до 8 часов составов с ПКЭ с точки зрения незначительного изменения прочности и возрастания времени всего цикла ТВО.

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО ТИПА НА ПРОЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ТВО

5.1 Планирование эксперимента с помощью математического моделирования

Исследовано влияние содержания добавок ПКЭ суперпластификатора и режима твердения на прочность тяжелого бетона. Для приготовления бетона использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «Горнозаводскцемент» [203].

С целью исключения влияния возможного различия фракционного состава на прочностные свойства бетонов заполнители предварительно просеивались на фракции 5-10 мм, 10-20 мм (для щебня) и менее 0,315 мм, 0,315-0,63 мм, 0,63-2,5 мм (для песка). В дальнейшем просеянные части заполнителей вводились в долях согласно табл.5.1.

Таблица 5.1 – Состав бетона (содержание цемента, крупного и мелкого
заполнителя)

Фракция	Цемент	Щебень		Песок		
		Фр. 5-10 мм	Фр. 5-10 мм	Фр. <0,315 мм	Фр. 0,315- 0,63 мм	Фр. 0,63- 2,5 мм
Доля фракции	-	33 %	67 %	40,0 %	37,2 %	22,8 %
Расход доли фракции, кг/м ³	-	396	804	312	290	178
Общий расход, кг/м ³	350	1200		780		

Эффект водопонижения достигался использованием суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE [49; 163]. Химическая добавка вводилась в бетонную смесь с последней третью воды затворения согласно рекомендациям. Содержание ПКЭ суперпластификатора в бетоне варьировалось от 0,4 до 2,0 % от массы цемента.

Образцы бетона изготавливались размерами 100x100x100 мм и подвергались тепловлажностной обработке. ТВО проводилась с предварительным выдерживанием в течение 0 ч, 1 ч и 2 ч, с различным временем изотермического выдерживания (4, 6 и 8 ч) и остыванием образцов в течение 2 ч. Прочность на сжатие составов определялась в момент распалубки (6 ч, 8 ч и 12 ч в зависимости от режима ТВО).

В результате полученных данных строились адекватные математические модели, соответствующие критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера. Границы варьирования переменных факторов приведены в табл.5.2.

Таблица 5.2 – Уровни варьирования переменных факторов

Наименование переменных факторов	Уровни варьирования переменных факторов		
	-1	0	+1
1. Температура изотермической выдержки ТВО, °С	40	60	80
2. Длительность изотермической выдержки ТВО, ч	4	6	8
3. Содержание добавки ПКЭ Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	0,4	1,2	2,0
4. Длительность предварительного выдерживания ТВО, ч	0	1	2

5.2 Интерпретация результатов

В таблице представлены показатели водоцементного отношения, дозировки СП, режима ТВО и прочности бетонных смесей подвижностью П2 (по осадке конуса от 5 до 9 см). В случаях формирования отличающихся значений подвижности от П2 составы заливались повторно с корректировкой вводимой в смесь объема воды. Анализ результатов показывает, что присутствие поликарбоксилатного суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE позволяет снизить водопотребность смеси на 11,8-23,1% при условии сохранения равноподвижности.

Таблица 5.3 – Водоцементное отношение бетонных смесей

№	Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	В/Ц
1	-	0,494
2	0,4	0,442
3	1,2	0,416
4	2,0	0,400

5.2.1 Результаты прочности бетонов после ТВО без предварительного выдерживания

В результате обработки результатов экспериментов методами факторного анализа получены математические модели зависимости прочности бетона после ТВО от дозировки суперпластификатора – X_1 и длительности изотермического выдерживания (при 40 °С) – X_2 . При доверительной вероятности 95 % модели имеют вид:

$$Y = 10,53 - 2,20 X_1 + 3,82 X_2 + 0,47 X_1^2 + 0,95 X_1 X_2$$

Наблюдается явная тенденция (см. рис. 5.1) – с увеличением дозировки ПКЭ прочностные свойства снижаются, поскольку усиливается его блокирующее действие на процессы начальной гидратации портландцемента [53]. Прочность при увеличении дозировки снижается до 15,5-61,1%, причем чем больше длительность прогрева, тем менее выражена тенденция к снижению прочности.

Анализ данных показывает, что с увеличением дозировки Sika Viscocrete 24 HE прослеживается эффект выравнивания распалубочной прочности, в особенности при расходе 2,0 % от массы цемента.

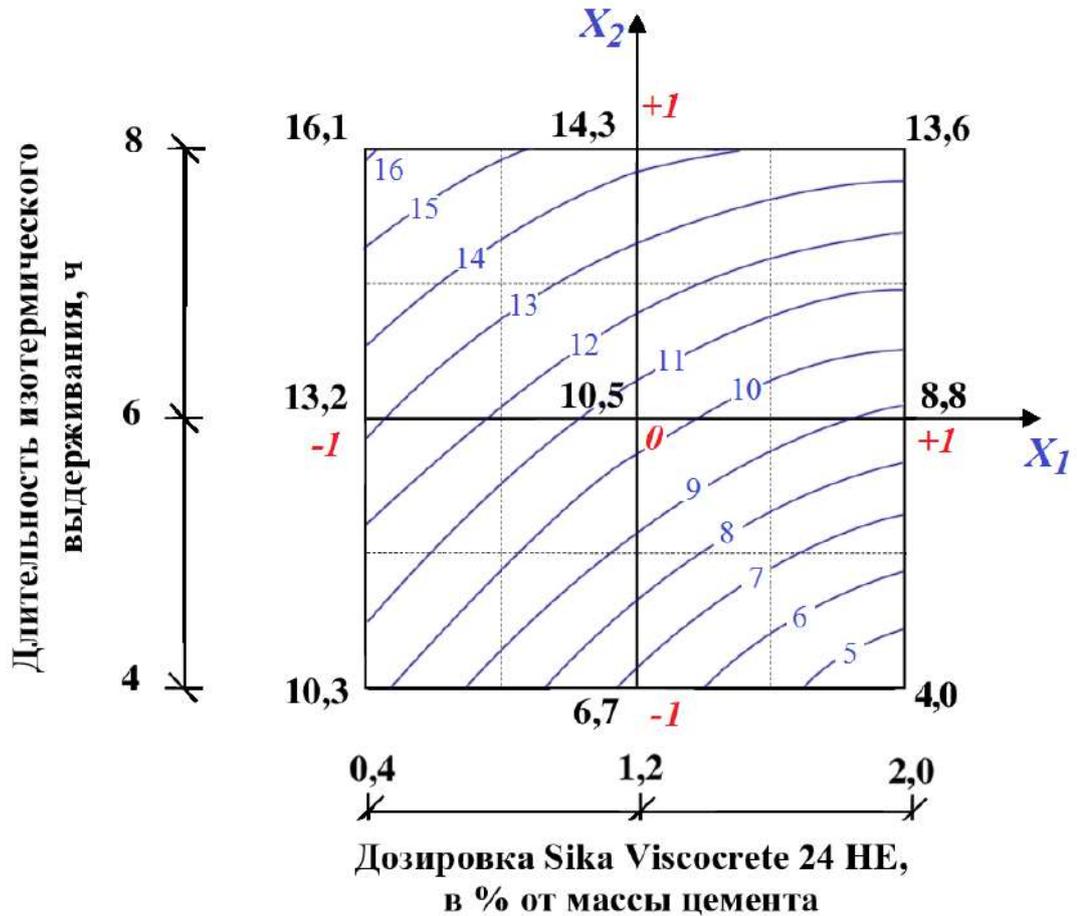


Рисунок 5.1 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 40 °С

На рис. 5.2 показана математическая модель зависимости дозировки Sika Viscocrete 24 HE (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при температуре 60 °С.

При доверительной вероятности 95 % уравнение регрессии имеет вид:

$$Y = 16,12 - 2,26 X_1 + 5,24 X_2 + 0,94 X_1 X_2$$

При пониженном расходе суперпластификатора наблюдается ускоренная гидратация цементной системы, поскольку данного количества добавки недостаточно для блокировки кристаллообразования минералов цемента и образующихся соединений этtringита (трехсульфатной формы гидросульфалюмината кальция или AFt – фазы) и моносulfатной формы гидросульфалюмината кальция (моносulfата или AFm – фазы), имеется доступ к цементным минералам [82; 101; 157]. Прирост прочности с увеличением

времени изотермического прогрева идёт интенсивнее в сравнении с температурой прогрева в 40 °С и составляет 61,0 %, 96,3 % и 161,0% для дозировок Sika Viscocrete 24 HE 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % соответственно.

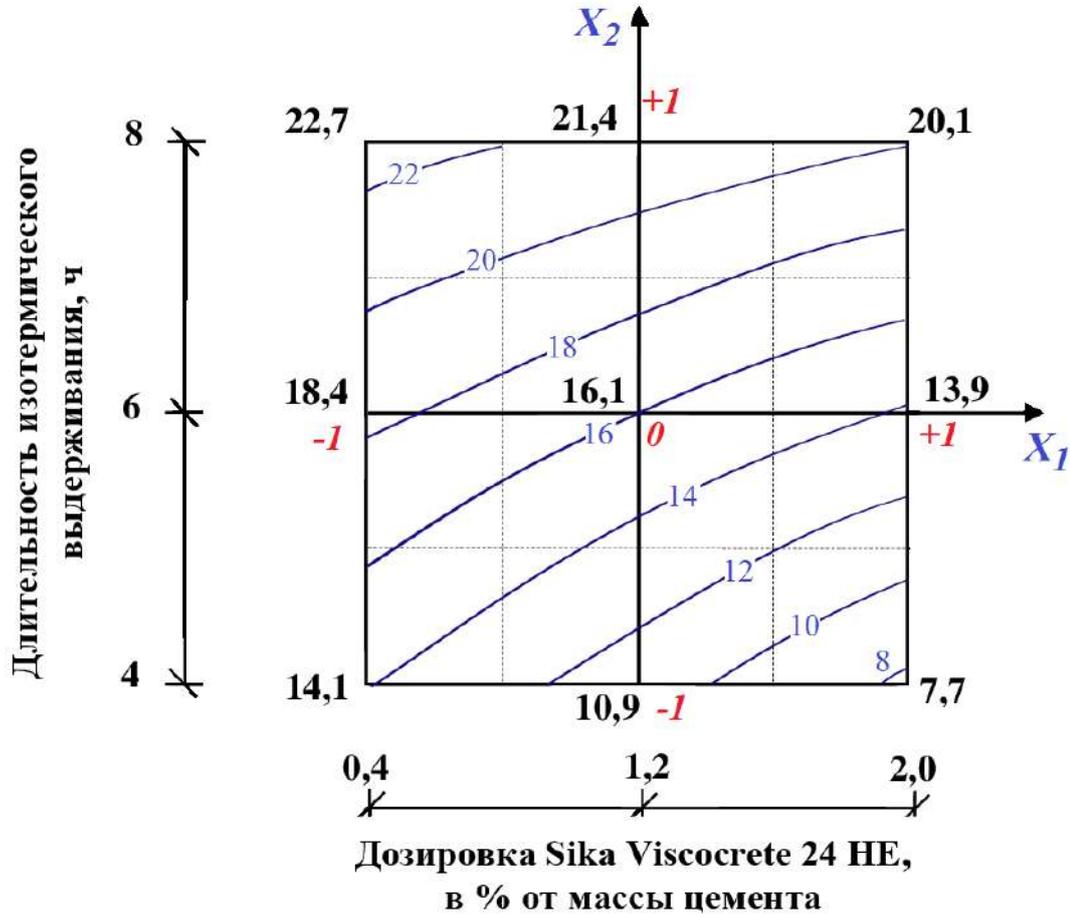


Рисунок 5.2 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 60 °С

Анализ полученных данных (рис. 5.3) при температуре изотермического прогрева в 80 °С показывает возможность увеличения до 66,8-86,0-99,2 % для дозировок Sika Viscocrete 24 HE 0,4-1,2-2,0 % соответственно, что свидетельствует о снижении кинетики набора распалубочной прочности бетонов при данной температуре пропаривания в сравнении с составами, подверженным температуре прогрева 60 °С. Аналогично показаниям, полученным при температурах изотермического прогрева в 40 °С и 60 °С прочность с увеличением дозировки СП снижается, однако не так интенсивно [96; 112].

Регрессионная модель распалубочной прочности бетонов при уровне значимости $\alpha=0,05$ приобретает вид:

$$Y = 20,45 - 2,99 X_1 + 6,15 X_2 + 1,1 X_1^2$$

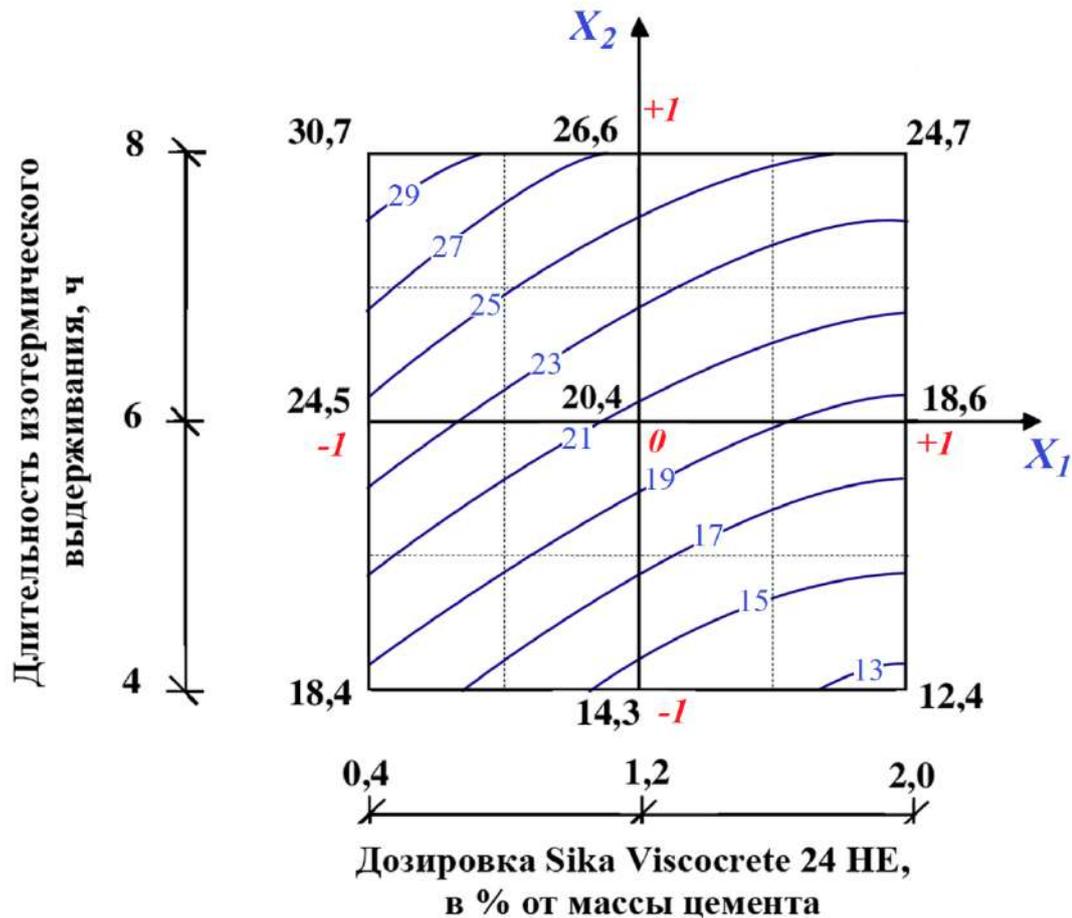


Рисунок 5.3 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 80 °С

Иногда при производстве сборного конструкционного железобетона важно выявить другие зависимости. Анализ зависимости дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора от температуры изотермического выдерживания бетона при режиме (0-4-2) ч показан на рис.5.4. С ростом дозировки Sika Viscocrete 24 HE прочность падает на 61,2 %, 45,4 % и 32,6 % при расходе добавки 0,4 %, 1,2 % и 2,0 % от массы цемента соответственно.

Увеличение температуры прогрева позволяет повысить распалубочную прочность до 78,6-210,0 % в зависимости от дозировки СП.

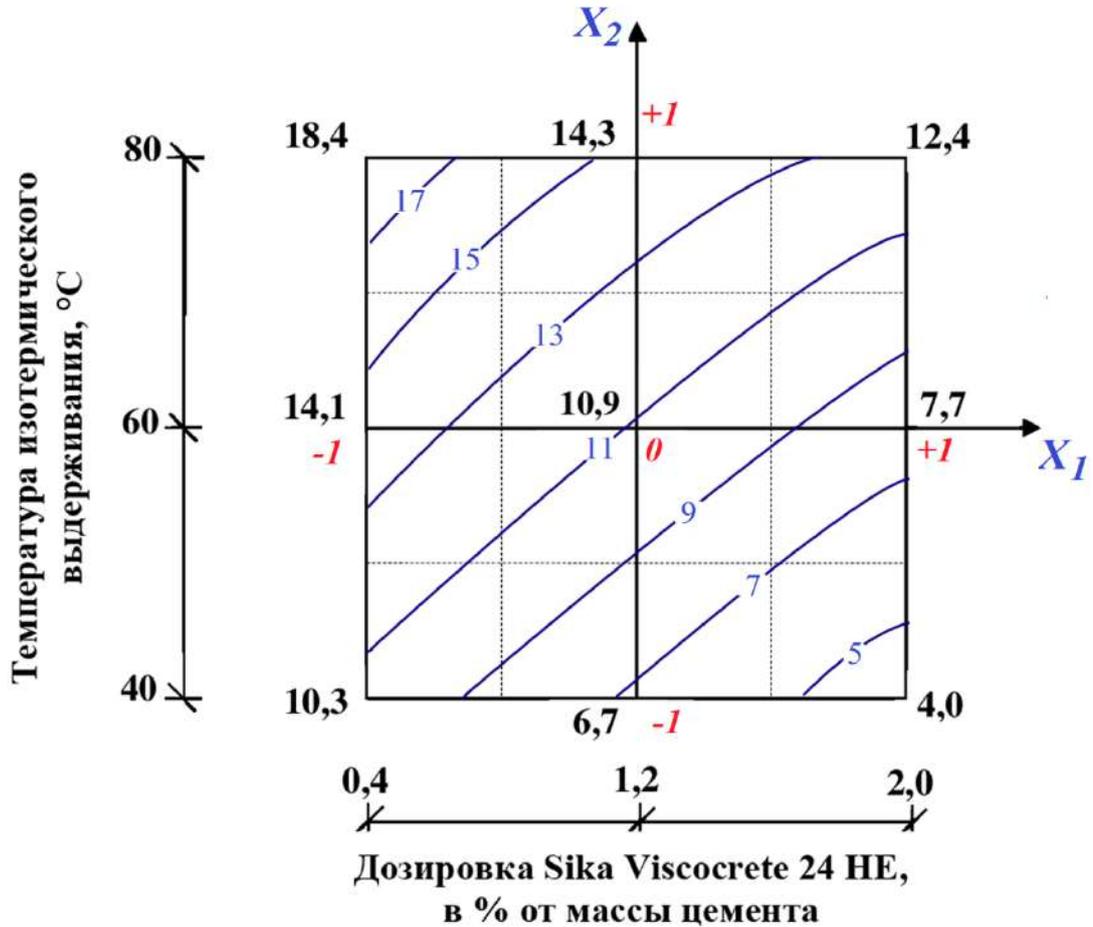


Рисунок 5.4 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и температуры пропаривания (координата X_2) при режиме ТВО (0-4-2) ч

Аналогичная тенденция роста прочности при увеличении температуры обогрева с 40 °C до 80 °C зафиксирована при режимах (0-6-2) ч и (0-8-2) ч, что показано на рис. 5.5 и 5.6. Значения увеличения прочности составили 85,6 %, 94,3 %, 111,4 % (для режима (0-6-2) ч) и 90,7 %, 86,0 %, 81,6 % (для режима (0-8-2) ч) при дозировках суперпластификатора 0,4 %, 1,2 %, 2,0 % соответственно.

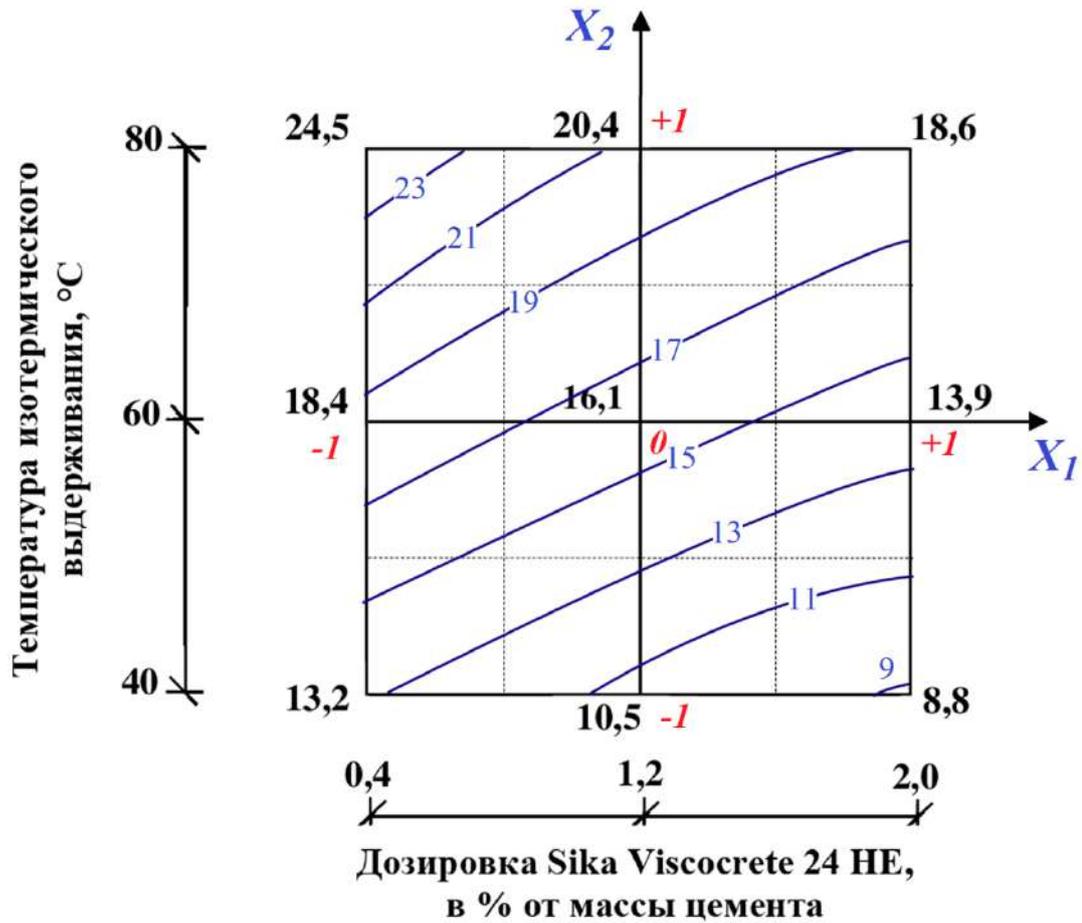


Рисунок 5.5 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и температуры пропаривания (координата X_2) при режиме ТВО (0-6-2) ч

