

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.97:691.32

DOI 10.52928/2070-1683-2025-43-4-2-12

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА
ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С КОМПЛЕКСНЫМИ ДОБАВКАМИ
НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ*канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА¹⁾,**В.В. МАРКОВЦОВА²⁾,**д-р техн. наук, проф. С.Ж. РАЗЗАКОВ³⁾**(^{1), 2)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,**³⁾ Намаганский государственный технический университет)*

В статье приводятся параметры низкотемпературных режимов ТВО бетонов с комплексными добавками, включающими поликарбоксилатный суперпластификатор и воздухововлекающую добавку. Установлено, что применение в составе бетона поликарбоксилатного суперпластификатора и воздухововлекающей добавки делает возможным снижение длительности изотермического прогрева с 5 часов до 3 часов и температуры изотермического прогрева с 60 °С до 40 °С, при этом обеспечивая высокую интенсивность твердения и набор прочности через 7 суток 80–84% от проектной, а в возрасте 28 суток на 15–20% выше прочности бездобавочного бетона, твердевшего в воздушно-сухих условиях. Комплексная добавка, включающая Хидетал ГП-9-Альфа и Хидетал П8, более эффективна при низкотемпературной ТВО по сравнению с комплексной добавкой Стахемент 2000М и Микропоран. Показано, что поликарбоксилатные суперпластификаторы делают возможным применение сокращенных и низкотемпературных режимов ТВО, что позволит снизить энергозатраты и риск появления структурных дефектов.

Ключевые слова: тяжелые бетоны, тепловлажностная обработка, изотермический прогрев, интенсификация твердения, поликарбоксилатный суперпластификатор, воздухововлекающая добавка.

Введение. Теоретические положения и практические аспекты тепловлажностной обработки бетона (ТВО) достаточно изучены и широко представлены в научных публикациях отечественных и зарубежных авторов. В научных работах определены основные этапы и технологические параметры тепловлажностной обработки и их влияние на формирование микроструктуры, прочностные характеристики и долговечность цементного камня и бетона [1–6]. Нормативные документы СП 5.03.02-2021¹ и П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017² содержат рекомендации по выбору режимов ТВО в зависимости от свойств применяемого цемента, вида бетона, теплофизических и геометрических характеристик изделий, конструкции агрегата и характеристик теплоносителя.

Ключевым критерием при назначении режимов ТВО выступает формирование бездефектной структуры бетона, способной обеспечить требуемый уровень долговечности и устойчивости к внешним агрессивным воздействиям. Ведущие исследователи в области строительного материаловедения, в частности Баженов Ю.М., Миронов С.А., Малинина Л.А., Блещик Н.П., Бибики М.С., Бабицкий В.В., Ушерев-Маршак А.В., делают акцент на том, что структурная однородность и минимизация внутренних напряжений, возникающих в процессе термообработки, определяют долгосрочную стойкость бетона к коррозионным и другим эксплуатационным факторам [1–6]. Современные исследования подтверждают, что неоптимальные режимы ТВО могут приводить к образованию микротрещин, увеличению пористости и снижению сцепления цементного камня с заполнителем, замедленному образованию этtringита, что ухудшает долговечность бетона [7–10].

Анализ публикационной активности, выполненный по данным российской научной электронной библиотеки eLibrary.ru, свидетельствует о сохраняющемся научном интересе к процессам тепловлажностной обработки, несмотря на их относительную изученность. По запросу «тепловлажностная обработка бетона» за период с 2020 по 2025 год найдено 163 публикации, из них: опубликовано в журналах – 101 статья, в сборниках конференций – 62 статьи, выполнены две диссертационные работы. Это указывает на актуальность проблемы и продолжающуюся научную дискуссию вокруг оптимизации технологических параметров ТВО.

¹ СП 5.03.02-2021. Изготовление бетонных и железобетонных изделий // М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Введ. 01.07.2021. – Минск, 2021. – 16 с.

² П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017. Тепловлажностная обработка изделий сборных бетонных и железобетонных // РУП «Стройтехнорм». – Введ. 29.03.2018. – Минск, 2018. – 66 с.

Новый рост исследований в данной области связан с широким внедрением в технологию бетонов суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров. Согласно данным eLibrary.ru, за последние пять лет опубликовано 98 статей, посвященных изучению влияния данного вида химических добавок на физико-механические свойства бетонов, в том числе в условиях ТВО.

Сулейманова Л.А. и др. [11] отмечают, что химические добавки на поликарбоксилатной основе, позволяют получать высокотехнологичные бетоны с высокой подвижностью и стойкостью к расслаиванию, с низкой пористостью, более высокими физико-механическими характеристиками и качеством поверхности готовых изделий.

Механизм влияния добавок суперпластификаторов на свойства бетона связан с их химической природой, что достаточно подробно раскрыто в работе Юхневского П.И. [12]. Суперпластификаторы в зависимости от химического состава подразделяют на четыре группы: 1) сульфированные меламинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе; 2) сульфированные нафталинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе; 3) модифицированные лигносульфонаты; 4) производные полиоксикарбоновых кислот. Отмечается, что суперпластификаторы нафталинформальдегидного типа приводят к большему замедлению схватывания по сравнению с суперпластификаторами на меламиновой или поликарбоксилатной основе [12], что необходимо учитывать при назначении длительности режимов тепловлажностной обработки.