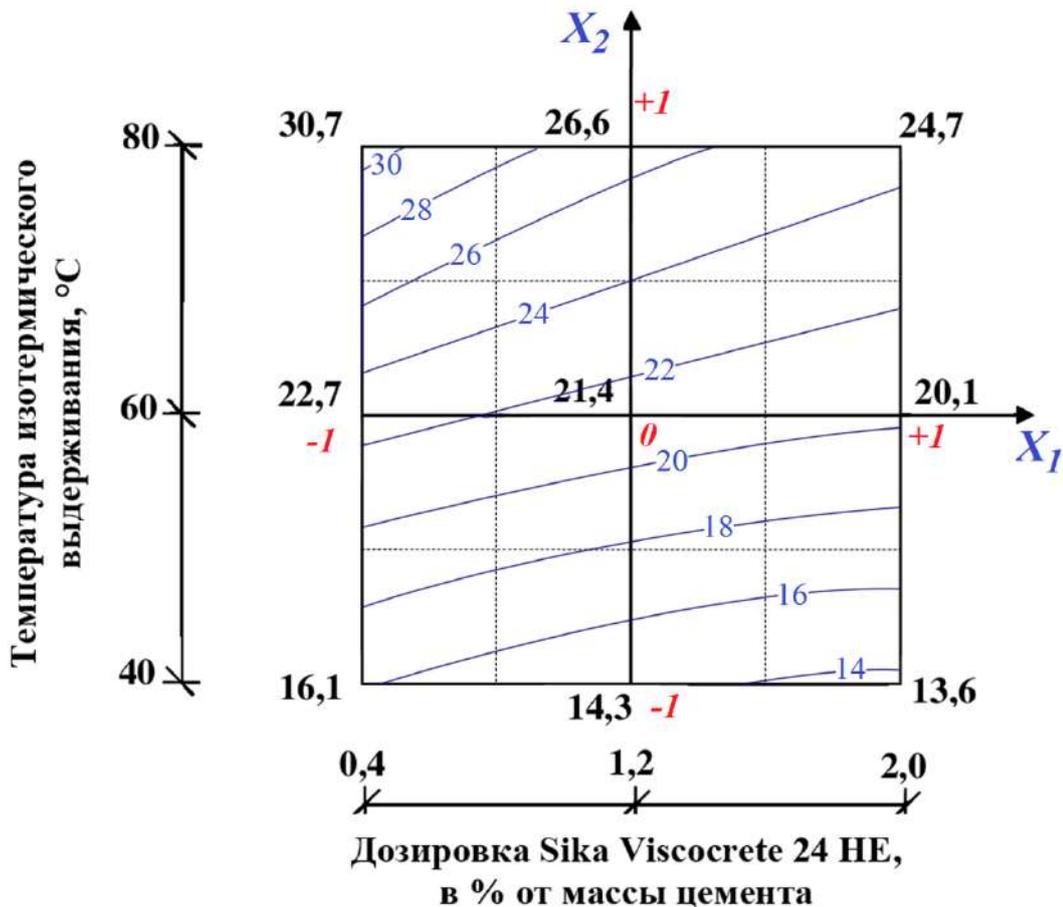


Рисунок 5.6 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и температуры пропаривания (координата X_2) при режиме ТВО (0-8-2) ч

Рис. 5.7 иллюстрирует закономерный рост прочности бетона с увеличением как температуры, так и длительности изотермического прогрева. Прирост прочности с увеличением температуры прогрева растет на 200,0 %, 134,8 %, 104,9 % при длительности прогрева в 4, 6, 8 ч соответственно, что свидетельствует об ускорении процесса гидратации цементных минералов. При уровне значимости, равном 0,05 регрессионная модель зависимости распалубочной прочности при сжатии от исследуемых параметров примет вид:

$$Y = 14,91 + 3,72 X_1 + 6,02 X_2 + 0,38 X_1 X_2$$

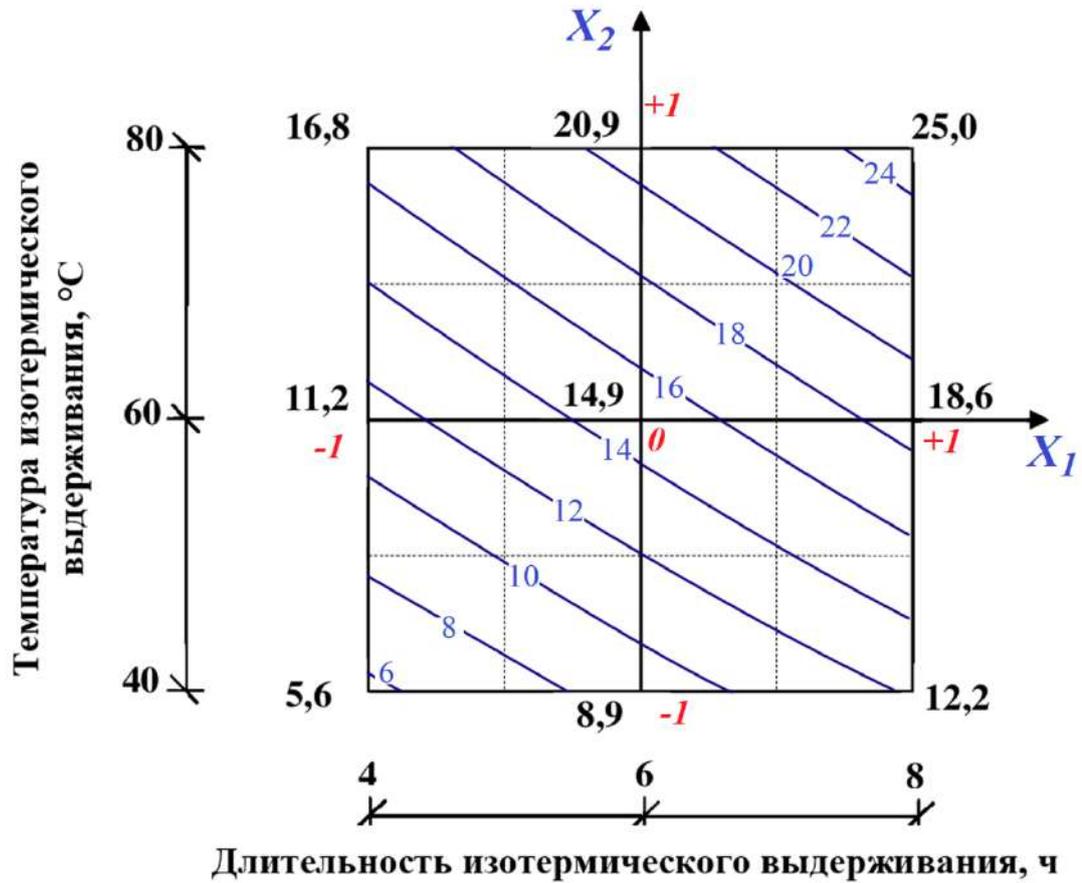


Рисунок 5.7 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от длительности (координата X_1) и температуры изотермического пропаривания (координата X_2). ТВО без предварительного выдерживания

Результаты экспериментальных исследований для опытов без предварительного выдерживания приведены в приложении А, в табл. А.1. Регрессионный анализ модели показан в табл. А.2., А.3., А.4, А.5 для графических моделей рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.3, рис. 5.7 соответственно.

5.2.2 Результаты прочности бетонов после ТВО с предварительной выдержкой в течение 1 ч

При режиме ТВО с временем предварительного выдерживания в течение 1 часа тенденции набора распалубочной прочности сохраняются относительно режима ТВО без предварительного выдерживания с незначительным увеличением прочности.

При доверительной вероятности 95 % получена полиномиальная регрессионная модель (см. рис.5.8) зависимости прочности при сжатии бетона (в МПа) от переменных факторов: дозировки Sika Viscocrete 24 HE (X_1) и длительности прогрева (X_2), и имеет вид:

$$Y = 10,91 - 2,13X_1 + 3,7X_2 + 0,88X_1X_2$$

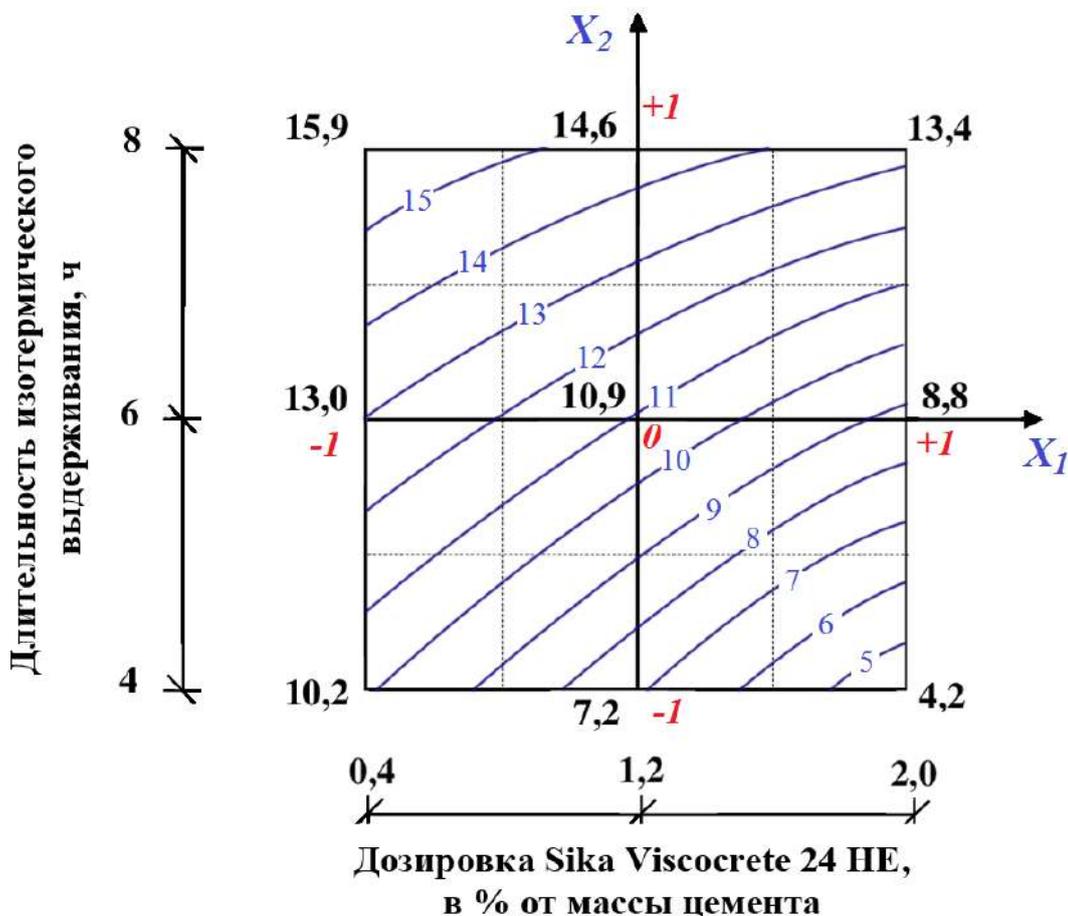


Рисунок 5.8 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 40 °С. Предварительное выдерживание – 1 ч

Данные показывают эффективную дозировку суперпластификатора в пределах 0,4 % от массы цемента. Увеличение дозировки сверх указанного расхода сдерживает рост прочности. Описанный феномен именуют термином «критическая доза» и впервые исследован японским ученым К. Ямада, изучившим степень влияния всех видов суперпластификаторов на свойства бетонов [249].

Получена регрессионная модель зависимости распалубочной прочности при сжатии бетона от исследуемых параметров при температуре изотермического прогрева 60 °С (см. рис. 5.9). При уровне значимости 0,05 модель имеет вид:

$$Y = 16,2 - 2,27X_1 + 5,18X_2 + 0,95X_1X_2$$

С увеличением длительности изотермического прогрева и дозировки суперпластификатора наблюдается «сглаживание» прочностных свойств, что свидетельствует о малой отдаче при повышении дозировок Sika Viscocrete 24 HE, несмотря на редуцирование водоцементного отношения [53; 105; 154].

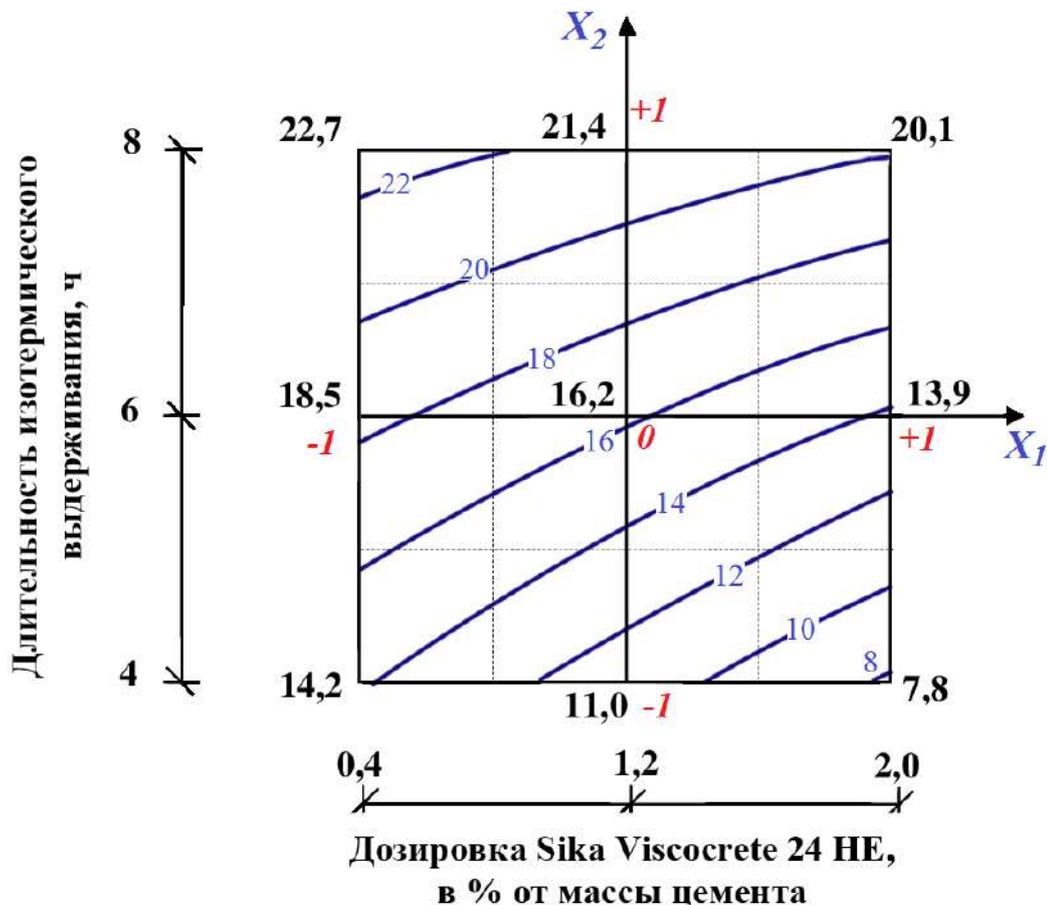


Рисунок 5.9 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 60 °С.

Предварительное выдерживание – 1 ч

Регрессионная модель зависимости (см. рис. 5.10) распалубочной прочности бетона после ТВО при температуре изотермического пропаривания в 80 °С от исследуемых параметров при доверительной вероятности 0,95 имеет вид:

$$Y = 22,5 - 2,72X_1 + 6,4X_2 - 0,83X_2^2 + 0,65X_1X_2$$

Анализ данных по распалубочной прочности показывает схожие показатели при режиме без предварительного выдерживания.

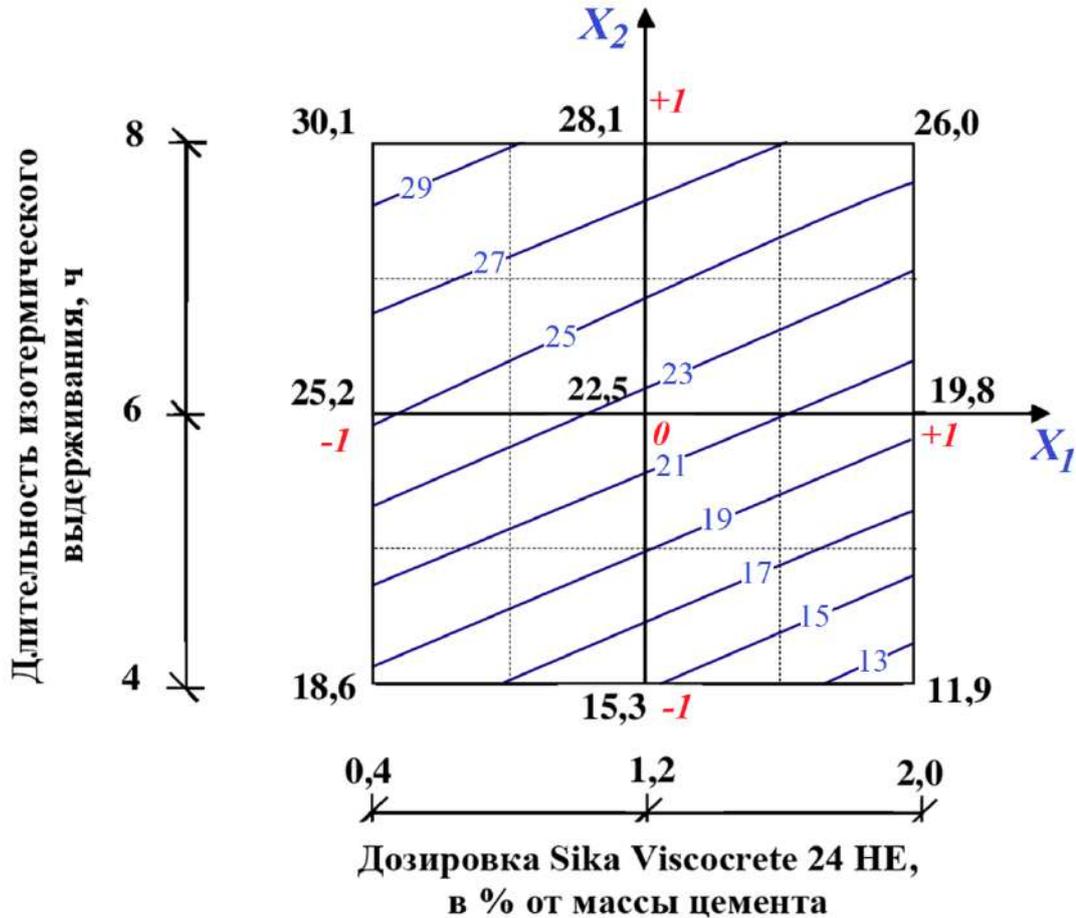


Рисунок 5.10 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 80 °С.

Предварительное выдерживание – 1 ч

В результате выполнения плана эксперимента получена регрессионная модель (см. рис. 5.11), адекватно при уровне значимости $\alpha=0,05$ отражающая зависимость распалубочной прочности при сжатии бетона от факторов длительности (X_1) в температуры (X_2) изотермического выдерживания ТВО:

$$Y = 15,72 + 3,7 X_1 + 6,22 X_2$$

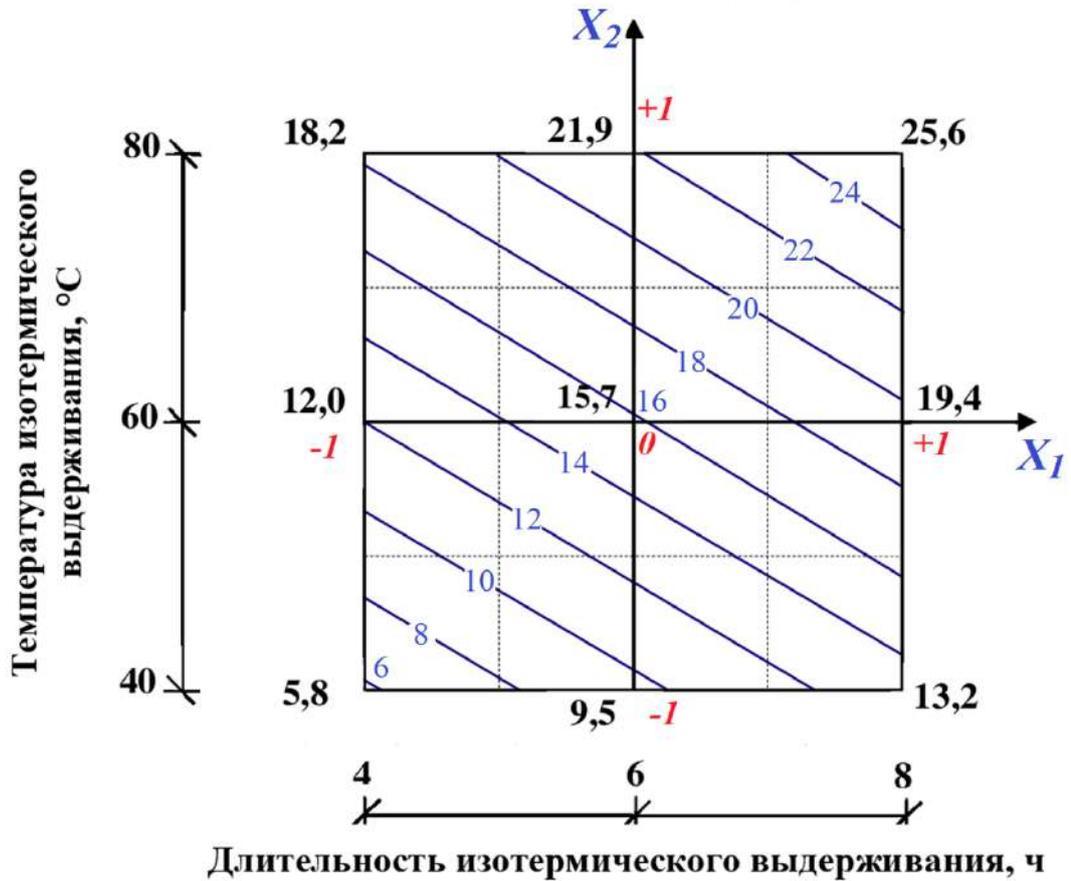


Рисунок 5.11 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от длительности (координата X_1) и температуры изотермического выдерживания (координата X_2). Предварительное выдерживание – 1 ч

Результаты экспериментальных исследований для опытов с ТВО с временем предварительного выдерживания в течение 1 ч приведены в приложении Б, в табл. Б.1. Регрессионный анализ модели показан в табл. Б.2., Б.3., Б.4, Б.5 для графических моделей рис. 5.8, рис. 5.9, рис. 5.10, рис. 5.11 соответственно.

5.2.3 Результаты прочности бетонов после ТВО с предварительной выдержкой в течение 2 часов

В целом, показатели прочности незначительно увеличиваются при сравнении данных показателей аналогичных составов, твердеющих при той же длительности и температуре прогрева ТВО, но при значении предварительного выдерживания 0 ч и 1 ч [203].

На основании проведенного эксперимента построена регрессионная модель зависимости (см. рис. 5.12) распалубочной прочности бетона от параметров:

- дозировка суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE;
- длительность изотермического выдерживания.

При уровне значимости $\alpha=0,05$ модель принимает вид:

$$Y = 11,59 - 2,23 X_1 + 3,5 X_2 + 0,9 X_1 X_2$$

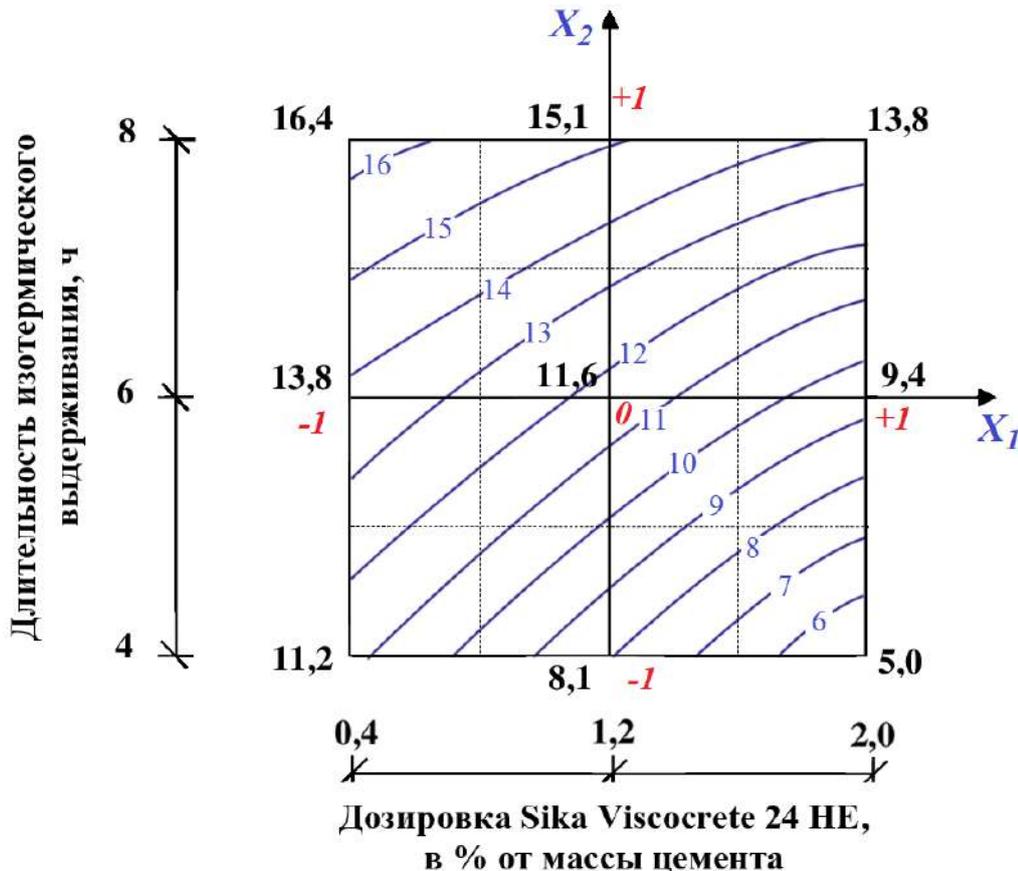


Рисунок 5.12 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 40 °С. Предварительное выдерживание – 2 ч

Полиномиальная модель зависимости прочности в момент распалубки при сжатии модифицированных составов бетона после ТВО (температура изотермического прогрева 60 °С) при доверительной вероятности 0,95 имеет вид:

$$Y = 17,3 - 2,37 X_1 + 4,83 X_2 + 1,33 X_1 X_2$$

На рис. 5.13 приведен геометрический образ модели распалубочной прочности бетона.

С точки зрения снижения энергозатрат целесообразен состав с 0,4 % Sika Viscocrete 24 HE при длительности изотермического прогрева ТВО, равной 6 ч.

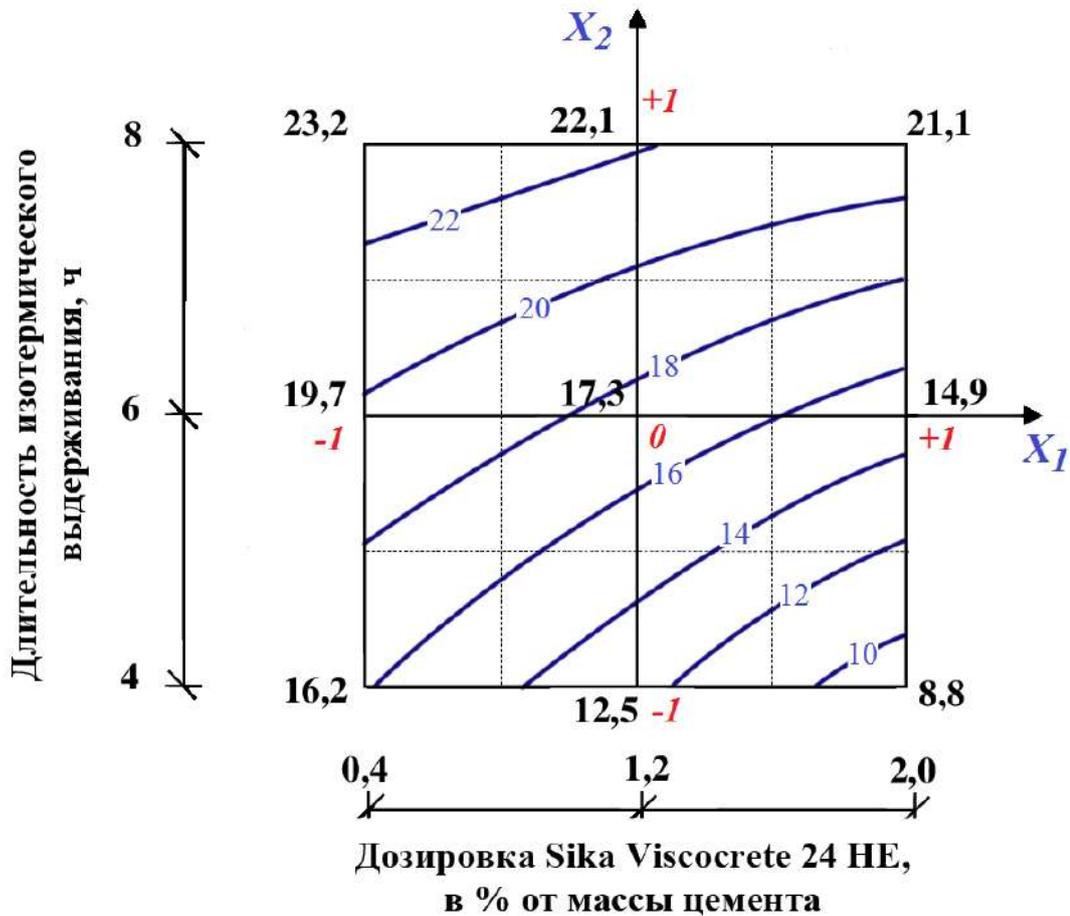


Рисунок 5.13 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 60 °С.
Предварительное выдерживание – 2 ч

При уровне значимости $\alpha=0,05$ регрессионная модель зависимости распалубочной прочности бетона от исследуемых параметров (дозировка Sika Viscocrete 24 HE и длительность изотермического прогрева) после ТВО имеет вид:

$$Y = 23,35 - 2,5 X_1 + 6,32 X_2 - 0,89 X_2^2 + 0,5 X_1 X_2$$

Изолинии распалубочной прочности бетона в координатах X_1/X_2 приведены на рис. 5.14.

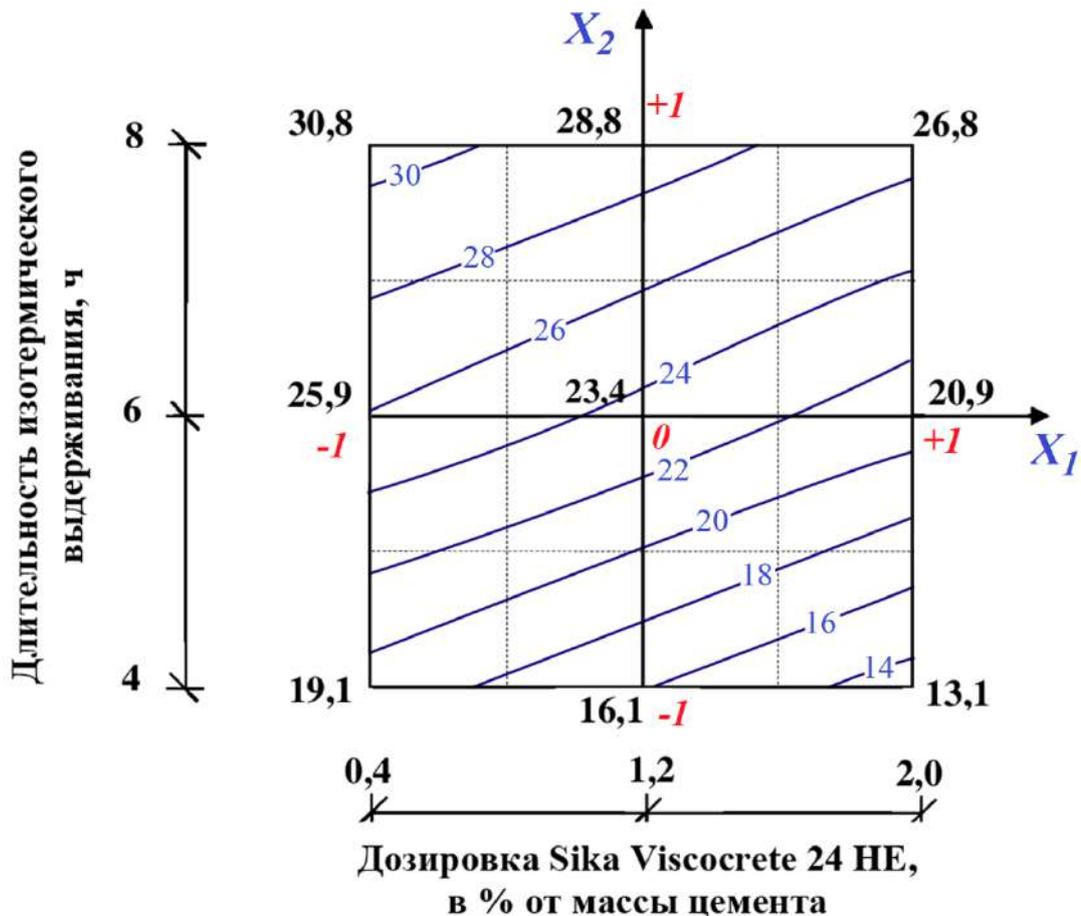


Рисунок 5.14 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE (координата X_1) и длительности изотермического выдерживания (координата X_2) при 80°C . Предварительное выдерживание – 2 ч

На основании проведенного эксперимента построена регрессионная модель зависимости распалубочной прочности при сжатии бетона от исследуемых параметров. При доверительной вероятности в 0,95% модель имеет вид:

$$Y = 16,88 + 3,65 X_1 + 6,27 X_2 - 0,78 X_2^2 + 0,6 X_1 X_2$$

Графическая зависимость прочности при сжатии от параметров длительности и температуры изотермического прогрева приведена на рис. 5.15.

Результаты эксперимента указывают на схожую тенденцию набора прочности в момент распалубки, что подтверждает низкую эффективность предварительного выдерживания бетонных составов, модифицированных современными суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров, что, связано с молекулярной структурой самих модификаторов, в частности с длиной основной и боковой цепей [3; 54; 83; 85; 96–98; 181].

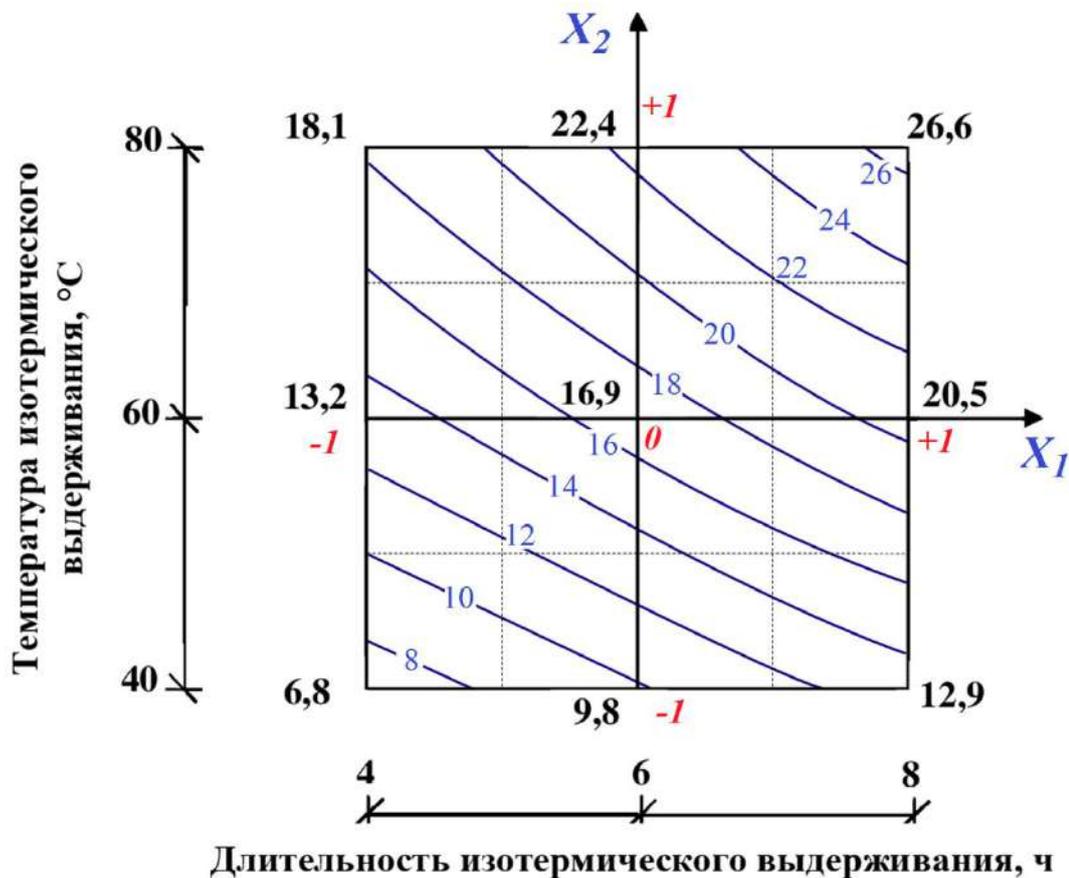


Рисунок 5.15 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от длительности (координата X_1) и температуры изотермического выдерживания (координата X_2). Предварительное выдерживание – 2 ч

Результаты экспериментальных исследований для опытов с ТВО с временем предварительного выдерживания в течение 2 ч приведены в приложении В, в табл. В.1. Регрессионный анализ модели показан в табл. В.2., В.3., В.4, В.5 для графических моделей рис. 5.12, рис. 5.13, рис. 5.14, рис. 5.15 соответственно.

5.3 Анализ времени предварительного выдерживания перед ТВО на раннюю прочность тяжелого бетона

На основании проведенных экспериментов для наглядности построены графические модели прочности бетона после ТВО в зависимости от дозировки суперпластификатора Sika Viscocrete 24 HE и длительности предварительного выдерживания при различной максимальной температуре прогрева.

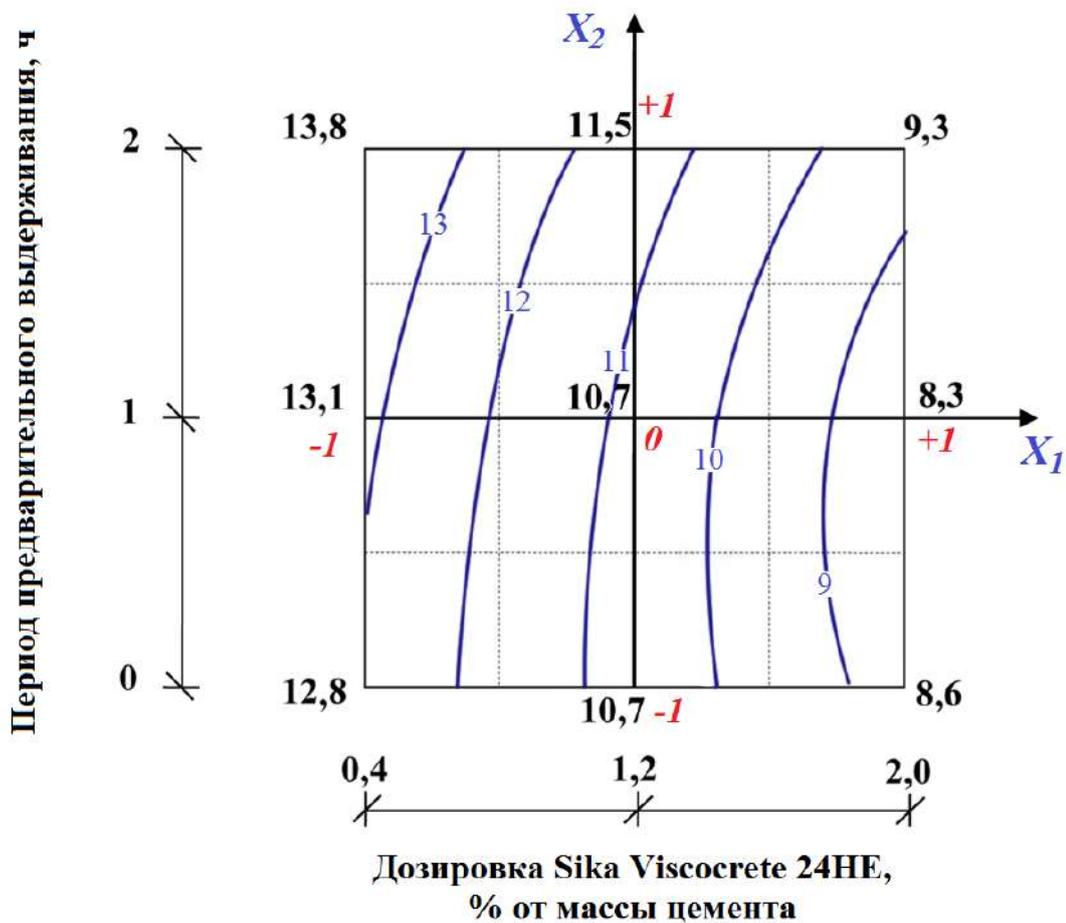


Рисунок 5.16 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности предварительного выдерживания (координата X_2) при изотермическом прогреве ТВО в течение 6 ч при 40 °С

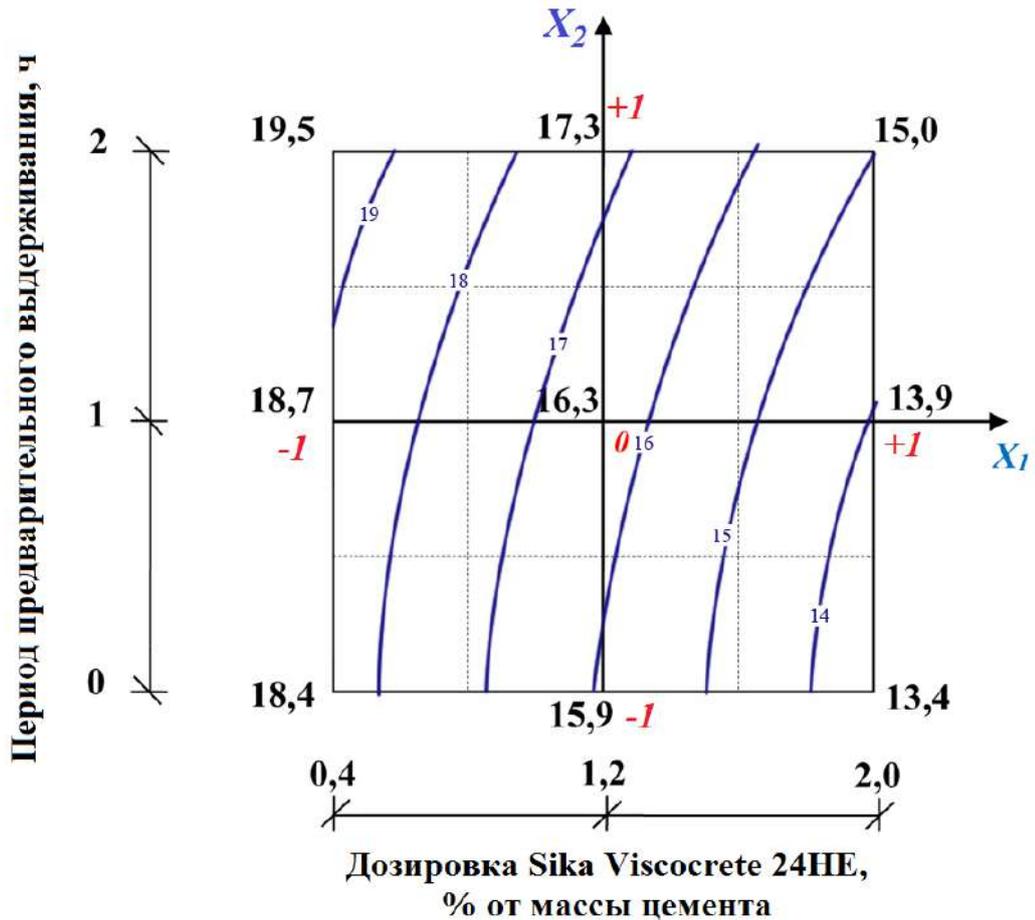


Рисунок 5.17 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распулбки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности предварительного выдерживания (координата X_2) при изотермическом прогреве ТВО в течение 6 ч при 60 °С

Наблюдается незначительное увеличение прочности с подъёмом длительности предварительного выдерживания до 2 ч при температуре прогрева 40 °С. Рост прочности составил всего 7,8 %, 7,5 %, 8,1 % при содержании Sika Viscocrete 24 HE 0,4 %, 1,2 %, 2,0 % соответственно в сравнении с составами без предварительного выдерживания. При температуре изотермического прогрева 60 °С прочность после ТВО увеличилась на 6,0-11,9 % (см. рис. 5.16-5.17).

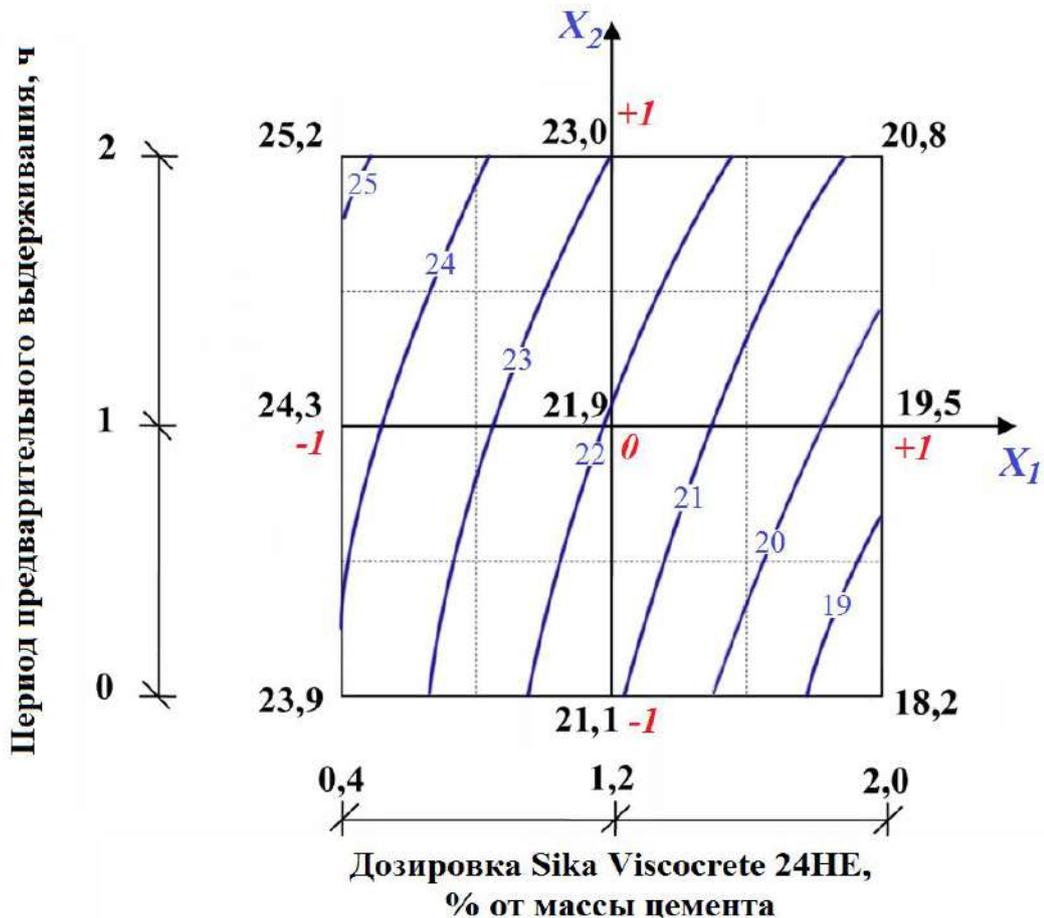


Рисунок 5.18 – Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки ПКЭ (координата X_1) и длительности предварительного выдерживания (координата X_2) при изотермическом прогреве ТВО в течение 6 ч при 80 °С

Прочность на сжатие после ТВО при температуре прогрева 80 °С возрастает на 5,4-14,3 % с увеличением времени предварительной выдержки (см. рис. 5.18).

Эксперименты доказывают малую эффективность периода предварительного выдерживания при проведении ТВО в вопросах структурообразования ранней прочности бетона.

Выполнен расчет текущего и среднего коэффициента вариации согласно ГОСТ 18105-2018 для состава с 0,4 % ПКЭ при режиме ТВО по схеме (0-6-2) ч при температуре пропаривания 60 °С. Текущий коэффициент вариации V_m в отдельных партиях варьируется от 0,7 % до 10,5 %. Среднее значение коэффициента вариации за анализируемый период согласно схеме А по ГОСТ 18105-2018 составил 6,3 %. Результаты расчета приведены в приложении Е.

5.4 Выводы по главе 5

1. Экспериментальные исследования подтвердили возможность получения изделий ЖБИ на основе бетонов, модифицированных поликарбоксилатным суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE, с высокой распалубочной прочностью (до 70 % от марочной) при использовании разработанного низкотемпературного режима ТВО (весь цикл в течение 8 часов), что способно обеспечить двух- и трехсменную оборачиваемость форм.

2. Экспериментально доказана возможность отказа от предварительного выдерживания бетонов и периода подъема температуры ТВО составов, модифицированных современным суперпластификатором на основе ПКЭ, в виду незначительного влияния названных периодов на раннюю прочность бетонов.

3. Оптимальный состав бетона для приготовления сборных конструктивных железобетонных изделий с точки зрения снижения трудо- и энергозатрат, формирования отпускной и передаточной прочности достигнут при дозировке СП на основе ПКЭ Sika Viscocrete 24 HE 0,4 % от массы цемента, при температуре изотермического прогрева 60 °С без предварительного выдерживания перед ТВО.