Халиков Р.М. и др. [13] физико-химический механизм молекулярного воздействия химических добавок на поликарбоксилатной основе описывают следующим образом: взаимодействие «якорных» функциональных групп полиакриловой кислоты с катионами твердой фазы цементных микрочастиц, фрактальных кластеров гидросиликатов кальция и одновременной стерической стабилизацией полиэтиленгликольными радикалами. Данный механизм воздействия, по мнению авторов исследования [13], придает необходимые реологические характеристики модифицированному цементному вяжущему и обеспечивает эффективность химическим добавкам на поликарбоксилатной основе.

В процессе исследований [14], было установлено, что вещественный состав пластифицирующих добавок также влияет на величину усадочных деформаций. Наименьшие значения влажностной усадки получены для систем с добавками на основе поликарбоксилатных эфиров, наибольшие – для систем с добавками на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов.

Корянова Ю., Несветаев Г. в ходе проведенных исследований [15] показали, что анализ влияния суперпластификаторов на пористость, прочность и деформационные свойства цементного камня позволяет выполнить предварительную оценку «совместимости» конкретного цемента с конкретным суперпластификатором, в том числе с учетом температурных условий.

Лешканов А.Ю.³, анализируя влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на гидратацию цемента, отмечает, что поликарбоксилатный суперпластификатор 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 еще за счет определенной структуры он позволяет набирать высокую механическую прочность цементных систем.

В результате анализа ряда публикаций были выделены проблемы, которые возникают при тепловлажностной обработке бетонов с добавками на поликарбоксилатной основе. В работе [16] выявлено негативное воздействие высокой температуры, выражаемое в снижении прочности бетона, которое в большей степени проявлялось для составов с высоким расходом пластификатора на поликарбоксилатной основе. Отмечается, что для устранения негативного влияния высокой температуры на прочность бетона момент начала теплового воздействия должен совпадать с завершением индукционного (подготовительного) периода в цементном тесте. В итоге авторы работы пришли к выводу, что параметры термообработки должны иметь следующие значения: длительность предварительного выдерживания не менее пяти часов, скорость подъема температуры не более 10 °С/ч, температура изотермического обогрева не более 50 °С.

Исследования прочности бетонных смесей с пластификатором на основе поликарбоксилатного эфира Glenium® 51, представленные в работе [17], показали, что превышение содержания добавки более 0,5% от массы цемента существенно замедляет рост ранней прочности, и это необходимо учитывать при назначении режимов тепловлажностной обработки.

Анализ научной литературы показал, что несмотря на значительное количество научных публикаций, посвященных пластифицирующим добавкам, сведения о режимах тепловлажностной обработки представлены фрагментарно и в основном касаются бетонов с традиционными добавками [18; 19], а рекомендации по ТВО^{4,5} имеют преимущественно общий характер.

³ Лешканов А.Ю. Пластифицированные бетоны с высокой ранней прочностью, получаемые при использовании сокращенных низкотемпературных режимов тепловлажностной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5. – М., 2021. – 209 л.

⁴ ОСН-АПК 2.10.32.001-04. Инструкция по применению химических добавок в бетонах и растворах для сельского строительства. – М., 2004. – 85 с.

⁵ Рекомендации по применению специальных химических добавок для управления физико-механическими и технологическими свойствами бетонов и растворов. – М., 1984. – 18 с.

Обобщенные сведения по режимам тепловлажностной обработки бетонов с пластифицирующими добавками представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Рекомендации по тепловлажностной обработке модифицированного бетона из различных источников

Наименование суперпластификатора	Химический состав	Рекомендации по тепловлажностной обработке модифицированного бетона	Источник
Суперпластификатор «Полипласт СП-1»	смесь натриевых солей полиметиленнафталинсульфо-кислот различной молекулярной массы	рекомендуется изотермический прогрев выполнять при температуре не выше 80 °С	[17, с. 11]
Суперпластификатор «Полипласт СП-3»	смесь натриевых солей полиметиленнафталин-сульфокислот различной молекулярной массы, лигно-сульфонатов технических, промышленной смеси тиосульфата и роданида натрия	время предварительной выдержки принимать не менее 4 ч; скорость подъема температуры принимать не более 10...15 °С/ч; изотермический прогрев осуществлять при температуре не более 70 °С	[17, с. 12]
ЛСТ	смесь натриевых солей лигносульфоновых кислот	режимы ТВО: 3 + 3 + 5 + 2 при максимальной температуре 70 °С для бетонов с F до 300 или с W до 8; 3 + 3 + 6 + 2 при максимальной температуре 80 ... 85 °С для бетонов на портландцемент-тах при отсутствии специальных требований по морозостойкости или плотности	[19]
Эдванс Ферро	суперпластификатор на поликарбонкислотной основе	интенсивное твердение бетона при тепловой обработке, в том числе при сниженных температурах изотермической выдержки	[17, с. 15]

Отмечается⁶, что при использовании пластифицирующих, пластифицирующе-воздухововлекающих, воздухововлекающих и микрогазообразующих добавок может возникнуть необходимость удлинения режима тепловой обработки. Применение пластифицирующих, пластифицирующе-воздухововлекающих добавок без удлинения цикла тепловой обработки возможно в том случае, если он составляет не менее 13...14 ч для бетонов на портландцементе. При этом изделия и конструкции до тепловой обработки выдерживаются не менее 2 ч, а скорость подъема температуры не превышает 20 °С/ч; при меньшем предварительном выдерживании скорость подъема температуры назначается не более 15 °С/ч