4. Получено математическое описание предела прочности при сжатии бетонных смесей для железобетонных изделий в зависимости от времени предварительного выдерживания, дозировки СП на основе ПКЭ Sika Viscocrete 24 HE, а также температуры и длительности изотермического прогрева ТВО.

5. Полученные составы пластифицированных бетонов и режим ТВО могут быть рекомендованы для внедрения в производство железобетонных изделий, в том числе получаемых методом непрерывного формования.

ГЛАВА 6 ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1 Изготовление перемычек брускового типа

Результаты диссертационного исследования были внедрены в 2021 году на предприятии ООО «Мариэкспресс» в г. Йошкар-Ола Республики Марий Эл. Были изготовлены железобетонные перемычки брускового типа 2ПБ 22-3П по Серии 1.038.1-1 при применении модифицированной бетонной смеси с прочностью после низкотемпературного режима ТВО В15, проектной прочностью В25. Изготовлено 30 перемычек, что соответствует 1,11 м³.

Сборочный чертеж и каркас перемычки 2ПБ 22-3П показан на рис. 6.1. и 6.2 в виде выкопировки из Серии 1.038.1-1 [152].

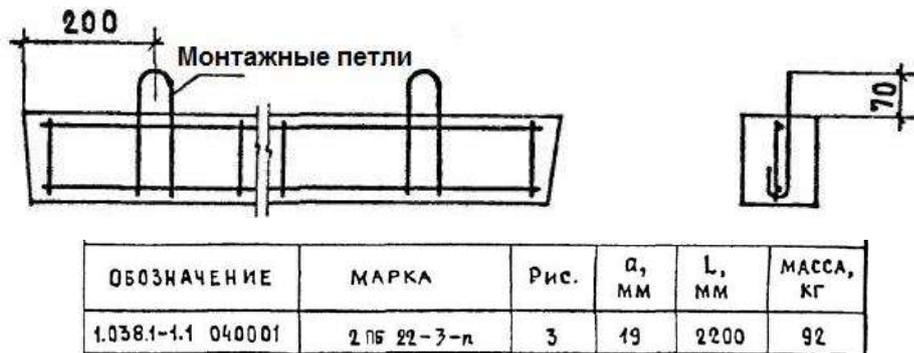


Рисунок 6.1 – Сборочный чертеж перемычки 2ПБ 22-3П

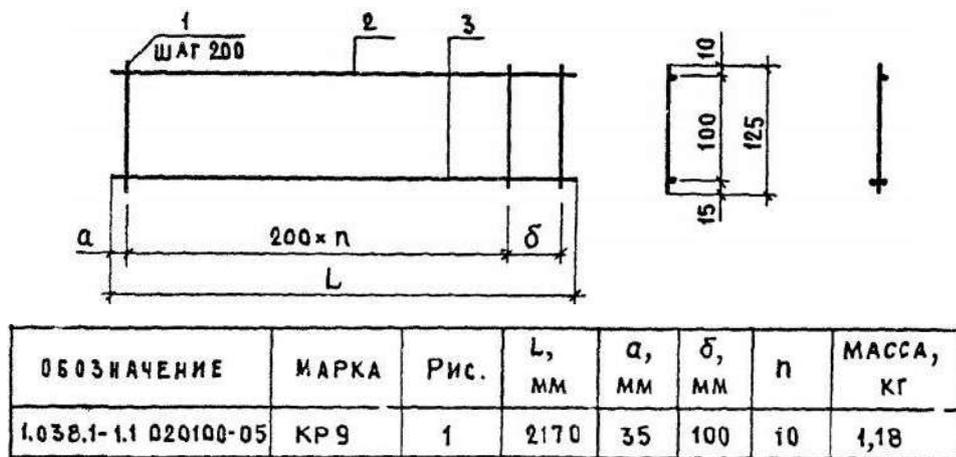


Рисунок 6.2 – Каркас КР-9 перемычки 2ПБ 22-3П

При лабораторных исследованиях бетона с 0,6 % Sika Viscocrete 24 HE при ТВО по схеме (1+6+2) ч и температуре пропаривания 60 °С получена прочность при сжатии после ТВО 16,2 МПа, на 7-е сутки – 26,1 МПа, на 28-е сутки – 32,7 МПа, что соответствует классу В25.

Перемычки, изготовленные по разработанному режиму ТВО смонтированы на объекте: «Многоквартирный жилой дом поз.10 в микрорайоне «Мирный» г. Йошкар-Ола, 6 этап», в качестве надоконных перемычек 4 этажа.

Акты внедрения результатов и фото представлены в приложении Г и Д.

6.2 Разработка рекомендаций по применению низкотемпературных режимов ТВО

По результатам исследования разработаны рекомендации по изготовлению сборных железобетонных изделий с применением разработанных низкотемпературных режимов ТВО. Разработанные рекомендации представлены в приложении Ж.

В разработанном документе выделены общие положения, область применения низкотемпературных режимов ТВО, материалы для бетонной смеси, особенности дозирования, укладки и уплотнения бетонной смеси, отличительные черты режимов ТВО, контроль производства изделий и техника безопасности при производстве.

6.3 Выводы по главе 6

1. Осуществлено внедрение разработанного состава бетона и режима ТВО при изготовлении железобетонных перемычек брускового типа 2ПБ 22-3П. Объем внедрения составил 1,11 м³.

2. Разработаны Рекомендации по применению низкотемпературных режимов ТВО при изготовлении сборных железобетонных изделий и конструкций.

3. Изготовленные железобетонные перемычки при разработанном низкотемпературном режиме ТВО смонтированы на объекте: «Многоквартирный жилой дом поз.10 в микрорайоне «Мирный» г. Йошкар-Ола, 6 этап», в качестве надоконных перемычек 4 этажа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ технической литературы, который показал, что существующие режимы ТВО бетонов, направленные на получение в ранние сроки высокой прочности, имеют существенные недостатки, связанные с высоким температурами прогрева, увеличенными затратами энергоресурсов, себестоимости производства и снижением трещиностойкости бетонов. При этом использование анионоактивных пластификаторов и суперпластификаторов для снижения водоцементного отношения и получения высокой прочности сильно замедляет гидратацию цементных систем в ранние сроки твердения, что сказывается на увеличении сроков производства железобетонных изделий. В связи с этим, перспективным является исследование влияние современных СП на кинетику твердения бетонов при «мягких» режимах ТВО.

2. Для совершенствования режимов ТВО была предложена технология, основанная на гипотезе о возможности и целесообразности применения сокращенных низкотемпературных режимов ТВО при использовании СП нового поколения и снижении времени предварительного выдерживания бетона до начала его разогрева, положенная в основу научных исследований в рамках настоящей диссертации.

3. Проведен анализ величины сроков схватывания пластифицированных цементных паст добавками на основе ПКЭ, который показал правомерность выдвинутой гипотезы о возможности регулирования режимов ТВО, обусловленную коротким блокирующим действием процесса гидратации цементных систем при введении поликарбонатов.

4. Выявлено увеличение прочности при сжатии после ТВО с 6-часовым пропариванием и на 28 сутки на 7,4-12,3 %, повышение плотности на 6,6-7,7 % и снижение открытой капиллярной пористости на 24-37 % пластифицированных образцов цементного камня в сравнении с бездобавочными составами. Предложенная гипотеза о возможности снижения времени предварительной

выдержки подтверждается также тем, что прочности образцов цементного камня, твердеющих при режимах ТВО по схемам (0-6-2) ч и (2-6-2) ч на 28-е сутки практически равны, расхождение составляет 1,5-1,9 %.

5. Проведен рентгенофазовый анализ цементного камня, который показал, что при твердении в течение первых 2 часов ТВО обнаружены явные пики на рентгенограммах цементного камня с ПКЭ, соответствующие минералу $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, причем его количество вдвое больше в сравнении с модифицированным составом на основе СНФ. Наблюдается снижение содержания минералов этtringита и портландита в цементном камне с добавлением ПКЭ после ТВО, что свидетельствует о снижении напряжений в теле твердеющего цементного камня, о блокировке минералов трехкальциевого алюмината и образовании рыхлой алюминатной структуры при модифицировании цементных систем анионоактивными СП.

6. Установлено путем микрофотографирования, что сколы цементного камня в возрасте 8 часов твердения (по схеме (0-6-2) ч и в возрасте 10 часов твердения (по схеме (2-6-2) ч) имеют идентичную структуру, что допускает возможность регулирования режима ТВО для цементосодержащих систем с точки зрения ускорения темпов набора прочности и увеличения оборачиваемости опалубки.

7. Выявлено, что прочность при сжатии образцов цементно-песчаных растворов с содержанием ПКЭ в сравнении с образцом без модификаторов выше после ТВО по режиму (0-6-2) ч на 45 %, на 40 % – в возрасте 7 суток и на 20 % – в возрасте 28 суток. Набор прочности на сжатие при введении в растворы добавки типа ПКЭ составляет 71,3 % прочности бездобавочного раствора при режиме с предварительным выдерживанием в течение 2 часов, и 65,2 % без данного этапа.

8. Подтверждена возможность получения изделий ЖБИ на основе бетонов, модифицированных современными добавками на основе ПКЭ, с высокой распалубочной прочностью (до 70 % от марочной) при использовании разработанного низкотемпературного режима ТВО (весь цикл в течение 8 часов),

что способно с учетом всех технологических операций обеспечить двухсменную обрачиваемость форм.

9. Получены методом обработки результатов экспериментов факторным анализом математические модели зависимости отпускной прочности бетона на сжатие от дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора, длительности и температуры изотермического выдерживания и времени предварительной выдержки.

10. Разработаны «Рекомендации по применению низкотемпературных режимов ТВО при изготовлении сборных железобетонных изделий и конструкций». Рекомендации согласуются с действующими нормативами и сводами правил по проектированию и строительству.

11. Осуществлена производственная апробация разработанного состава бетона и режима ТВО при изготовлении железобетонных перемычек брускового типа 2ПБ 22-3П на заводе ООО «Мариэкспресс». Изделия смонтированы на объекте: «Многоквартирный жилой дом поз. 10 в микрорайоне «Мирный» г. Йошкар-Ола, 6 этап». Результаты исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ПГТУ» при подготовке бакалавров и магистров направлений 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство».

12. Разработаны сокращенные низкотемпературные режимы ТВО бетонов с использованием добавок на основе ПКЭ, обеспечивающие возможность получения пластифицированных бетонов с высокой ранней прочностью, что подтверждается выполненными экспериментальными исследованиями и положительным опытом производственного использования.

13. Перспективой дальнейшей разработки темы является изучение процесса параллельного кристаллообразования алюминатных и силикатных фаз. Практический интерес представляет исследование степени внутреннего напряжения при росте минералов различной твердости в связи с отказом от предварительного выдерживания. Данные исследования позволят оценить степень долговечности бетонов, подвергнутых ТВО без предварительного выдерживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, С.Н. Исследование влияния комплекса модификаторов на кинетику твердения бетонов / С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, А.Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2014. – № 4.
2. Анисимов, С.Н. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными добавками / С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.
3. Анисимов, С.Н. Применение суперпластификаторов в бетонах / С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы IX Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «научному прогрессу – творчество молодых» / Йошкар-Ола : ПГТУ, 2014 г. – ч.2. – С. 198-200.
4. Бабков, В.В. Рациональные области применения модифицированных бетонов в современном строительстве / В.В. Бабков, Р.Р. Сахибгареев, Г.С. Колесник [и др.] // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 20-23.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – Москва : Издательство АСВ, 2011. – 528 с.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. – Москва : Издательство АСВ, 2004. – 353 с.
7. Баженов, Ю.М. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман, Б.И. Булгаков // Вестник МГСУ. – 2012. – № 12. – С. 125-133.
8. Баранова, А.А. Модифицированный теплоизоляционный пенобетон повышенной прочности с применением микрокремнезема: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Баранова Альбина Алексеевна. – Ангарск, 2014. – 145 с.

9. Барвинюк, М.С. Термодинамический расчет температурной устойчивости этtringита / М.С. Барвинюк, П.Г. Комохов, В.Л. Шубаев // Исследование бетонов повышенной прочности, водонепроницаемости и долговечности для транспортного строительства: Труды ЛИИЖТа / Ленинград : ЛИИЖТ. – 1978. – С. 49-53.
10. Батраков, В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы / В.Г. Батраков // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 4-7.
11. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – Москва : АО «Астра семь». – 1998. – 768 с.
12. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. – Москва : Стройиздат, 1990. – 400 с.
13. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны в практике современного строительства / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, А.В. Силина // Промышленное и гражданское строительство. – 2002. – № 9. – С. 23-25.
14. Библик, М.С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М.С. Библик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 55-59.
15. Библик, М.С. Расчетно-экспериментальная методика оптимизации режима тепловлажностной обработки бетона / М.С. Библик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 31-35.
16. Библик, М.С. Длительность предварительной выдержки бетона с химическими добавками / М.С. Библик, М. Голшани, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 14-16.
17. Бруссер, М.И. Проектирование составов тяжелого и мелкозернистого бетона / М. И. Бруссер, С. А. Подмазова // Технологии бетонов. – 2017. – № 9-10 (134-135). – С. 24-28.
18. Бубело, В.В. Некоторые проблемы тепловлажностной обработки бетона / В. В. Бубело // Бетон и железобетон. – 1993. – № 6. – С. 15-17.
19. Бутт, Ю.М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю.М. Бутт, Л.Н. Рашкович. – Москва : Стройиздат, 1965. – 223 с.

20. Васильев, А.С. Эффективность добавок-ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона / А.С. Васильев, Ю.Г. Барабанщиков // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 72-78.

21. Величко, Е.Г. Строение и основные свойства строительных материалов / Е.Г. Величко. – Москва : Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2017. – 475 с.

22. Вербецкий, Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде / Г.П. Вербецкий. – Москва : Стройиздат, 1976. – 128 с.

23. Винчелл, А.Н. Оптика и микроскопия искусственных минералов / А.Н. Винчелл. – Москва : Госхимиздат, 1933. – 216 с.

24. Вовк, А.И. О некоторых особенностях применения гиперпластификаторов / А.И. Вовк // Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С. 18-19.

25. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества (технология и свойства) / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – Москва : Стройиздат, 1979. – 476 с.

26. Волосян, Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий / Л.Я. Волосян. – Минск : Наука и техника, 1973. – 255 с.

27. Гарновесов, А.П. Исследование влияния молекулярной структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов на свойства цементных композиционных материалов / А.П. Гарновесов, А.В. Журавлев, И.И. Джагарян [и др.] // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: материалы Международной научной конференции. – Москва : НИУ МГСУ, 2016. – С. 587-591.

28. Горчаков, Г.И. Повышение прочности и морозостойкости бетона / Г.И. Горчаков. – Москва : Промстройиздат, 1956. – 108 с.

29. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2020.

30. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва : Стандартинформ, 2018.

31. ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности. – Москва : Стандартиформ, 2021.
32. ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости. – Москва : Стандартиформ, 2021.
33. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2012.
34. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия (с Изменением N 1) (с Поправкой). – Москва : Стандартиформ, 2010.
35. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.
36. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии (с Изменениями N 1, 2). – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003.
37. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4). – Москва : Стандартиформ, 2018.
38. ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправками). – Москва : Стандартиформ, 2018.
39. ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой). – Москва : Стандартиформ, 2018.
40. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправкой). – М.: Стандартиформ, 2019.
41. Гусев, Б.В. Вибрационная технология бетона / Б.В. Гусев, В.Г. Зазимко, Киев : Будівельник, 1992. – 160 с.
42. Гусев, Б.В. Исследование алюмоферритной фазы портландцементного клинкера / Б.В. Гусев, И.С. Ин, Ю.Р. Кривобородов // Цемент и его применение. – 2012. – № 2. – С. 110-111.

43. Гусев, Б.В. Цементы и бетоны – тенденции развития / Б.В. Гусев, И.С. Ин, Т.В. Кузнецова. – Москва : Научный мир, 2012. – 134 с.
44. Демьянова, В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов с высокой ранней прочностью для беспрогревных и малопроевных технологий : автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.05 / Демьянова Валентина Серафимовна. – Пенза, 2002. – 42 с.
45. Демьянова, В.С. Сухие строительные смеси, модифицированные химическими добавками / В.С. Демьянова // Известия вузов. Строительство. – 1998. – № 5 (4). – С. 69-72.
46. Демьянова, В.С. Многокомпонентные быстротвердеющие бетоны с улучшенными эксплуатационными свойствами / В.С. Демьянова, И.Е. Ильина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2006. – № 3-4 (567-568). – С. 40-44.
47. Дмитриевич, А.Д. Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде / А.Д. Дмитриевич. – Москва : Стройиздат, 1967. – 242 с.
48. Добавки в бетон. Технический каталог; апрель, 2014. – Москва : Master Builders Solutions, 2014. – 162 с.
49. Добавки в бетон. Технический каталог. 4-е издание. – Building Trust Sika Solutions, 2018. – 208 с.
50. Добролюбов, Г.В. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г.В. Добролюбов, В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – Москва : Стройиздат, 1981. – 213 с.
51. Добшиц, Л.М. Морозостойкость бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения : дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.05 / Добшиц Лев Михайлович. – Москва, 2000. – 385 с.
52. Добшиц, Л.М. Пути повышения долговечности бетонов / Л.М. Добшиц // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 4-9.
53. Добшиц, Л.М. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-

5. – С. 945-948.

54. Добшиц, Л.М. Прочность жестких бетонных смесей с поликарбоксилатными пластификаторами / Л.М. Добшиц, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов, А.А. Анисимова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2020. – № 4(16). – С. 6-13.

55. Добшиц, Л.М. Влияние добавки «Макромер П11» на технологические свойства и прочность строительных растворов / Л.М. Добшиц, Р.И. Варвянский // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2013. – № 3. – С. 45-49.

56. Добшиц, Л.М. Модифицированные цементные композиции с кварцевым наполнителем / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 1-9.

57. Добшиц, Л.М. Технологические аспекты повышения эффективности применения минеральных добавок в бетонах / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов // Бетон и железобетон - взгляд в будущее: материалы III Всероссийской (II Международной) конференции. – Москва : НИУ МГСУ, 2014. – С. 39-47.

58. Добшиц, Л.М. Влияние кварцевого наполнителя и суперпластификатора Glenium® ACE 430 на раннюю прочность мелкозернистого бетона с ускорителем твердения / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-9. – С. 1901-1905.

59. Добшиц, Л.М. Исследование реологических свойств бетонных смесей для изготовления дорожных барьерных ограждений методом скользящей опалубки / Л.М. Добшиц, Н.В. Швецов // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 28 (2). – С. 67-72.

60. Дорогобид, Д.Н. Применение комплексных модифицирующих добавок и их влияние на энергосбережение при производстве строительных материалов и изделий / Д.Н. Дорогобид, И.В. Букин // Омский научный вестник. – 2010. № 3

(93). – С. 304-307.

61. Журавлева, В.П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В.П. Журавлева. – Минск : Наука и техника, 1972. – 190 с.

62. Заседателев, И.Б. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений / И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов. – Москва : Стройиздат, 1973. – 168 с.

63. Зеленковская, Ж.Л. Структурно-механическое моделирование твердения монолитного бетона с комплексными химическими добавками / Ж.Л. Зеленковская, В.В. Бабицкий // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: материалы II международной научной конференции. – Новополоцк : Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», 2020. – С. 217-225.

64. Зовойдних, Т. К вопросу о замедляющем влиянии суперпластификаторов на гидратацию трехкальциевого силиката / Т. Зовойдних, К. Рёсслер, Х.-М. Людвиг // Цемент и его применение. – 2016. – № 1. – С. 138-143.

65. Зоткин, А.Г. Определение оптимальной дозировки суперпластификатора в бетоне / А.Г. Зоткин // Технологии бетонов. – 2013. – № 3. – С. 35-39.

66. Иващенко, Ю.Г. Модифицирующее действие органических добавок на цементные композиционные материалы / Ю.Г. Иващенко, Д.К. Тимохин, А.В. Страхов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 4 (68). – С. 202-205.

67. Иващенко, Ю.Г. Органический пластификатор на основе отхода промышленности для строительных композитов / Ю.Г. Иващенко, Д.К. Тимохин, А.В. Страхов, С.А. Евстигнеев // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2013. – № 2 (27). – 7 с.

68. Изотов, В.С. Влияние добавок – ускорителей твердения на свойства тяжелого бетона / В.С., Изотов, Р.А. Ибрагимов // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 35-37.

69. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона :

монография / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – Москва : Издательство «Палеотип», 2006. – 244 с.

70. Иссерс, Ф.А. Производство бетонных и железобетонных конструкций / Ф.А. Иссерс, А.Я. Григорьев, А.И. Звездов [и др.]. – Москва : Новый век, 1998. – 384 с.

71. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 82-89.

72. Калашников, В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88-91.

73. Камалова, З.А. Суперпластификаторы в технологии изготовления композиционного бетона / З.А. Камалова, Р.З. Рахимов, Е.Ю. Ермилова, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 8. – С. 148-152.

74. Каприелов, С.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Д. Аль-Омаис, А.С. Зайцев // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 1. – С. 18-24.

75. Каприелов, С.С. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01 / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Батраков // Бетон и железобетон. – 1997. – № 5. – С. 38-41.

76. Каприелов, С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Дондуков // Строительные материалы. – 2017. № 11. – С. 4-10.

77. Касторных, Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы / Л.И. Касторных. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 221 с.

78. Касторных, Л.И. Эффективность тепловой обработки бетона с суперпластификаторами на поликарбонатной основе / Л.И. Касторных, И.В. Трищенко, А.В. Каклюгин, Д.Р. Шершень // Инженерный вестник Дона. –

2019. – № 2. – 11 с.

79. Козлова, В.К. Конверсия гидроалюминатов кальция и ее влияние на состав продуктов гидратации цементов при повышенной температуре / В.К. Козлова, А.В. Вольф, Ю.В. Карпова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2. – С. 225-229.

80. Комохов, П.Г. Структурная механика бетона и ее задачи в процессе формирования и разрушения материалов / П.Г. Комохов // Применение бетонов повышенной прочности и долговечности: Сборник трудов ЛИИЖТ. – 1983. – С. 8-13.

81. Комохов, П.Г. Модифицированный цементный бетон, его структура и свойства / П.Г. Комохов, Н.Н. Шангина // Цемент и его применение. – 2002. – № 1-2. – С. 43-36.

82. Кононова, О.В. Влияние модифицирующей добавки Hydro Protect E1 на прочность тяжелого бетона при пониженном содержании минерального вяжущего материала / О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

83. Кононова, О.В. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбонатного эфира / О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-2. – С. 259-263.

84. Кононова, О.В. Бетоны с минеральными добавками: монография / О.В. Кононова, Л.М. Добшиц. – Йошкар-Ола : ПГТУ, 2014. – 166 с.

85. Кононова, О.В. Интенсификация твердения пластифицированного бетона с добавкой доменного гранулированного шлака / О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, Н.В. Губин // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9-2. – С. 228-232.

86. Коробова, О.С. Инвентаризация выбросов парниковых газов при производстве цемента / О.С. Коробова, Т.В. Михина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. № 5. – С. 253-

265.

87. Коровкин, М.О. Эффективность суперпластификаторов и методология ее оценки: монография / М.О. Коровкин, В.И. Калашников, Н.А. Ерошкина. – Пенза : ПГУАС, 2012. – 144 с.

88. Крамар, Л.Я. Оптимизация структуры и свойств цементного камня и бетона введением тонкодисперсной добавки аморфного кремнезема : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Крамар Людмила Яковлевна. – Москва, 1989. – 17 с.

89. Крамар, Л.Я. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Т. Н. Черных [и др.] // Строительные материалы. – 2016. – № 11. – С. 21-25.

90. Кучеренко, А.А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. Проектирование и примеры расчета / А.А. Кучеренко. – Киев : Вища школа, 1977. – 280 с.

91. Лешканов, А.Ю. Влияние комплексно-модифицирующей добавки «Ускорин» на свойства цементных систем / А.Ю. Лешканов // Россия в многовекторном мире: национальная безопасность, вызовы и ответы. Двадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – Ч.2. – С. 282-283.

92. Лешканов, А.Ю. Кинетика твердения тяжелого бетона с добавками на основе поликарбоксилатных эфиров / А.Ю. Лешканов // Труды Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Технологическая. Вып. 6 / отв. и науч. ред. Д. В. Иванов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 115-120.

93. Лешканов, А.Ю. Модифицирование бетонной матрицы добавкой нового поколения Master X-SEED 100 / А.Ю. Лешканов // Россия и мир: национальная безопасность, вызовы и ответы. Двадцать первые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В. П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 216-219.

94. Лешканов, А.Ю. Обоснование рациональности применения бетона с

комплексными модификаторами на основе суперпластификатора и ускорителя твердения / А.Ю. Лешканов // Стратегии развития региона на основе модернизации приоритетных отраслей его экономики [Электронный ресурс]: материалы II Междун. научно-практич. конф. (Йошкар-Ола, 11-12 мая 2018 г.) / отв. ред. В. В. Двоеглазов. – Электрон. дан. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 96-101.

95. Лешканов, А.Ю. Структурообразование бетонов модифицированием суперпластифицирующими добавками компании BASF / А.Ю. Лешканов, О.В. Кононова / Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XIII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018 – Ч. 4., С. 143-145.

96. Лешканов, А.Ю. Оптимизация процесса твердения цементного камня / А.Ю. Лешканов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, А.О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

97. Лешканов, А.Ю. Исследование совершенствования модификации бетона: от извести и гипса до эфиров полиарила / А.Ю. Лешканов, О.В. Кононова // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы III Всероссийской студенческой конференции в 8 ч. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – Ч. 5., С. 48-49.

98. Лешканов, А.Ю. Инновационные технологии и материалы в сфере строительства на примере бетона / А.Ю. Лешканов, Г.В. Красильникова // Стратегии развития региона на основе модернизации приоритетных отраслей его экономики: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. Ю.С. Андрианова. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 73-77.

99. Лешканов, А.Ю. Процесс внедрения инновационных материалов в строительной сфере / А.Ю. Лешканов, Г.В. Красильникова // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики регионов России

[Электронный ресурс]: материалы IV Международной научно-практической конференции молодых преподавателей, аспирантов и студентов (Йошкар-Ола, 28-29 декабря 2016 г.) / под общ. ред. В. В. Двоеглазова. – Электрон. дан. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – С. 32-36.

100. Лешканов, А.Ю. Исследование зависимости сроков схватывания цементных паст от показателей ранней прочности мелкозернистых бетонов, модифицированных ускорителями твердения / А.Ю. Лешканов, М.Г. Салихов, С.Н. Анисимов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XIV международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. – Ч. 4., С. 120-123.

101. Лешканов, А.Ю. Влияние пластифицирующей добавки Hydro Protect E1 на раннюю прочность тяжелого бетона / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Материалы X Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам, Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015 г. – ч.2. – С. 281-283.

102. Лешканов, А.Ю. Модифицирование бетонных смесей ускорителями твердения / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XII международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017 – Ч. 4. – С. 94-96.

103. Лешканов, А.Ю. Проблемы маркетингового продвижения химических добавок бетонов иностранного и отечественного производства / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики регионов России: материалы V Международной научно-практической конференции молодых преподавателей, аспирантов и студентов, Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 49-54.

104. Лешканов, А.Ю. Влияние применения комплексной модифицирующей добавки «МЛ-У» на прочность цементных растворов / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова // Девятнадцатые Вавиловские

чтения: материалы постоянно действующей международной междисциплинарной научной конференции / под общ. ред. В. П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 269-271.

105. Лешканов, А.Ю. Влияние суперпластификаторов на кинетику схватывания цементных паст / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова // Восемнадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 175-177.

106. Лешканов, А.Ю. Оценка эффективности использования суперпластификаторов в структуре современных бетонов / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы II Всероссийской студенческой конференции в 8 ч. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 47-50.

107. Лешканов, А.Ю. Формирование структуры бетона с комплексными модифицирующими добавками: проблемы и пути решения / А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – Ч. 4., С. 193-195.

108. Макаричев, Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Н.Б. Иванников. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

109. Максимова, И.Н. Анализ влияния суперпластификатора на фазовый состав и параметры структурной механики разрушения цементного камня разного возраста / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 5 (689). – С. 29-38.

110. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н.Б. Марьямов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 272 с.

111. Минаков, Ю.А. Влияние комплекса химических модификаторов и мелкодисперсного наполнителя на раннюю прочность растворной смеси / Ю.А. Минаков, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2014. – № 6.

112. Минаков, Ю.А. Теплофизические основы и технологические режимы управляемого метода тепловой обработки бетона с применением низковольтных термоактивных опалубочных систем / Ю.А. Минаков, Л.П. Мотовилова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2018. – № 1(5). – С. 84-89.

113. Минаков, Ю.А. Пластифицированные малоцементные бетоны с добавкой микрокремнезема / Ю.А. Минаков, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

114. Миронов, С.А. Вопросы общей технологии и ускорения твердения бетона / С.А. Миронов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 223 с.

115. Миронов, С.А. Твердение на морозе бетона с добавкой поташа / С.А. Миронов, Б.А. Крылов, Е.Н. Ухов // Бетон и железобетон. –1962. – № 11. – С. 483-487.

116. Миронов С.А. О структуре и прочности бетона, подвергнутого пропариванию / С.А. Миронов, Л.А. Малинина. – Москва : Стройиздат, 1966. – 366 с.

117. Миронов, С.А. Ускорение твердения бетона / С.А. Миронов, Л.А. Малинина. – Москва : Стройиздат, 1964. – 347 с.

118. Миронов, С.А. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С.А. Миронов, И.М. Френкель, Л.А. Малинина. – Москва : Стройиздат, 1973. –96 с.

119. Монтянова, А.Н. Специфические особенности и эффективность применения добавок в закладочных смесях / А.Н. Монтянова, М.С. Гаркави,

Н.С. Косова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 9. – 9 с.

120. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – Москва : Стройиздат, 1988. – 304 с.

121. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона (ОНТП-07-85). – Москва : Минстройматериалов СССР, 1986. – 51 с.

122. Панфилова, М.И. Вспененные инъекционные растворы в строительстве / М.И. Панфилова, М.В. Фомина, Н.И. Зубарев. – Москва : МГСУ, 2015. – 128 с.

123. Патент РФ № 2028283. Способ управления тепловой обработкой бетонных и железобетонных изделий. Авторы: Соловьянчик А.Р., Малинский В.Е. // Бюл. изобр. – 1995.

124. Патент РФ № 2220119. Суперпластифицирующая добавка. Авторы: Бабушкин В.И., Кондращенко Е.В., Кондращенко В.И., Шубин В.В. // Бюл. изобр. – 2003. – № 36.

125. Патент РФ № 2308429. Комплексная добавка для бетонных и растворных смесей. Авторы: Добшиц, Л.М., Федун, В.В., Круглов, В.М. // Бюл. изобр. – 2007. – № 29.

126. Патент РФ № 2603991. Мелкозернистая самоуплотняющаяся бетонная смесь. Авторы: Кононова О.В., Анисимов С.Н., Лешканов А.Ю., Смирнов А.О. // Бюл. изобр. – 2016. – № 34.

127. Перфилов, В.А. Бетон для строительства подводных нефтегазовых сооружений / В.А. Перфилов, В.В. Габова, С.В. Лукьяница // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11(71). – С. 313-320.

128. Перфилов, В.А. Влияние суперпластификаторов на свойства фибробетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2015. – № 1(37). – 5 с.

129. Перфилов, В.А. Влияние микроармирующих волокон и пластифицирующих добавок на свойства мелкозернистых бетонов / В.А. Перфилов, А.В. Котляревская, У.В. Канавец // Вестник Волгоградского

государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 44-2(63). – С. 111-118.

130. Петрова, Т.М. Использование высокоэффективных добавок при производстве железобетонных подрельсовых конструкций / Т.М. Петрова, Е.В. Иванова // Рациональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве: материалы международной научно-практической конференции. – Белгород : БГТАСМ, 2002. – С. 149-152.

131. Петрова, Т.М. Ресурсосбережение при производстве высокопрочного бетона подрельсовых конструкций / Т.М. Петрова, О.М. Смирнова // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2017. – № 8. – С. 140-143.

132. Петрова, Т.М. Современные модифицирующие добавки для производства сборного бетона и железобетона / Т.М. Петрова, О.М. Смирнова // Известия ПГУПС. – 2010. – № 4. – С. 203-212.

133. Петрунин, С.Ю. Исследование эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона / С.Ю. Петрунин, Н.П. Короткова, В.Н. Тарасов [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 11. – С. 84-88.

134. Подольский, В.И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика / В.И. Подольский. – Москва : Интекст, 2007. – 151 с.

135. Пособие к СНиП 3.09.01-85 Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий. – Москва : Стройиздат, 1989. – 48 с.

136. Пособие по технологии формования железобетонных изделий (к СНиП 3.09.01-85) / Б.В. Гусев, Е.З. Аксельрод, А.И. Звездов [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1988. – 112 с.

137. Протопопов, А.В. Лабораторный практикум по коллоидной химии: Методическое пособие / А.В. Протопопов, Н.Г. Комарова. – Барнаул : Издательство АлтГТУ, 2014. – 56 с.

138. Пухаренко, Ю.В. Роль комплексных добавок в получении долговечных цементных композитов [Электронный ресурс] / Ю.В. Пухаренко, В.Д. Староверов // Научный электронный архив. – 2012. – Режим доступа: <http://econf.rae.ru/article/6987>.

139. Рамачандран, В.С. Добавки в бетон: справочное пособие / В.С. Рамачандран. – Москва : Стройиздат, 1984. – 571 с.

140. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – Москва : Стройиздат, 1989. – 186 с.

141. Рахимбаев, Ш.М. Об эффективности действия суперпластификаторов в мелкозернистых бетонах в зависимости от вида мелкого заполнителя / Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Тольпина, Е.Н. Карпачева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 3. – С. 60-63.

142. Ребиндер, П.А. Физико-механические основы гидратационного твердения вяжущих веществ / П.А. Ребиндер, Е.Е. Сегалова, Е.А. Алинина, Е.Н. Андреева // Материалы шестого международного конгресса по химии цемента «Гидратация и твердение цемента». – Москва : Стройиздат, 1976. – С. 80-94.

143. Рекомендации по применению добавок суперпластификаторов в производстве сборного и монолитного железобетона. – Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 97 с.

144. Рояк, С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. – Москва : Стройиздат, 1983. – 279 с.

145. Руденко, Н.Н. Особенности процесса структурообразования активированной цементной матрицы бетона / Н.Н. Руденко, Д.В. Руденко, В.В. Пунагин // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2004. № 3. – С. 150-153.

146. Руководство по применению химических добавок к бетону. – Москва : Стройиздат, 1980. – 55 с.

147. Селяев, В.П. Полимербетоны / В.П. Селяев, Ю.Г. Иващенко, Т.А. Низина (Минеева). – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2016. – 284 с.

148. Серенко, А.Ф. Беспропарочная технология бетона с учетом аномальных свойств пластифицированных цементных систем: дисс. ... докт. техн. наук.: 05.23.05 / Серенко Андрей Федорович. – Санкт-Петербург, 2009. – 340 с.

149. Серенко, А.Ф. О совершенствовании технологии производства железобетонных шпал // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. № 1. – С. 107-111.

150. Серенко, А.Ф. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций: монография / А.Ф. Серенко, Т.М. Петрова. – Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 136 с.

151. Серенко, А.Ф. Принципы выбора комплексных добавок для беспропарочной технологии производства бетона и железобетона / А.Ф. Серенко, Т.М. Петрова, М.И. Милачев // Строительные материалы. – 2007. – № 10. – С. 62-63.

152. Серия 1.038.1-1 Выпуск 1. Перемычки брусковые для жилых и общественных зданий. Рабочие чертежи. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 99 с.

153. Синайко, Н.П. Новые бетоны самоуплотняющегося типа. Добавки Relaporm и средства испытаний / Н.П. Синайко // Будівельні матеріали, вироби та санітарнотехніка. – 2011. – № 39. – С. 97-98.

154. Сленьков, В.А. Эффективность применения пластифицирующих добавок в производстве тяжелого бетона / В.А. Сленьков, Ю.А. Минаков, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.

155. Смирнов, А.О. Влияние комплексной добавки «Полипласт Р» на прочность цементно-песчаных растворов / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Девятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей

международной междисциплинарной научной конференции / под общ. ред. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 287-288.

156. Смирнов, А.О. Структурообразование бетонов с органоминеральными добавками / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016 – Ч. 4. – С. 209-212.

157. Смирнов, А.О. Формирование ранней прочности бетона с модификаторами GLENIUM®ACE и Кратасол / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы X Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015 г. – ч.2. – С. 297-298.

158. Смирнов, А.О. Влияние микрокремнезема на твердение бетона с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора / А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов, С.Н. Анисимов, О.В. Кононова // Материалы международной междисциплинарной научной конференции XVIII-ые Вавиловские чтения / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 189-191.

159. СП 130.13330.2018 Производство сборных железобетонных конструкций и изделий. Актуализированная версия СНиП 3.09.01-85. – Москва : Стандартиформ, 2019.

160. Стенечкина, К.С. Кинетика твердения бетонов, легированных наномодификаторами / К.С. Стенечкина, Л.А. Алимов, О.В. Александрова // Научное обозрение. – 2015. – № 14. – С. 181-186.

161. Тарасов, В.Н. Оценка эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона / В.Н. Тарасов, Б.В. Гусев, С.Ю. Петрунин [и др.] // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – № 1. – С. 29-40.

162. Тейлор, Х. Химия Цементы. Пер. с англ. / Х. Тейлор, Москва : Мир, 1966. – 560 с.

163. Техническое описание продукта Sika® ViscoCrete® 24 HE

[Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/8/sika_viscocrete_-24he.pdf.

164. Торопова, М.В. Влияние тепловлажностной обработки на структурообразование и эксплуатационные свойства бетона : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Торопова Мария Владиевна. – Иваново, 2002. – 130 с.

165. Трофимов, Б.Я. Направленное формирование стойкой структуры цементного камня / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар, К.В. Шулдяков // Материалы 72-ой научной конференции «Наука ЮУрГУ. Секции технических наук». – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – С. 68-73.

166. Труды международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. – Москва : Стройиздат, 1968. – 400 с.

167. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоноведение: лексикон / А.В. Ушеров-Маршак. – Москва : ООО РИФ «Стройматериалы», 2010. – 110 с.

168. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками // А. В. Ушеров-Маршак / Бетон и железобетон. – 2011. № 1. – С. 78-81.

169. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. № 10. – С. 8-12.

170. Фаликман, В.Р. Поликарбосилатные гиперпластификаторы : вчера, сегодня, завтра / В.Р. Фаликман // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2 (28) – С. 86-90.

171. Фаликман, В.Р. «Простор за пределом», или как нанотехнологии могут изменить мир бетона / В.Р. Фаликман, К.Г. Соболев // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – № 1. – С. 21-33.

172. Фахратов, М.А. Тепловая обработка цементно-песчаных бетонов с добавкой пластификатора «10-04» / М.А. Фахратов, А.А. Комар, С.М. Матъязов // Тезисы докладов респ. научно-технич. совещания "Интенсификация производства и повышение качества сборных железобетонных изделий". – Бухара, 1984. – С. 68-72.

173. Федосов, С.В. Электротепловая обработка бетона токами повышенной

частоты на предприятиях сборного железобетона : монография / С.В. Федосов, В.И. Бобылёв, А.М. Соколов. – Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2016. – 335 с.

174. Хигерович, М.И. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов / М.И. Хигерович, В.Е. Байер. – Москва : Стройиздат, 1979. – 126 с.

175. Хицков, А.А Влияние различных глинистых частиц на эффективность поликарбоксилатного суперпластификатора и свойства цементного камня / А.А. Хицков, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар [и др.] // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Строительство И Архитектура. – 2019. – № 1 (19). – С. 40-51.

176. Шейкин, А.Е. Структура прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин. – Москва : Стройиздат, 1974. – 191 с.

177. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Москва : Стройиздат, 1989. – 127 с.

178. Шейнфельд, А.В. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами / А.В. Шейнфельд, С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Градостроительство и архитектура. – 2017. № 1 (26). – С. 58-63.

179. Шулдяков, К.В. Исследование влияния тепловлажностной обработки на свойства высокопрочного дорожного бетона с добавкой поликарбоксилатного пластификатора / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар // Материалы 65-ой научной конференции «Наука ЮУрГУ». – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 138-141.

180. Шулдяков, К.В. Структура и свойства цементного камня с модификаторами / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, А.М. Махмудов // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Строительство и Архитектура. – 2020. – № 2 (20). – С. 54-64.

181. Эльдыкова, В.Н. Исследование совершенствования свойств искусственного камня – бетона / В.Н. Эльдыкова, А.Ю. Лешканов // Материалы V

Поволжского научно-образовательного форума. – Йошкар-Ола : ПГТУ, 2017. – С. 275-276.

182. Юхневский, П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П.И. Юхневский. – Минск : БНТУ, 2013. – 310 с.

183. Al-Ani, S.H. The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather / S.H. Al-Ani, M.A. Al-Zaiwary // *Materials and Structures*. – 1988. – № 3 (21). – P. 205-212.

184. Anisimov, S. Self-compacting fine-grained concrete for reinforced concrete frame joints filling / S. Anisimov, O. Kononova / *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – 8 p.

185. Asatov, N. Parameters of heat treatment increased concrete strength at its watertightness / N. Asatov, M. Tillayev, N. Raxmonov // *EDP Sciences*. – 2019. – 9 p.

186. Becker, S. Particle interactions in silica systems in presence of superplasticizer / S. Becker, Z. Lu, S. Leinitz [et al.] // *RILEM Bookseries*. – 2020. – № 23. – P. 571-579.

187. Bessaies-Bey, H. Polycarboxylate ester adsorption on cement grains: Influence of polydispersity / H. Bessaies-Bey, N. Massoussi, S. Mulik [et al.] // *Cement and Concrete Research*. 2021. – № 143. – 10 p.

188. Cao, W. A novel low-density thermal insulation gypsum reinforced with superplasticizers / W. Cao, W. Yi, S. Yin [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 278. – P. 1-11.

189. Deogekar, P. Influence of steam curing cycle on compressive strength of concrete / P. Deogekar, A. Jain, S. Mishra, P. Nanthagopalan // *International Journal of construction materials and structures*. – 2013. – № 1. – P. 18-28.

190. Duan, G. A study of supermolecular polarization of comb-like polycarboxylate admixtures synthesized with polyoxyethylene macromolecules / G. Duan, G. Huang, A. Li [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2012. – № 174. – P. 129-134.

191. Falikman, V.R. Polycarboxylated hyperplasticizers: yesterday, today, tomorrow / V.R. Falikman // *Popular Concrete Science*. – 2009. – № 2. – P. 88-92.

192. Fan, W. A new class of organosilane-modified polycarboxylate superplasticizers with low sulfate sensitivity / W. Fan, F. Stoffelbach, J. Rieger [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – № 1 (42). – P. 166-172.

193. Franco de Carvalho, J.M. Influence of high-charge and low-charge PCE-based superplasticizers on Portland cement pastes containing particle-size designed recycled mineral admixtures / J.M. Franco de Carvalho, W. Schmidt, H.C. Kühne, R.A.F. Peixoto // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – № 32. – 14 p.

194. Ghosh, R.S. Use of Superplasticizers as Water Reducers / R.S. Ghosh, V.M. Malhotra // *Cement, Concrete and Aggregates*. – 1979. – № 2 (1). – P. 56-63.

195. Gourley, J.T. The accelerated steam curing of thin section precast concrete products / J.T. Gourley // *Proc. of Fourth canmet/aci international conference on durability of concrete*. – Sydney, Australia. – 1997. – P. 549-563.

196. Hanson, J.A. Optimum steam curing procedure in pre-casting plants / J. A. Hanson // *ACI Journal*. – 1963. – № 60. – P. 75-100.

197. Heinz, D. Schädigende Bildung ettringitähnlicher Phasen in warmebehandelten Mörteln und Betonen / D. Heinz // *Diss. RWTH: Aachen*. – 1986.

198. Ibragimov, R. Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers / R. Ibragimov, R. Fediuk // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. – P. 839-848.

199. Johansen, V. Simultaneous presence of alkali–silica gel and ettringite in concrete / V. Johansen, N. Thaulow, J. Skalny // *Advances in Cement Research*. – 1993. – № 17 (5). – P. 23-29.

200. Khuzin, A. Processes of structure formation and paste matrix hydration with multilayer carbon nanotubes additives / A. Khuzin, R. Ibragimov // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 35. – P. 1-9.

201. Kirchheim, A.P. Analysis of cubic and orthorhombic C3A hydration in presence of gypsum and lime / A.P. Kirchheim, V. Fernández-Altable, P.J.M. Monteiro [et al.]. – Text : electronic // *Journal of Materials Science*. – 2009. – № 8 (44). – P. 2038-2045.

202. Klieger, P. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials / P. Klieger, J.F. Lamond // Philadelphia : ASTM. – 1994. – 623 p.

203. Leshkanov, A.Y. Influence of presteaming period and curing temperature on the plasticized concrete strength / A.Y. Leshkanov, L.M. Dobshits, S.N. Anisimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012094.

204. Leshkanov, A. Structure formation of plasticized cement systems under heat-moisture treatment / A. Leshkanov, L. Dobshits, S. Anisimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869. – 032038. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032038.

205. Li, S. Synthesis and performance of a novel amphoteric polycarboxylate superplasticizer with hydrolysable ester group / S. Li, H. Pang, J. Zhang [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2019. – Vol. 564. – P. 78-88.

206. Liao, T.S. Effects of a carboxylic acid/sulfonic acid copolymer on the material properties of cementitious materials / T.S. Liao, C.L. Hwang, Y.S. Ye, K.C. Hsu // Cement and Concrete Research. – 2006. – № 4 (36). – P. 650-655.

207. Liu, M. The application of thermal analysis to study the hydration behavior of tricalcium aluminate-gypsum in the presence of polycarboxylate-based superplasticizers / M. Liu, Y. Gao, L. Zhang [et al.] // Thermochemica Acta. – 2021. – Vol. 696. – P. 1-7.

208. Liu, X. Synthesis, characterization and performance of a polycarboxylate superplasticizer with amide structure / X. Liu, Z. Wang, J. Zhu [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2014. – № 1 (448). – P. 119-129

209. Ludwig, U. Einflüsse auf die Schadreaktion in wärmebehandelten Betonen / U. Ludwig, D. Heinz // Festschrift Baustoffe Aachen. – 1985. – P. 105-110.

210. Mamillan, M. Recherches experimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage / M. Mamillan // Annalis de IITBTP, Mars. – 1970.

211. Memon, N.A. Effect of the curing conditions and superplasticizer on

compressive strength of concrete exposed to high ambient temperature of Nawabshah, Pakistan / N.A. Memon, F.R. Abro, U. Memon, S.R. Sumadi // *International Journal of Engineering Research*. – 2014. – № 7 (3). – P. 462-464.

212. Merritt, R.R. Steam curing of portland cement concrete at atmospheric pressure. Project HR-40 of the Iowa Highway Research Board / R.R. Merritt, J.W. Johnson. – Ames Iowa, 1962.

213. Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength; German version EN 196-1:2016. – 2016. – 36 p.

214. Mironov, S.A. Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening / S.A. Mironov // *Proc. of Symposium on structure of portland cement paste and concrete*. – Washington. – 1966. – P. 465-474.

215. Neville, A.M. Properties of concrete / A.M. Neville. – Trans-Atlantic Publications, Inc. – 2012. – 872 p.

216. Neville, A.M. Concrete Technology, Longman Scientific and Technical / A.M. Neville, J. J. Brooks. – New York, 1987. – 844 p.

217. Niu, M. Influence of naphthalene sulphonated and polycarboxylate acid-based superplasticizer on the mechanical properties and hydration behavior of ternary binder: A comparative study / M. Niu, G. Li, Q. Li, G. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 312. – P. 1-10.

218. Odler, I. On the delayed expansion of heat cured Portland cement pastes and concretes / I. Odler, Y. Chen // *Cement and Concrete Composites*. – 1996. – № 3 (18). – P. 181-185.

219. Okamura, H. Self-Compacting Concrete / H. Okamura, M. Ouchi // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2003. – № 1 (1). – P. 5-15.

220. Ouchi, M. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States / M. Ouchi, S. Nakamura, T. Osterberg, M. Lwin / *Proc. of the 3rd PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*. – Orlando, Florida, USA. – 2003. – P. 1-20.

221. Petit, J.Y. Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar / J.Y. Petit, K.H. Khayat, E. Wirquin // *Cement and*

Concrete Research. – 2006. – № 5 (36). – P. 832-841.

222. Petit, J. Y. Effect of temperature on the rheology of flowable mortars / J.Y. Petit, E. Wirquin, K.H. Khayat // Cement and Concrete Composites. – 2010. – № 1 (32). – P. 43-53.

223. Plank, J. Preparation and characterization of new Ca-Al-polycarboxylate layered double hydroxides / J. Plank, Z. Dai, P.R. Andres // Materials Letters. – 2006. – № 29-30 (60). – P. 3614-3617.

224. Plank, J. Intercalation of polycarboxylate superplasticizers into C₃A hydrate phases / J. Plank, Z. Dai, N. Zouaoui, D. Vlad / Proc. of the Eighth CANMET/ACI Conference on Superplasticizers in Concrete. – Sorrento. – 2006. – P. 201–214.

225. Plank, J. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption / J. Plank, C. Hirsch // Cement and Concrete Research. – 2007. – № 4 (37). – P. 537-542.

226. Plank, J. Novel organo-mineral phases obtained by intercalation of maleic anhydride-allyl ether copolymers into layered calcium aluminum hydrates / J. Plank, H. Keller, P.R. Andres, Z. Dai // Inorganica Chimica Acta. – 2006. – № 15 (359). – P. 4901-4908.

227. Plank, J. Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behaviour and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers / J. Plank, B. Sachsenhauser, J. Reese // Cement and Concrete Research. – 2010. – № 5 (40). – P. 699-709.

228. Ramachandran, V.S. Concrete Admixtures Handbook / V.S. Ramachandran. – NJ : Noyes Publications, 1995. – 1153 p.

229. Ramezaniapour, A.A. Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete / A.A. Ramezaniapour, M.H. Khazali, P. Vosoughi // Construction and Building Materials. – 2013. – № 49. – P. 807-813.

230. Ramírez, A. The effect of a polycarboxylate ether on C₃A / CaSO₄•2H₂O passivation monitored by optical spectroscopy / A. Ramírez, J. Pauli, C. Crasselt [et al.] // Construction and Building Materials. – 2021. – № 270. – P. 1-8.

231. Regnaud, L. Changes in cement paste and mortar fluidity after mixing induced by PCP: A parametric study / L. Regnaud, A. Nonat, S. Pourche, B. Pellerin // Proc. of the 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. – Sorrento. – 2006. – P. 389-408.

232. Rixom, R. Chemical Admixtures for concrete / R. Rixom, N. Mailvaganam. – London : E & F Spon books. – 2000. – 464 p.

233. Rößler, C. Influence of hydration on the fluidity of normal Portland cement pastes / C. Rößler, A. Eberhardt, H. Kučerová, B. Möser // Cement and Concrete Research. – 2008. – № 7 (38). – P. 897-906.

234. Schmid, M. Dispersing performance of different kinds of polycarboxylate (PCE) superplasticizers in cement blended with a calcined clay / M. Schmid, J. Plank // Construction and Building Materials. – 2020. – № 258. – 11 p.

235. Schmidt, W. Design concepts for the robustness improvement of self-compacting concrete : effects of admixtures and mixture components on the rheology and early hydration at varying temperatures / W. Schmidt. – The Netherlands : PhD Thesis, Eindhoven University of Technology. – 2014. – 308 p.

236. Schmidt, W. Influence of the processing temperature and combined admixtures on the properties of Self-Compacting Concrete / W. Schmidt // Proc. of the 7th International PhD Symposium in Civil Engineering. – Stuttgart. – 2008. – P. 75-84.

237. Schmidt, W. Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures / W. Schmidt, H. J.H. Brouwers, H.C. Kühne, B. Meng // Cement and Concrete Composites. – 2014. – № 49. – P. 111-126.

238. Schmidt, W. Influence of temperature on stabilizing agents in presence of superplasticizers / W. Schmidt, H.C. Kühne, H.J.H. Brouwers, B. Meng // Proc. of the Tenth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – Prague, Czech Republic. – 2012. – 15 p.

239. Shah, S.N.R. Behaviour of Normal Concrete Using Superplasticizer under Different Curing Regimes / S.N.R. Shah, M. Aslam, S.A. Shah, R. Oad // Pak. J. Engg. & Appl. Sci. – 2014. – № 15. – P. 87-94.

240. Smirnova, O.M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers / O.M. Smirnova // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 2(102). – P. 1-10. – DOI 10.34910/MCE.102.13.

241. Stark, J. Delayed Ettringite Formation in Concrete / J. Stark, K. Bollmann // Proc. of the NCR – Research Projects. – Reykjavik. – 1999. – P. 325-350.

242. Tian, H. Effects of polycarboxylate superplasticizers on fluidity and early hydration in sulfoaluminate cement system / H. Tian, X. Kong, Y. Cui [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 228. – P. 1-12.

243. Wieker, W. Zu einigen Problemen der Chemie des Portlandzements / W. Wieker, R. Herr // Zeitschrift für Chemie. – 1989. – № 9 (29). – P. 321-327.

244. Winnefeld, F. Ettringite-superplasticizer interaction and its impact on the ettringite distribution in cement suspensions / F. Winnefeld, A. Zingg, L. Holzer, J. Pakusch. – Text : electronic // 9th ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – Sevilla, Spain, 2009. – P. 1-17.

245. Yamada, K. A Summary of Important Characteristics of Cement and Superplasticizers / K. Yamada // Proc. of 9th ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – Seville, Spain. – 2009. – P. 153-164.

246. Yamada, K. Combined effect of cement characteristics on the performance of superplasticizers. An investigation in real cement plants / K. Yamada, C. B. Kim, K. Ichitsubo, M. Ichikawa // Proc. of the 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – Sorrento, Italy. – 2006. – P. 159-174.

247. Yamada, K. Working mechanism of poly-beta-naphthalene sulfonate and polycarboxylate superplasticizer types from point of cement paste characteristics / K. Yamada, S. Ogawa, S. Hanehara // Proc. of the 6th CANMET/ACI Int. Conf.on Superplasticizers. – Nice, France. – 2000. – Vol. 195. – P. 351-366.

248. Yamada, K. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer / K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara, M. Matsuhisa // Cement and Concrete Research. – 2000. – № 2 (30). – P. 197-207.

249. Yamada, K. Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete / K. Yamada, T. Yanagisawa, S. Hanehara // Proc. of the 1st international symposium on self-compacting concrete. – Stockholm : RILEM. – 1999. – P. 437-438.

250. Yoshioka, K. Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete / K. Yoshioka, E. Sakai, M. Daimon, A. Kitahara // Journal of the American Ceramic Society. – 2005. – № 10 (80). – P. 2667-2671.

251. Yu, Z. Delayed ettringite formation in fly ash concrete under moist curing conditions / Z. Yu, J. Ma, H. Shi [et al.] // International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2016. – Purdue University. – 2016. – P. 171-173.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1

Формирование распалубочной прочности тяжелого бетона, модифицированного суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE при различных режимах ТВО (вариабельные значения времени и температуры изотермического прогрева) без предварительного выдерживания

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
1	350	1200	780	154,5	0,4	6 (0+4+2)	40	Y ₁	11,0
								Y ₂	10,1
								Y ₃	11,0
								Y_{средн.}	10,6
2	350	1200	780	145,5	1,2	6 (0+4+2)	40	Y ₁	6,8
								Y ₂	6,5
								Y ₃	7,1
								Y_{средн.}	6,8
3	350	1200	780	140,0	2,0	6 (0+4+2)	40	Y ₁	4,2
								Y ₂	4,5
								Y ₃	3,9
								Y_{средн.}	4,2
4	350	1200	780	154,5	0,4	8 (0+6+2)	40	Y ₁	12,6
								Y ₂	13,4
								Y ₃	13,0
								Y_{средн.}	13,0
5	350	1200	780	145,5	1,2	8 (0+6+2)	40	Y ₁	10,6
								Y ₂	10,1
								Y ₃	10,5
								Y_{средн.}	10,4
6	350	1200	780	140,0	2,0	8 (0+6+2)	40	Y ₁	8,6
								Y ₂	9,0
								Y ₃	8,8
								Y_{средн.}	8,8

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
7	350	1200	780	154,5	0,4	10 (0+8+2)	40	Y ₁	16,1
								Y ₂	16,4
								Y ₃	16,7
								Y_{средн.}	16,4
8	350	1200	780	145,5	1,2	10 (0+8+2)	40	Y ₁	13,9
								Y ₂	14,4
								Y ₃	14,6
								Y_{средн.}	14,3
9	350	1200	780	140,0	2,0	10 (0+8+2)	40	Y ₁	13,5
								Y ₂	13,8
								Y ₃	14,1
								Y_{средн.}	13,8
10	350	1200	780	172,7	-	6 (0+4+2)	40	Y ₁	5,8
								Y ₂	5,4
								Y ₃	5,6
								Y_{средн.}	5,6
11	350	1200	780	172,7	-	8 (0+6+2)	40	Y ₁	8,2
								Y ₂	9,1
								Y ₃	8,8
								Y_{средн.}	8,7
12	350	1200	780	172,7	-	10 (0+8+2)	40	Y ₁	12,5
								Y ₂	11,8
								Y ₃	11,4
								Y_{средн.}	11,9
1a	350	1200	780	154,5	0,4	6 (0+4+2)	60	Y ₁	13,7
								Y ₂	12,9
								Y ₃	14,5
								Y_{средн.}	13,7
2a	350	1200	780	145,5	1,2	6 (0+4+2)	60	Y ₁	10,4
								Y ₂	10,7
								Y ₃	11,0
								Y_{средн.}	10,7
3a	350	1200	780	140,0	2,0	6 (0+4+2)	60	Y ₁	7,3
								Y ₂	7,9
								Y ₃	7,6
								Y_{средн.}	7,6

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
4а	350	1200	780	154,5	0,4	8 (0+6+2)	60	Y ₁	19,3
								Y ₂	18,5
								Y ₃	18,0
								Y_{средн.}	18,6
5а	350	1200	780	145,5	1,2	8 (0+6+2)	60	Y ₁	15,0
								Y ₂	15,8
								Y ₃	16,6
								Y_{средн.}	15,8
6а	350	1200	780	140,0	2,0	8 (0+6+2)	60	Y ₁	13,5
								Y ₂	13,7
								Y ₃	13,3
								Y_{средн.}	13,5
7а	350	1200	780	154,5	0,4	10 (0+8+2)	60	Y ₁	21,9
								Y ₂	22,7
								Y ₃	22,9
								Y_{средн.}	22,5
8а	350	1200	780	145,5	1,2	10 (0+8+2)	60	Y ₁	20,0
								Y ₂	20,7
								Y ₃	21,7
								Y_{средн.}	20,8
9а	350	1200	780	140,0	2,0	10 (0+8+2)	60	Y ₁	20,0
								Y ₂	21,0
								Y ₃	19,5
								Y_{средн.}	20,2
10а	350	1200	780	172,7	-	6 (0+4+2)	60	Y ₁	10,6
								Y ₂	10,7
								Y ₃	11,1
								Y_{средн.}	10,8
11а	350	1200	780	172,7	-	8 (0+6+2)	60	Y ₁	13,7
								Y ₂	14,6
								Y ₃	15,4
								Y_{средн.}	14,6
12а	350	1200	780	172,7	-	10 (0+8+2)	60	Y ₁	18,4
								Y ₂	18,9
								Y ₃	19,7
								Y_{средн.}	19,0

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
16	350	1200	780	154,5	0,4	6 (0+4+2)	80	Y ₁	18,1
								Y ₂	18,9
								Y ₃	19,4
								Y_{средн.}	18,8
26	350	1200	780	145,5	1,2	6 (0+4+2)	80	Y ₁	13,0
								Y ₂	13,9
								Y ₃	14,8
								Y_{средн.}	13,9
36	350	1200	780	140,0	2,0	6 (0+4+2)	80	Y ₁	11,4
								Y ₂	12,5
								Y ₃	11,9
								Y_{средн.}	11,9
46	350	1200	780	154,5	0,4	8 (0+6+2)	80	Y ₁	25,5
								Y ₂	23,7
								Y ₃	24,3
								Y_{средн.}	24,5
56	350	1200	780	145,5	1,2	8 (0+6+2)	80	Y ₁	19,3
								Y ₂	19,7
								Y ₃	20,7
								Y_{средн.}	19,9
66	350	1200	780	140,0	2,0	8 (0+6+2)	80	Y ₁	18,3
								Y ₂	18,5
								Y ₃	18,7
								Y_{средн.}	18,5
76	350	1200	780	154,5	0,4	10 (0+8+2)	80	Y ₁	31,2
								Y ₂	30,1
								Y ₃	29,0
								Y_{средн.}	30,1
86	350	1200	780	145,5	1,2	10 (0+8+2)	80	Y ₁	25,4
								Y ₂	26,5
								Y ₃	27,3
								Y_{средн.}	26,4
96	350	1200	780	140,0	2,0	10 (0+8+2)	80	Y ₁	25,0
								Y ₂	25,9
								Y ₃	24,2
								Y_{средн.}	25,0

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
106	350	1200	780	172,7	-	6 (0+4+2)	80	Y ₁	17,1
								Y ₂	16,4
								Y ₃	17,5
								Y_{средн.}	17,0
116	350	1200	780	172,7	-	8 (0+6+2)	80	Y ₁	20,2
								Y ₂	20,4
								Y ₃	20,9
								Y_{средн.}	20,5
126	350	1200	780	172,7	-	10 (0+8+2)	80	Y ₁	24,1
								Y ₂	24,7
								Y ₃	25,6
								Y_{средн.}	24,8

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели.
Температура изотермического прогрева ТВО 40 °С
без предварительного выдерживания

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
1	+1	+1	2,0	8	13,80	0,09	13,57	0,23	0,05
2	+1	-1	2,0	4	4,20	0,09	4,03	0,17	0,03
3	-1	+1	0,4	8	16,40	0,09	16,07	0,33	0,11
4	-1	-1	0,4	4	10,60	0,21	10,33	0,27	0,07
5	+1	0	2,0	6	8,80	0,04	8,80	0,00	0,00
6	-1	0	0,4	6	13,00	0,16	13,20	-0,20	0,04
7	0	+1	1,2	8	14,30	0,13	14,35	-0,05	0,00
8	0	-1	1,2	4	6,80	0,09	6,71	0,09	0,01
9	0	0	1,2	6	10,40	0,07	10,53	-0,13	0,02
					$\sum S_u^2 =$	0,97		$SS_{на} =$	0,33

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена							
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,22	
		0,05	2	9			
0,22 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется					

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,04	$S_{эв} =$	0,19	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	5

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,946	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	2,31
		0,08	0,05	4	18		
2,31 < 2,946		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 60 °С
без предварительного выдерживания

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
1a	+1	+1	2,0	8	20,20	0,58	20,05	0,11	0,01
2a	+1	-1	2,0	4	7,60	0,09	7,68	-0,08	0,01
3a	-1	+1	0,4	8	22,50	0,28	22,68	-0,18	0,03
4a	-1	-1	0,4	4	13,70	0,64	14,08	-0,38	0,14
5a	+1	0	2,0	6	13,50	0,04	13,87	-0,37	0,13
6a	-1	0	0,4	6	18,60	0,43	18,38	0,22	0,05
7a	0	+1	1,2	8	20,80	0,73	21,37	-0,57	0,32
8a	0	-1	1,2	4	10,70	0,09	10,88	-0,18	0,03
9a	0	0	1,2	6	15,80	0,64	16,12	-0,32	0,10
					$\sum S_u^2 =$	3,52		$SS_{на} =$	0,83

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена							
$G_{табл.} =$	0,4775	α	F	N	$G_{расч.} =$	0,21	
		0,05	2	9			
0,21 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется					

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,13	$S_{эв} =$	0,36	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	1,28
		0,17	0,05	5	18		
1,28 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 80 °С
без предварительного выдерживания

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
16	+1	+1	2,0	8	25,03	0,72	24,70	0,33	0,11
26	+1	-1	2,0	4	11,93	0,30	12,40	-0,47	0,22
36	-1	+1	0,4	8	30,10	1,21	30,68	-0,58	0,34
46	-1	-1	0,4	4	18,80	0,43	18,38	0,42	0,18
56	+1	0	2,0	6	18,50	0,04	18,55	-0,05	0,00
66	-1	0	0,4	6	24,50	0,84	24,53	-0,03	0,00
76	0	+1	1,2	8	26,40	0,91	26,60	-0,20	0,04
86	0	-1	1,2	4	13,90	0,81	14,30	-0,40	0,16
96	0	0	1,2	6	19,90	0,52	20,45	-0,55	0,30
					$\sum S_u^2 =$	5,79		$SS_{на} =$	1,34

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена							
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,21	
		0,05	2	9			
0,21 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется					

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,21	$S_{эв} =$	0,46	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	1,25
		0,27	0,05	5	18		
1,25 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели.
Составы без добавок
ТВО без предварительного выдерживания

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Время изотермического прогрева, ч (X_1)	Температура изотермического прогрева, °С (X_2)					
10	+1	+1	8	80	24,80	0,57	25,02	-0,22	0,05
11	+1	-1	8	40	11,90	0,31	12,24	-0,34	0,11
12	-1	+1	4	80	17,00	0,31	16,84	0,16	0,03
10a	-1	-1	4	40	5,60	0,04	5,55	0,05	0,00
11a	+1	0	8	60	19,00	0,43	18,63	0,37	0,14
12a	-1	0	4	60	10,80	0,07	11,19	-0,39	0,15
10б	0	+1	6	80	20,50	0,13	20,93	-0,43	0,18
11б	0	-1	6	40	8,70	0,21	8,89	-0,19	0,04
12б	0	0	6	60	14,57	0,72	14,91	-0,34	0,12
					$\sum S_u^2 =$	2,79		$SS_{на} =$	0,82

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена							
$G_{табл.} =$	0,4775	α	F	N	$G_{расч.} =$	0,26	
		0,05	2	9			
0,26 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется					

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,10	$S_{эв} =$	0,32	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	1,59
		0,16	0,05	5	18		
1,59 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1

Формирование распалубочной прочности тяжелого бетона, модифицированного суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE при различных режимах ТВО (вариабельные значения времени и температуры изотермического прогрева) с 1- часовым предварительным выдерживанием

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
1В	350	1200	780	154,5	0,4	7 (1+4+2)	40	Y ₁	10,5
								Y ₂	10,8
								Y ₃	11,1
								Y_{средн.}	10,8
2В	350	1200	780	145,5	1,2	7 (1+4+2)	40	Y ₁	6,8
								Y ₂	7,8
								Y ₃	7,0
								Y_{средн.}	7,2
3В	350	1200	780	140,0	2,0	7 (1+4+2)	40	Y ₁	4,5
								Y ₂	4,6
								Y ₃	5,0
								Y_{средн.}	4,7
4В	350	1200	780	154,5	0,4	9 (1+6+2)	40	Y ₁	12,4
								Y ₂	13,2
								Y ₃	13,7
								Y_{средн.}	13,1
5В	350	1200	780	145,5	1,2	9 (1+6+2)	40	Y ₁	10,0
								Y ₂	11,0
								Y ₃	11,7
								Y_{средн.}	10,9
6В	350	1200	780	140,0	2,0	9 (1+6+2)	40	Y ₁	8,6
								Y ₂	9,1
								Y ₃	9,3
								Y_{средн.}	9,0

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
7В	350	1200	780	154,5	0,4	11 (1+8+2)	40	Y ₁	16,2
								Y ₂	16,2
								Y ₃	17,1
								Y_{средн.}	16,5
8В	350	1200	780	145,5	1,2	11 (1+8+2)	40	Y ₁	13,7
								Y ₂	14,7
								Y ₃	15,1
								Y_{средн.}	14,5
9В	350	1200	780	140,0	2,0	11 (1+8+2)	40	Y ₁	13,1
								Y ₂	13,9
								Y ₃	14,7
								Y_{средн.}	13,9
10В	350	1200	780	172,7	-	7 (1+4+2)	40	Y ₁	5,7
								Y ₂	5,9
								Y ₃	6,7
								Y_{средн.}	6,1
11В	350	1200	780	172,7	-	9 (1+6+2)	40	Y ₁	9,2
								Y ₂	8,0
								Y ₃	10,4
								Y_{средн.}	9,2
12В	350	1200	780	172,7	-	11 (1+8+2)	40	Y ₁	13,0
								Y ₂	11,7
								Y ₃	11,9
								Y_{средн.}	12,2
1Г	350	1200	780	154,5	0,4	7 (1+4+2)	60	Y ₁	13,4
								Y ₂	13,8
								Y ₃	14,8
								Y_{средн.}	14,0
2Г	350	1200	780	145,5	1,2	7 (1+4+2)	60	Y ₁	10,8
								Y ₂	10,4
								Y ₃	11,5
								Y_{средн.}	10,9
3Г	350	1200	780	140,0	2,0	7 (1+4+2)	60	Y ₁	7,2
								Y ₂	7,8
								Y ₃	8,4
								Y_{средн.}	7,8

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
4г	350	1200	780	154,5	0,4	9 (1+6+2)	60	Y ₁	18,5
								Y ₂	19,6
								Y ₃	18,0
								Y_{средн.}	18,7
5г	350	1200	780	145,5	1,2	9 (1+6+2)	60	Y ₁	15,9
								Y ₂	15,0
								Y ₃	16,8
								Y_{средн.}	15,9
6г	350	1200	780	140,0	2,0	9 (1+6+2)	60	Y ₁	13,8
								Y ₂	13,7
								Y ₃	13,6
								Y_{средн.}	13,7
7г	350	1200	780	154,5	0,4	11 (1+8+2)	60	Y ₁	21,8
								Y ₂	22,7
								Y ₃	23,6
								Y_{средн.}	22,7
8г	350	1200	780	145,5	1,2	11 (1+8+2)	60	Y ₁	20,7
								Y ₂	20,0
								Y ₃	21,7
								Y_{средн.}	20,8
9г	350	1200	780	140,0	2,0	11 (1+8+2)	60	Y ₁	19,2
								Y ₂	20,4
								Y ₃	21,3
								Y_{средн.}	20,3
10г	350	1200	780	172,7	-	7 (1+4+2)	60	Y ₁	10,8
								Y ₂	10,7
								Y ₃	11,5
								Y_{средн.}	11,0
11г	350	1200	780	172,7	-	9 (1+6+2)	60	Y ₁	14,9
								Y ₂	15,6
								Y ₃	16,0
								Y_{средн.}	15,5
12г	350	1200	780	172,7	-	11 (1+8+2)	60	Y ₁	18,7
								Y ₂	19,3
								Y ₃	20,2
								Y_{средн.}	19,4

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
1д	350	1200	780	154,5	0,4	7 (1+4+2)	80	Y ₁	18,3
								Y ₂	19,0
								Y ₃	19,4
								Y_{средн.}	18,9
2д	350	1200	780	145,5	1,2	7 (1+4+2)	80	Y ₁	14,6
								Y ₂	14,8
								Y ₃	15,6
								Y_{средн.}	15,0
3д	350	1200	780	140,0	2,0	7 (1+4+2)	80	Y ₁	11,7
								Y ₂	12,7
								Y ₃	11,9
								Y_{средн.}	12,1
4д	350	1200	780	154,5	0,4	9 (1+6+2)	80	Y ₁	25,7
								Y ₂	23,8
								Y ₃	25,2
								Y_{средн.}	24,9
5д	350	1200	780	145,5	1,2	9 (1+6+2)	80	Y ₁	21,8
								Y ₂	22,0
								Y ₃	22,8
								Y_{средн.}	22,2
6д	350	1200	780	140,0	2,0	9 (1+6+2)	80	Y ₁	19,8
								Y ₂	18,6
								Y ₃	20,4
								Y_{средн.}	19,6
7д	350	1200	780	154,5	0,4	11 (1+8+2)	80	Y ₁	31,7
								Y ₂	29,2
								Y ₃	30,0
								Y_{средн.}	30,3
8д	350	1200	780	145,5	1,2	11 (1+8+2)	80	Y ₁	26,3
								Y ₂	28,0
								Y ₃	29,7
								Y_{средн.}	28,0
9д	350	1200	780	140,0	2,0	11 (1+8+2)	80	Y ₁	26,8
								Y ₂	25,1
								Y ₃	26,4
								Y_{средн.}	26,1

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
10д	350	1200	780	172,7	-	7 (1+4+2)	80	Y ₁	18,7
								Y ₂	16,9
								Y ₃	17,5
								Y_{средн.}	17,7
11д	350	1200	780	172,7	-	9 (1+6+2)	80	Y ₁	21,6
								Y ₂	20,9
								Y ₃	22,6
								Y_{средн.}	21,7
12д	350	1200	780	172,7	-	11 (1+8+2)	80	Y ₁	24,6
								Y ₂	25,4
								Y ₃	26,2
								Y_{средн.}	25,4

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 40 °С
с 1-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
1	+1	+1	2,0	8	13,90	0,64	13,35	0,55	0,30
2	+1	-1	2,0	4	4,70	0,07	4,20	0,50	0,25
3	-1	+1	0,4	8	16,50	0,27	15,87	0,63	0,40
4	-1	-1	0,4	4	10,80	0,09	10,22	0,58	0,34
5	+1	0	2,0	6	9,00	0,13	8,78	0,22	0,05
6	-1	0	0,4	6	13,10	0,43	13,05	0,05	0,00
7	0	+1	1,2	8	14,50	0,52	14,61	-0,11	0,01
8	0	-1	1,2	4	7,20	0,28	7,21	-0,01	0,00
9	0	0	1,2	6	10,90	0,73	10,91	-0,01	0,00
					$\sum S_u^2 =$	3,16		$SS_{na} =$	1,34

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена							
$G_{табл.} =$	0,4775	α	F	N	$G_{расч.} =$	0,23	
		0,05	2	9			
0,23 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется					

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,12	$S_{эв} =$	0,34	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	S_{na}^2	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	2,29
		0,27	0,05	5	18		
2,29 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 60 °С
с 1-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
1a	+1	+1	2,0	8	20,30	1,11	20,07	0,23	0,05
2a	+1	-1	2,0	4	7,80	0,36	7,80	0,00	0,00
3a	-1	+1	0,4	8	22,70	0,81	22,70	0,00	0,00
4a	-1	-1	0,4	4	14,00	0,52	14,23	-0,23	0,05
5a	+1	0	2,0	6	13,70	0,01	13,93	-0,23	0,05
6a	-1	0	0,4	6	18,70	0,67	18,47	0,23	0,05
7a	0	+1	1,2	8	20,80	0,73	21,38	-0,58	0,34
8a	0	-1	1,2	4	10,90	0,31	11,02	-0,12	0,01
9a	0	0	1,2	6	15,90	0,81	16,20	-0,30	0,09
					$\sum S_u^2 =$	5,33		$SS_{na} =$	0,66

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,21
		0,05	2	9		
0,21 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,20	$S_{эв} =$	0,44	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	S_{na}^2	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	0,67
		0,13	0,05	5	18		
0,67 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

**Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 80 °С
с 1-часовым предварительным выдерживанием**

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X ₁)	Время изотермического прогрева, ч (X ₂)					
1б	+1	+1	2,0	8	26,10	0,79	26,01	0,09	0,01
2б	+1	-1	2,0	4	12,10	0,28	11,91	0,19	0,04
3б	-1	+1	0,4	8	30,30	1,63	30,14	0,16	0,02
4б	-1	-1	0,4	4	18,90	0,31	18,64	0,26	0,07
5б	+1	0	2,0	6	19,60	0,84	19,79	-0,19	0,04
6б	-1	0	0,4	6	24,90	0,97	25,22	-0,32	0,10
7б	0	+1	1,2	8	28,00	2,89	28,08	-0,08	0,01
8б	0	-1	1,2	4	15,00	0,28	15,28	-0,28	0,08
9б	0	0	1,2	6	22,20	0,28	22,50	-0,30	0,09
					$\sum S_u^2 =$	8,27		$SS_{на} =$	0,45

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	F	N	$G_{расч.} =$	0,35
		0,05	2	9		
0,35 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,31	$S_{эв} =$	0,55	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	5

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,946	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	0,37
		0,11	0,05	4	18		
0,37 < 2,946		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Составы без добавок
ТВО с 1-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Время изотермического прогрева, ч (X_1)	Температура изотермического прогрева, °С (X_2)					
10	+1	+1	8	80	25,40	0,64	25,63	-0,23	0,06
11	+1	-1	8	40	12,20	0,49	13,20	-1,00	1,00
12	-1	+1	4	80	17,70	0,84	18,23	-0,53	0,29
10a	-1	-1	4	40	6,10	0,28	5,80	0,30	0,09
11a	+1	0	8	60	19,40	0,57	19,42	-0,02	0,00
12a	-1	0	4	60	11,00	0,19	12,02	-1,02	1,04
10б	0	+1	6	80	21,70	0,73	21,93	-0,23	0,06
11б	0	-1	6	40	9,20	1,44	9,50	-0,30	0,09
12б	0	0	6	60	15,50	0,31	15,72	-0,22	0,05
					$\sum S_u^2 =$	5,49		$SS_{на} =$	2,66

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	F	N	$G_{расч.} =$	0,26
		0,05	2	9		
0,26 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,20	$S_{эв} =$	0,45	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	3

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,676	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	2,18
		0,44	0,05	6	18		
2,18 < 2,676		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1

Формирование распалубочной прочности тяжелого бетона, модифицированного суперпластификатором Sika Viscocrete 24 HE при различных режимах ТВО (вариабельные значения времени и температуры изотермического прогрева) с 2- часовым предварительным выдерживанием

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
1е	350	1200	780	154,5	0,4	8 (2+4+2)	40	Y ₁	10,8
								Y ₂	11,3
								Y ₃	11,8
								Y_{средн.}	11,3
2е	350	1200	780	145,5	1,2	8 (2+4+2)	40	Y ₁	7,7
								Y ₂	8,5
								Y ₃	7,8
								Y_{средн.}	8,0
3е	350	1200	780	140,0	2,0	8 (2+4+2)	40	Y ₁	4,8
								Y ₂	4,7
								Y ₃	5,8
								Y_{средн.}	5,1
4е	350	1200	780	154,5	0,4	10 (2+6+2)	40	Y ₁	13,0
								Y ₂	13,5
								Y ₃	14,6
								Y_{средн.}	13,7
5е	350	1200	780	145,5	1,2	10 (2+6+2)	40	Y ₁	11,2
								Y ₂	11,3
								Y ₃	12,3
								Y_{средн.}	11,6
6е	350	1200	780	140,0	2,0	10 (2+6+2)	40	Y ₁	9,1
								Y ₂	8,8
								Y ₃	9,4
								Y_{средн.}	9,1

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
7е	350	1200	780	154,5	0,4	12 (2+8+2)	40	Y ₁	16,5
								Y ₂	16,1
								Y ₃	17,2
								Y_{средн.}	16,6
8е	350	1200	780	145,5	1,2	12 (2+8+2)	40	Y ₁	14,2
								Y ₂	14,8
								Y ₃	15,4
								Y_{средн.}	14,8
9е	350	1200	780	140,0	2,0	12 (2+8+2)	40	Y ₁	13,8
								Y ₂	13,5
								Y ₃	14,7
								Y_{средн.}	14,0
10е	350	1200	780	172,7	-	8 (2+4+2)	40	Y ₁	6,2
								Y ₂	6,8
								Y ₃	7,7
								Y_{средн.}	6,9
11е	350	1200	780	172,7	-	10 (2+6+2)	40	Y ₁	9,9
								Y ₂	9,0
								Y ₃	10,5
								Y_{средн.}	9,8
12е	350	1200	780	172,7	-	12 (2+8+2)	40	Y ₁	13,5
								Y ₂	12,5
								Y ₃	11,8
								Y_{средн.}	12,6
1ж	350	1200	780	154,5	0,4	8 (2+4+2)	60	Y ₁	14,8
								Y ₂	15,7
								Y ₃	16,0
								Y_{средн.}	15,5
2ж	350	1200	780	145,5	1,2	8 (2+4+2)	60	Y ₁	12,5
								Y ₂	11,7
								Y ₃	13,0
								Y_{средн.}	12,4
3ж	350	1200	780	140,0	2,0	8 (2+4+2)	60	Y ₁	7,7
								Y ₂	7,5
								Y ₃	8,8
								Y_{средн.}	78,0

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
4ж	350	1200	780	154,5	0,4	10 (2+6+2)	60	Y ₁	20,1
								Y ₂	18,3
								Y ₃	19,2
								Y_{средн.}	19,2
5ж	350	1200	780	145,5	1,2	10 (2+6+2)	60	Y ₁	17,2
								Y ₂	16,4
								Y ₃	16,8
								Y_{средн.}	16,8
6ж	350	1200	780	140,0	2,0	10 (2+6+2)	60	Y ₁	14,5
								Y ₂	15,7
								Y ₃	13,9
								Y_{средн.}	14,7
7ж	350	1200	780	154,5	0,4	12 (2+8+2)	60	Y ₁	22,1
								Y ₂	22,8
								Y ₃	23,5
								Y_{средн.}	22,8
8ж	350	1200	780	145,5	1,2	12 (2+8+2)	60	Y ₁	20,7
								Y ₂	21,5
								Y ₃	22,3
								Y_{средн.}	21,5
9ж	350	1200	780	140,0	2,0	12 (2+8+2)	60	Y ₁	20,8
								Y ₂	19,6
								Y ₃	21,4
								Y_{средн.}	20,6
10ж	350	1200	780	172,7	-	8 (2+4+2)	60	Y ₁	13,5
								Y ₂	11,8
								Y ₃	12,5
								Y_{средн.}	12,6
11ж	350	1200	780	172,7	-	10 (2+6+2)	60	Y ₁	16,0
								Y ₂	16,3
								Y ₃	16,9
								Y_{средн.}	16,4
12ж	350	1200	780	172,7	-	12 (2+8+2)	60	Y ₁	20,0
								Y ₂	20,8
								Y ₃	21,3
								Y_{средн.}	20,7

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
1з	350	1200	780	154,5	0,4	8 (2+4+2)	80	Y ₁	18,8
								Y ₂	19,6
								Y ₃	19,2
								Y_{средн.}	19,2
2з	350	1200	780	145,5	1,2	8 (2+4+2)	80	Y ₁	16,7
								Y ₂	15,5
								Y ₃	16,1
								Y_{средн.}	16,1
3з	350	1200	780	140,0	2,0	8 (2+4+2)	80	Y ₁	12,4
								Y ₂	12,7
								Y ₃	13,3
								Y_{средн.}	12,8
4з	350	1200	780	154,5	0,4	10 (2+6+2)	80	Y ₁	25,2
								Y ₂	25,4
								Y ₃	24,4
								Y_{средн.}	25,0
5з	350	1200	780	145,5	1,2	10 (2+6+2)	80	Y ₁	22,5
								Y ₂	22,6
								Y ₃	23,6
								Y_{средн.}	22,9
6з	350	1200	780	140,0	2,0	10 (2+6+2)	80	Y ₁	20,3
								Y ₂	20,7
								Y ₃	21,4
								Y_{средн.}	20,8
7з	350	1200	780	154,5	0,4	12 (2+8+2)	80	Y ₁	32,3
								Y ₂	30,5
								Y ₃	29,9
								Y_{средн.}	30,9
8з	350	1200	780	145,5	1,2	12 (2+8+2)	80	Y ₁	28,5
								Y ₂	27,8
								Y ₃	29,5
								Y_{средн.}	28,6
9з	350	1200	780	140,0	2,0	12 (2+8+2)	80	Y ₁	25,7
								Y ₂	27,3
								Y ₃	26,5
								Y_{средн.}	26,5

№ серии эксперимента	Расход материалов, кг/м ³				Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от массы цемента	Режим ТВО		Результаты экспериментального исследования	
	Цемент	Щебень	Песок	Вода		Общее время ТВО, ч (в скобках время в ч.: предварительного выдерживания + изотермического прогрева + остывания)	Температура изотермического прогрева, °С	№ измерения выхода	Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в момент распалубки
10з	350	1200	780	172,7	-	8 (2+4+2)	80	Y ₁	18,6
								Y ₂	18,5
								Y ₃	17,5
								Y_{средн.}	18,2
11з	350	1200	780	172,7	-	10 (2+6+2)	80	Y ₁	22,0
								Y ₂	21,7
								Y ₃	23,5
								Y_{средн.}	22,4
12з	350	1200	780	172,7	-	12 (2+8+2)	80	Y ₁	26,9
								Y ₂	25,7
								Y ₃	26,3
								Y_{средн.}	26,3

**Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 40 °С
с 2-часовым предварительным выдерживанием**

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X ₁)	Время изотермического прогрева, ч (X ₂)					
1	+1	+1	2,0	8	14,00	0,39	13,75	0,25	0,06
2	+1	-1	2,0	4	5,10	0,37	4,95	0,15	0,02
3	-1	+1	0,4	8	16,60	0,31	16,42	0,18	0,03
4	-1	-1	0,4	4	11,30	0,25	11,22	0,08	0,01
5	+1	0	2,0	6	9,10	0,09	9,35	-0,25	0,06
6	-1	0	0,4	6	13,70	0,67	13,82	-0,12	0,01
7	0	+1	1,2	8	14,80	0,36	15,09	-0,29	0,08
8	0	-1	1,2	4	8,00	0,19	8,09	-0,09	0,01
9	0	0	1,2	6	11,60	0,37	11,59	0,01	0,00
					$\sum S_u^2 =$	3,00		$SS_{на} =$	0,29

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,22
		0,05	2	9		
0,22 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\bar{Y}}^2 =$	0,11	$S_{эв} =$	0,34	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	0,52
		0,06	0,05	5	18		
0,52 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 60 °С
с 2-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
1a	+1	+1	2,0	8	20,60	0,84	21,1	-0,49	0,25
2a	+1	-1	2,0	4	8,00	0,49	8,8	-0,78	0,61
3a	-1	+1	0,4	8	22,80	0,49	23,2	-0,38	0,14
4a	-1	-1	0,4	4	15,50	0,39	16,2	-0,66	0,44
5a	+1	0	2,0	6	14,70	0,84	14,9	-0,24	0,06
6a	-1	0	0,4	6	19,20	0,81	19,7	-0,47	0,22
7a	0	+1	1,2	8	21,50	0,64	22,1	-0,64	0,41
8a	0	-1	1,2	4	12,40	0,43	12,5	-0,07	0,00
9a	0	0	1,2	6	16,80	0,16	17,3	-0,50	0,25
					$\sum S_u^2 =$	5,09		$SS_{на} =$	2,37

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,17
		0,05	2	9		
0,17 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\{Y\}}^2 =$	0,19	$S_{эв} =$	0,43	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	2,52
		0,47	0,05	5	18		
2,52 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Температура изотермического прогрева ТВО 80 °С
с 2-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Содержание добавки Sika Viscocrete 24 HE, % от Ц(X_1)	Время изотермического прогрева, ч (X_2)					
16	+1	+1	2,0	8	26,50	0,64	26,8	-0,28	0,08
26	+1	-1	2,0	4	12,80	0,21	13,1	-0,35	0,12
36	-1	+1	0,4	8	30,90	1,56	30,8	0,12	0,01
46	-1	-1	0,4	4	19,20	0,16	19,1	0,05	0,00
56	+1	0	2,0	6	20,80	0,31	20,9	-0,05	0,00
66	-1	0	0,4	6	25,00	0,28	25,9	-0,85	0,72
76	0	+1	1,2	8	28,60	0,73	28,8	-0,18	0,03
86	0	-1	1,2	4	16,10	0,36	16,1	-0,05	0,00
96	0	0	1,2	6	22,90	0,37	23,4	-0,45	0,20
					$\sum S_u^2 =$	4,62		$SS_{на} =$	1,18

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,34
		0,05	2	9		
0,34 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\{Y\}}^2 =$	0,17	$S_{эв} =$	0,41	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	5

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,946	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	1,72
		0,29	0,05	4	18		
1,72 < 2,946		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

Результаты эксперимента и регрессионный анализ модели
Составы без добавок.

ТВО с 2-часовым предварительным выдерживанием

№ опыт- ной серии	Матрица экспери- мента		Варьируемые факторы эксперимента		Среднее арифмет. \bar{Y}_u	Дисперсия измерения S_u^2	Расчетное значение \hat{Y}_1	Δu	$(\Delta u)_2$
	X_1	X_2	Время изотермического прогрева, ч (X_1)	Температура изотермического прогрева, °С (X_2)					
10	+1	+1	8	80	26,30	0,36	26,6	-0,32	0,10
11	+1	-1	8	40	12,60	0,73	12,9	-0,29	0,08
12	-1	+1	4	80	18,20	0,37	18,1	0,08	0,01
10a	-1	-1	4	40	6,90	0,57	6,8	0,11	0,01
11a	+1	0	8	60	20,70	0,43	20,5	0,17	0,03
12a	-1	0	4	60	12,60	0,13	13,2	-0,63	0,40
10б	0	+1	6	80	22,40	0,93	22,4	0,03	0,00
11б	0	-1	6	40	9,80	0,57	9,8	-0,04	0,00
12б	0	0	6	60	16,40	0,21	16,9	-0,48	0,23
					$\sum S_u^2 =$	4,30		$SS_{на} =$	0,86

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена						
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$	0,22
		0,05	2	9		
0,22 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ Выполняется				

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)							
$S_{\{Y\}}^2 =$	0,16	$S_{эв} =$	0,40	α	f	t	Λ
				0,05	18	2,104	5

Проверка адекватности модели по критерию Фишера							
$F_{табл.} =$	2,946	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2	$F_{эв} =$	1,35
		0,22	0,05	4	18		
1,35 < 2,946		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ Выполняется					

Вывод: исследуемая математическая модель **адекватна**

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

ООО «МАРИЭКСПРЕСС»

ОГРН 1171215008140 ИНН 1224004596 КПП 121501001
 адрес: 424006, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Ломоносова, д. 4Г
 Тел. 8 960 091 2235, e-mail: bz2999@mail.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Маризэкспресс»

Газизов Д.Г.

«09» февраля 2021 г.



А К Т

о внедрении результатов
 кандидатской диссертационной работы
 Лешканова Андрея Юрьевича

Комиссия в составе: председатель директор ООО «Маризэкспресс» Газизов Д.Г.; члены комиссии: главный технолог ООО «Маризэкспресс» Кривомаз Е.В.; оператор БСУ ООО «Маризэкспресс» Царегородцев С.В.; руководитель Территориальной испытательной строительной лаборатории, специалист Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве, к.т.н., доцент каф. СТИАД ФГБОУ ВО «ПГТУ» Анисимов С.Н. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы аспиранта Лешканова Андрея Юрьевича использованы при изготовлении железобетонных перемычек 2ПБ 22-3П в виде применения пластифицированной бетонной смеси, твердеющей в условиях тепловлажностной обработки с ускоренным режимом включая:

1. Результаты экспериментальных исследований по разработке состава бетона.
2. Рекомендации по применению малозатратных режимов ТВО при изготовлении сборных железобетонных изделий.

Для приготовления бетонной смеси использовались следующие компоненты: щебень дробиломостью 1200, песок модулем крупности $M_k=1,9$, цемент ЦЕМ I 42,5 Н, суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika Viscocrete 24HE. Качество применяемых сырьевых материалов соответствовало требованиям действующих технических нормативных документов. Подвижность бетонной смеси – П2. Рабочий состав на бетонной смеси представлен в таблице 1. Изделия твердели в условиях ТВО при температуре 60 °С по режиму (1+6+2) ч.

Таблица 1. Рабочий состав на 1 м³ бетонной смеси.

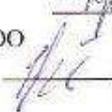
Портландцемент, кг	Щебень, кг	Песок, кг	Вода, л	Суперпластификатор, Sika Viscocrete 24HE, л
350	1200	780	151	2,1

Прочность бетона после ТВО по рекомендуемому режиму составила 16,2 МПа, на 7-е сутки 26,1 МПа и 32,7 МПа на 28 сутки. Проектный класс - В25. Марка по морозостойкости - F150.

Использование указанных результатов позволяет: получить в сравнительно короткие сроки ЖБИ с необходимой отпускной прочностью, сократить экономические и технологические затраты при применении разработанной бетонной смеси в сравнении с отечественными аналогами; снизить энергозатраты на твердение в условиях ТВО благодаря сокращению времени предварительного выдерживания, температуры и продолжительности пропаривания.

Председатель комиссии:
 Директор
 ООО «Маризэкспресс»  Газизов Д.Г.

Руководитель ТИСЛ,
 к.т.н., доцент каф.
 СТИАД ФГБОУ ВО
 «ПГТУ», эксперт  Анисимов С.Н.

Члены комиссии:
 Главный технолог ООО
 «Маризэкспресс»  Кривомаз Е.В.
 Оператор БСУ ООО
 «Маризэкспресс»  Царегородцев С.В.

Аспирант
 ФГБОУ ВО «ПГТУ»  Лешканов А.Ю.

Фотофиксация процесса внедрения



Рисунок Д.1 – База ООО «Мариэкспресс», на котором произведено внедрение результатов исследования



Рисунок Д.2 – Бетономесительный узел ООО «Мариэкспресс», г. Йошкар-Ола, РМЭ



Рисунок Д.3 – Заполнение в окне программы технолога состава внедряемой бетонной смеси



Рисунок Д.4 – Подготовка опалубки



Рисунок Д.5 – Укладка готовой бетонной смеси в формы



Рисунок Д.6 – Поверхность уложенной бетонной смеси после сглаживания



Рисунок Д.7 – Готовые железобетонные перемычки после твердения по режиму (1+6+2) ч



Рисунок Д.8



Рисунок Д.9

Установка железобетонной перемычки в проектное положение на объекте «Многоквартирный жилой дом поз.10 в микрорайоне «Мирный» г. Йошкар-Ола, 6 этап»

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е.1 – Расчет текущего и среднего коэффициента вариации состава бетона с 0,4 % Sika Viscocrete 24HE после ТВО по режиму (0-6-2)ч при 60 °С

№	Единичное значение прочности	Фактическая прочность в серии	Среднеквадратическое отклонение в серии	Размах прочности в серии	Текущий коэффициент вариации
i	R_i	$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$	$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1}}$	$W_m = R_i^{max} - R_i^{min}$	$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100\%$
1	17,6	17,7	1,31	2,6	7,4
2	16,5				
3	19,1				
4	20	19,0	1,62	2,9	8,5
5	19,8				
6	17,1				
7	19,1	17,9	1,11	2,2	6,2
8	16,9				
9	17,7				
10	17,1	18,1	0,95	1,9	5,3
11	18,1				
12	19				
13	18,2	17,7	0,55	1,1	3,1
14	17,1				
15	17,7				
16	20	18,1	1,78	3,5	9,8
17	17,7				
18	16,5				
19	20,1	19,1	0,89	1,7	4,7
20	18,8				
21	18,4				
22	19,2	18,1	1,35	2,6	7,4
23	18,5				
24	16,6				
25	19,4	18,7	1,51	2,8	8,1
26	19,8				
27	17				
28	17,6	17,5	0,12	0,2	0,7
29	17,6				
30	17,4				
31	20,5	19,4	1,28	2,5	6,6
32	19,7				
33	18				
34	20,2	19,4	1,65	3	8,5
35	20,5				
36	17,5				
37	20,3	19,2	1,69	2,9	8,8
38	18				
39	17,4				
40	16,8	17,2	0,53	1	3,1
41	17				
42	17,8				

43	20,5	19,5	1,42	2,6	7,3
44	20,2				
45	17,9				
46	18,7	19,7	0,91	1,7	4,6
47	20,4				
48	20,1				
49	19	18,0	1,00	2	5,6
50	17				
51	18,1				
52	17,8	17,0	0,67	1,2	3,9
53	16,7				
54	16,6				
55	16,8	17,8	1,12	2,2	6,3
56	17,5				
57	19				
58	16,7	18,8	1,87	3,5	9,9
59	19,6				
60	20,2				
61	18,2	17,8	0,64	1,1	3,6
62	18,2				
63	17,1				
64	20	18,4	1,39	2,5	7,6
65	17,7				
66	17,5				
67	18,9	19,0	0,26	0,5	1,4
68	18,8				
69	19,3				
70	16,7	18,1	1,91	3,6	10,5
71	17,4				
72	20,3				
73	19,4	19,0	1,44	2,8	7,6
74	20,2				
75	17,4				
76	17	18,2	1,31	2,6	7,2
77	19,6				
78	18				
79	19,3	18,4	1,31	2,4	7,1
80	19				
81	16,9				
82	17,1	18,7	1,51	3	8,1
83	20,1				
84	18,9				
85	17,5	19,0	1,34	2,5	7,1
86	19,6				
87	20				
88	18,1	18,2	0,70	1,4	3,9
89	18,9				
90	17,5				
Средний коэффициент вариации прочности бетона \bar{V}_m :					6,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Рекомендации по применению низкотемпературных режимов ТВО при изготовлении сборных ЖБИ и конструкций

Согласовано:

Проректор
по научной работе
ФГБОУ ВО «ИТТУ»



Д.В. Иванов

МП

Проректор
ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)



А.В. Савин

МП

Утверждено:

Директор
ООО «Мариэкспресс»



Д.Г. Газизов

"03" февраля 2021 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по применению низкотемпературных режимов ТВО
при изготовлении сборных железобетонных изделий и конструкций

Разработчики:

 Л.М. Добшиц

 А.Ю. Лешканов

 С.Н. Анисимов

 А.Б. Лампего

Йошкар-Ола

2021

Содержание

Предисловие	3
1. Общие положения	3
2. Область применения малозатратных режимов ТВО	3
3. Материалы для бетона	4
4. Состав бетонной смеси	5
5. Дозирование компонентов бетонной смеси	6
6. Укладка и уплотнение бетонных смесей	6
7. Тепловлажностная обработка бетона	6
8. Контроль производства изделий	7
9. Техника безопасности	8
Приложение 1	9
Приложение 2	11

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из тенденций в современном строительстве является необходимость получения изделий и конструкций в очень короткие сроки, увеличение объемов производства, потребность в снижении энерго- и трудозатрат при изготовлении ЖБК. Использование пластифицированных бетонов вместо традиционных позволяет уменьшить водоцементное отношение на 10-30 % при сохранении подвижности бетонных смесей, увеличить проектную прочность на 30...50 %, снизить расход цемента, а также снизить трудоемкость и энергозатраты при изготовлении изделий и конструкций.

В последнее время созданы высокоэффективные пластифицирующие добавки на основе поликарбоксилатных эфиров, использование которых позволяет кроме вышесказанного регулировать режимы тепловлажностной обработки (ТВО) бетонов. Одной из основных идей данных рекомендаций является возможность сокращения длительности и температуры изотермического прогрева, а также существенное влияние на период предварительного выдерживания перед ТВО вплоть до его снижения до нуля. При этом значительно снижаются энергозатраты на производство изделий и конструкций, обеспечивается высокая распалубочная и проектная прочность, появляется способность обеспечения двухсменной оборачиваемости форм.

Рекомендации разработаны доктором техн. наук, профессором ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ) Л.М. Добшицем, инж. ФГБОУ ВО «ПГТУ» А.Ю. Лешкановым, кандидатом техн. наук, доцентом ФГБОУ ВО «ПГТУ» С.Н. Анисимовым, асп. ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ) А.Б. Лампего.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Рекомендации распространяются на технологию изготовления сборных железобетонных изделий и конструкций из пластифицированных бетонов по агрегатно-поточной, стендовой, конвейерной и другим разновидностям традиционной технологии, включающей уплотнение бетонной смеси различными вибрационными методами.

Рекомендации не распространяются на изделия, изготавливаемые с применением уплотнения бетонной смеси прессованием, в том числе роликовым виброформованием, прокатом и вибровакуумированием.

1.2. Под малозатратными режимами ТВО следует понимать режимы, при которых сокращены длительность цикла и температура пропаривания.

1.3. Изделия и конструкции из бетонов следует изготавливать по методике СП 130.13330.2018, а также стандартов и других инструктивно-нормативных документов с учетом положений настоящих Рекомендаций.

1.4. При изготовлении изделий и конструкций рекомендуется использовать суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, позволяющие получать подвижные бетонные смеси ($ОК = 5...9$ см и более).

2. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОЗАТРАТНЫХ РЕЖИМОВ ТВО

2.1. Малозатратные режимы ТВО рекомендуется применять на заводских производственных линиях для повышения оборачиваемости опалубки, увеличения темпов строительства, снижения трудо- и энергозатрат при изготовлении железобетонных изделий и конструкций.

2.2. Наиболее эффективны малозатратные режимы ТВО при изготовлении изделий и конструкций только при модифицировании поликарбоксилатными суперпластификаторами.

2.3. Малозатратные режимы ТВО рекомендуется использовать для изготовления изделий и конструкций следующих видов: перемычек, парапетных плит, лестничных ступеней и маршей, колонн, стропильных конструкций (балок, ферм, плит), ригелей и т.д.

3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНА

Цементы

3.1. Для изготовления бетонов по малозатратным режимам рекомендуется применять портландцементы без минеральных добавок, соответствующие требованиям ГОСТ 10178-85 и ГОСТ 31108-2016.

3.2. Требуемую марку цемента для бетонов различных классов по прочности на сжатие следует принимать по табл. 1.

Таблица 1.

Марки цемента для бетонов

Класс бетона	Марка бетона	Рекомендуемые (допускаемые) марки цемента при использовании поликарбоксилатных суперпластификаторов
B15	200	400, 500
B20	250	500
B22,5	300	500
B25	350	500

3.3. Цементы для производства ЖБК по малозатратному режиму рекомендуется выбирать с учетом кинетики их твердения при тепловой обработке. Наиболее предпочтительны цементы группой I по эффективности после пропаривания, обладающие активностью после пропаривания 32 МПа и более по ГОСТ 310.4-81, которые обеспечивают сокращение топливно-энергетических затрат на тепловлажностную обработку и уменьшение ее длительности.

3.4. Рекомендуется использование среднеалюминатных цемента с содержанием C_3A от 6 до 9 %.

Заполнители

3.5. В качестве мелкого заполнителя следует применять пески, отвечающие требованиям ГОСТ 8736-2014. Рекомендуется использовать крупно-, средне- и мелкозернистые пески, содержащие минимальное количество глинистых и отмучиваемых примесей.

3.6. При обеспечении требуемых характеристик бетонных смесей и бетонов путем введения суперпластификаторов и при соответствующем технико-экономическом обосновании допускается применять мелкие пески с $M_{кр}$ не менее 1,5.

3.7. В качестве крупного заполнителя рекомендуется использовать щебень и гравий, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8267-93. Максимальная крупность зерен щебня должна быть не более 1/3 толщины изготавливаемой конструкции и не более 2/3 расстояния между элементами арматурных каркасов и не должна превышать 40 мм.

3.8. Допускается использование щебня маркой по дробимости 800...1200 и гравия (щебня из гравия) – 800...1000.

3.9. По содержанию зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы щебень должен соответствовать 1 или 2 группе по ГОСТ 8267-93.

Вода

3.10. Вода для приготовления бетонной смеси должна отвечать требованиям ГОСТ 23732-2011.

Добавки

3.11. При изготовлении изделий и конструкций по малозатратному режиму следует применять суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika® ViscoCrete®-24 HE производства швейцарского концерна Sika.

3.12. Добавка соответствует классу суперпластифицирующих согласно ГОСТ 24211-2008.

3.13. Добавка должна удовлетворять требованиям ТУ 2493-009-13613997-2011.

3.14. Основные характеристики суперпластификатора показаны в таблице 2.

Таблица 2

Основные свойства Sika® ViscoCrete®-24 HE

Химическая основа	Водная композиция модифицированных поликарбоксилатных эфиров
Внешний вид / цвет	Жидкость светло-коричневого цвета
Плотность	1,075 – 1,095 кг/дм ³ (при 20 °С)
Значение pH	4,0-6,0
Содержание хлоридов	Менее 0,01 %

3.15. Суперпластификатор вводится в бетонные смеси в следующих целях:

- для снижения расхода воды и В/Ц и обеспечения требуемой прочности бетона при использовании цементов наиболее распространенных марок (400...500), а также заполнителей пониженной прочности;
- для снижения расхода цемента при сохранении неизменной удобоукладываемости смесей и постоянной прочности бетона, повышения экономичности и улучшения технических характеристик бетонов (усадки, трещиностойкости, длительной прочности и др.), особенно необходимого при использовании материалов с повышенной водопотребностью (цементов с минеральными добавками, мелких песков);
- для увеличения подвижности смесей, позволяющего сократить длительность, трудоемкость и энергоемкость их укладки и уплотнения при формировании густоармированных конструкций и конструкций сложной конфигурации, а также для обеспечения требуемой при укладке подвижности смеси, особенно при повышенной ее температуре без увеличения расхода цемента.

3.15. Оптимальное количество пластифицирующих добавок следует определять по математическим моделям, представленным в приложении 1.

4. СОСТАВ БЕТОННОЙ СМЕСИ

4.1. Состав бетона для получения необходимой отпускной прочности рассчитан методом абсолютных объемов в соответствии с «Руководством по подбору составов тяжелого бетона» (М.: Стройиздат, 1979).

4.2. Средний уровень прочности бетона назначается по ГОСТ 18105.1-86 для условий действующего технологического комплекса и по значению партионного коэффициента вариации прочности бетона 13,5 %, для вновь вводимого технологического комплекса.

4.3. Рекомендуется применять следующий состав бетона (на 1 м³): 350 кг цемента, 1200 кг щебня, 780 кг песка.

4.4. Рекомендуемая дозировка суперпластификатора Sika® ViscoCrete®-24 HE 0,4-2,0 %. Точная дозировка устанавливается в соответствии с эмпирической формулой и математической моделью, представленной в приложении 1.

4.5. Количество воды для бетонной смеси подвижности П2 согласно ГОСТ 10181-2014 рассчитывать согласно таблице 3.

Таблица 3

Водоцементное отношение бетонных смесей*

Sika® ViscoCrete®-24 HE, % от массы цемента	В/Ц
0,4	0,442
1,2	0,416
2,0	0,400

*При использовании дозировки Sika® ViscoCrete®-24 HE, отличной от представленной в таблице 2, необходимо рассчитать В/Ц методом линейной интерполяции.

4.6. Количество воды рассчитано при дозировании крупного и мелкого заполнителя влажностью 5-7%. При отличающихся значениях влажности заполнителей необходимо корректировать расход воды.

4.7. После расчета расходов материалов следует приготовить опытные замесы, определить подвижность бетонной смеси. При несоответствии фактической подвижности смеси требуемой необходимо корректировать ее состав путем добавления или снижения расхода воды на 5...10 %.

5. ДОЗИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ БЕТОННОЙ СМЕСИ

5.1. Необходимо соблюдать следующий порядок заполнения компонентов в бетоносмесительной установке (БСУ): 1. Крупный заполнитель. 2. Мелкий заполнитель. 3. Вода с раствором суперпластификатора одновременно с цементом.

5.2. Общая длительность перемешивания должна составлять не менее 3 мин и уточняться экспериментально с учетом требований, предъявляемых к бетонной смеси по удобоукладываемости.

5.3. Для уменьшения расхода цемента, снижения вязкости бетонной смеси и энергоемкости ее приготовления, а также для замедления потери ее подвижности рекомендуется ограничивать температуру смеси 30 °С.

5.4. При транспортировании бетонных смесей необходимо предусматривать мероприятия по предотвращению их расплыва и утечки из транспортных средств.

5.5. Высота падения смесей при выгрузке из смесителя в транспортные средства и при укладке их в формы не должна превышать 1,5 м, при большей высоте падения необходимо устанавливать инвентарные лотки, хоботы, перегрузочные средства для предотвращения расслоения смесей.

6. УКЛАДКА И УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

6.1. Способы формирования изделий и конструкций из пластифицированных бетонов следует принимать в зависимости от вида конструкций, степени их армирования и применяемой технологии изготовления в соответствии с положениями «Руководящие технологические материалы по заводскому производству сборных предварительно напряженных железобетонных конструкций РТМ 75-95» (М.: НИИЖБ, 1995), «Пособия по технологии формирования железобетонных изделий» (к СНиП 3.09.01-85) (М.: Стройиздат, 1987) и СП 130.13330.2018.

6.2. Уплотнять смеси для пластифицированных бетонов рекомендуется преимущественно вибрационными методами, а также центрифугированием.

6.3. Для повышения эффективности уплотнения бетонных смесей и снижения его энергоемкости целесообразно использовать виброустройства, передающие вибрационные воздействия непосредственно смеси и не вовлекающие в вибрацию формы. Шаг перестановки глубинных вибраторов не должен превышать 1,5-радиуса их действия.

6.4. С учетом повышенной адгезии бетонных смесей с суперпластификатором Sika® ViscoCrete®-24 HE на формы следует наносить качественные смазочные материалы (например, обратно-эмульсионную смазку ОЭ-2, парафино-вазелиновую и др.).

7. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА БЕТОНА

7.1. Тепловлажностную обработку изделий и конструкций из бетонов следует осуществлять в ямных и туннельных камерах, на стендах, в термоформах и других тепловых агрегатах в зависимости от применяемой технологии изготовления изделий, их конструктивных особенностей и других факторов.

Основным видом тепловлажностной обработки бетонов является пропаривание по малозатратным режимам.

7.2. Благодаря особенности взаимодействия суперпластификатора Sika® ViscoCrete®-24 HE с цементным вяжущим, в частности, первичной избирательной адсорбции на

алюминатных и алюмоферритных фазах рекомендуются режимы пропаривания с сокращенной длительностью предварительной выдержки и изотермического прогрева, с увеличенной скоростью подъема температуры, с температурой пропаривания 40...80 °С. Необходимая температура прогрева выбирается из адекватной математической модели, представленной в приложении 1.

7.3. Изотермический прогрев бетонов рекомендуется осуществлять при 40...80 °С в течение 6 часов, время остывания – 2 часа, что обеспечивает двухсменную оборачиваемость форм с получением 60-70 % от марочной прочности.

7.4. При обработке изделий в термоформах необходимо осуществлять тщательную влаго- и теплоизоляцию поверхности бетона. Запрещается прогревать изделия с неукрытой поверхностью во избежание растрескивания поверхностного слоя, ухудшения качества бетона и непроизводительных потерь тепла.

7.5. Время предварительного выдерживания может быть снижено до нуля без значительного снижения отпускной прочности. Математическая модель прочности после ТВО в зависимости от длительности предварительной выдержки и дозировки Sika® ViscoCrete®-24 HE показана в приложении 1.

7.6. Температурный перепад между поверхностью изделий и окружающей средой на стадии их охлаждения и при выемке из теплового агрегата не должен превышать 30 °С. Для уменьшений тепло- и влаго-обмена бетона с окружающей средой (особенно при пониженной относительной влажности воздуха), снижения возникающих напряжений и обеспечения дальнейшего роста прочности бетона рекомендуется укрывать изделия после пропаривания брезентом, пленкой или другими покрытиями.

8. КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

8.1. При изготовлении изделий и конструкций из бетона с суперпластификатором необходимо тщательно контролировать качество исходных материалов, проводить пооперационный контроль за всеми технологическими процессами приготовления, транспортирования, уплотнения бетонной смеси, режимами твердения бетона и выходной контроль качества бетона и конструкций, обеспечивающий отгрузку потребителям только кондиционных изделий и конструкций.

8.2. Дозирование раствора Sika® ViscoCrete®-24 HE в БСУ нужно производить после предварительного тщательного их перемешивания.

8.3. Добавку следует хранить в неукрытой заводской упаковке, в сухом помещении, предохраняя от воздействия прямых солнечных лучей и замораживания, при температуре от +5°С до +35°С.

8.4. Замёрзшая добавка Sika® ViscoCrete®-24 HE может быть применена после медленного оттаивания при комнатной температуре без ухудшения свойств.

8.5. При контроле за укладкой и уплотнением бетонных смесей следует обеспечивать строгое соответствие удобоукладываемости смеси проектным требованиям на протяжении всего периода формирования изделий. Удобоукладываемость необходимо определять на формовочном посту не реже 1 раза в смену.

8.6. Контроль за тепловлажностной обработкой необходимо производить в соответствии с «Руководством по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий» (М.: Стройиздат, 1974) с учетом рекомендаций п. 7 Настоящих Рекомендаций.

8.7. Выходной контроль и оценку качества бетона следует осуществлять по действующим стандартам, в том числе прочности – по ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 17624-2012, ГОСТ 22690-2015, ГОСТ 18105-2018; морозостойкости – по ГОСТ 10060-2012, водонепроницаемости - по ГОСТ 12730.5-2018, водопоглощения – по ГОСТ 12730.3-78.

8.8. Металлические формы для образцов должны соответствовать требованиям ГОСТ 22685-89. Неплоскостность опорных граней контрольных образцов, неточная установка и неплотное примыкание их опорных граней к плитам пресса при испытании на сжатие могут существенно снизить прочность х бетонов на 1...2 класса.

8.9. Изделия и конструкции из пластифицированных бетонов должны соответствовать требованиям ГОСТ 13015-2012.

Маркировку изделий и конструкций следует осуществлять по ГОСТ 13015-2012.

9. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

9.1. При изготовлении изделий из бетонов следует соблюдать правила приказа № 883н от 11.12.2020 «Об утверждении Правил по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте».

9.2. Перед допуском к работе обслуживающий персонал должен пройти соответствующий инструктаж по технике безопасности.

Специалисты, занятые приготовлением растворов, должны работать в спецодежде из водоотталкивающей ткани, резиновых сапогах и перчатках; защитная одежда должна удовлетворять требованиям действующих стандартов.

Не следует допускать к приготовлению растворов лиц с поврежденным кожным покровом (ссадинами, ожогами, царапинами) и лиц, не достигших 18-летнего возраста.

9.3. При попадании раствора Sika® ViscoCrete®-24 HE на кожу необходимо смыть его теплой водой, а при попадании в глаза или на слизистую оболочку – немедленно промыть большим количеством воды и обратиться за медицинской помощью.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ПОСЛЕ ТВО

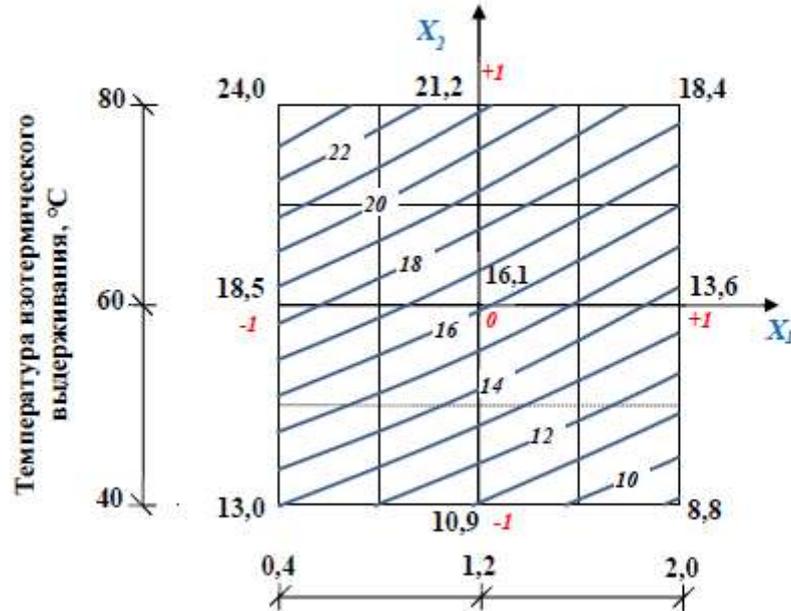


Рис. 1. Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки Sika Viscocrete 24 HE (координата X_1) и температуры изотермического выдерживания (координата X_2) при режиме ТВО (0-6-2) ч без предварительной выдержки

При доверительной вероятности 95 % уравнение регрессии имеет вид:
 $Y = 16,05 - 2,47 X_1 + 5,15 X_2 - 0,37 X_1 X_2$

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена					
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$
		0,05	2	9	0,25
0,25 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется			

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)					
$S_{(Y)}^2 =$	0,11	$S_{эм} =$	0,33	α	f
				0,05	18
				t	Λ
				2,104	4

Проверка адекватности модели по критерию Фишера					
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{на}^2$	α	f_1	f_2
		0,24	0,05	5	18
				$F_{эм} =$	2,786
2,18 < 2,786		Условие $F_{эм} < F_{табл.}$ выполняется			

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

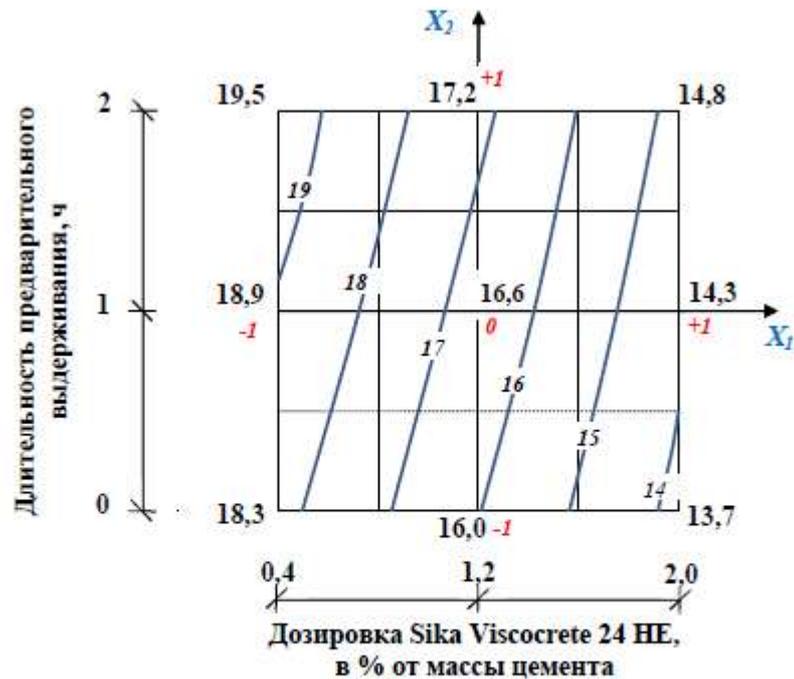


Рис. 2. Диаграмма предела прочности при сжатии (в МПа) в момент распалубки тяжелого бетона в зависимости от дозировки Sika Viscocrete 24 HE (координата X_1) и длительности предварительного выдерживания (координата X_2) при изотермическом прогреве ТВО в течение 6 ч при 60°C

При доверительной вероятности 95 % уравнение регрессии имеет вид:
 $Y = 16,59 - 2,32 X_1 + 0,58 X_2$

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена					
$G_{табл.} =$	0,4775	α	f	N	$G_{расч.} =$
		0,05	2	9	0,19
0,19 < 0,4775		Условие $G_{расч.} < G_{табл.}$ выполняется			

Оценка значимости коэффициентов уравнения (критерий Стьюдента)					
$S^2_{(r)}$	0,11	$S_{эв} =$	0,55	α	f
				0,05	18
				t	Δ
				2,104	3

Проверка адекватности модели по критерию Фишера					
$F_{табл.} =$	2,786	$S_{ка}^2$	α	f_1	f_2
		0,11	0,05	6	18
				$F_{эв} =$	0,77
0,77 < 2,786		Условие $F_{эв} < F_{табл.}$ выполняется			

Вывод: исследуемая математическая модель адекватна

Приложение 2

**ПЕРЕЧЕНЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ, ТРЕБОВАНИЯ КОТОРЫХ
УЧЕНЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАСТОЯЩИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ**

ГОСТ 10178-85	Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия (С Изменениями N 1, 2)
ГОСТ 31108-2016	Цементы общестроительные. Технические условия
ГОСТ 310.4-81	Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии
ГОСТ 310.1-76	Цементы. Методы испытаний. Общие положения (с Изменением N 1)
ГОСТ 8735-88	Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой)
ГОСТ 8736-2014	Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправкой)
ГОСТ 8267-93	Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4)
ГОСТ 8269.0-97	Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправками)
ГОСТ 24211-2008	Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия (с Изменением N 1) (с Поправкой)
ГОСТ 10180-2012	Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам
ГОСТ 10181-2014	Смеси бетонные. Методы испытаний
ГОСТ 13015-2012	Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения (Переиздание)
ГОСТ 17625-83	Конструкция и изделия железобетонные. Радиационный метод определения толщины защитного слоя бетона, размеров и расположения арматуры
ГОСТ 18105-2018	Бетоны. Правила контроля и оценки прочности
ГОСТ 17624-2012	Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности (с Поправкой)
ГОСТ 22690-2015	Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля
ГОСТ 10060-2012	Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Поправками)
ГОСТ 12730.5-2018	Бетоны. Методы определения водонепроницаемости
ГОСТ 12730.3-2020	Бетоны. Метод определения водопоглощения
ГОСТ 22685-89	Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия
ГОСТ 23732-2012	Вода для бетонов и растворов. Технические условия
ГОСТ Р 57997-2017	Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия
СП 63.13330.2012	Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями N 1, 2, 3)
Приказ Минтруда России № 883н от 11.12.2020 г	Об утверждении Правил по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте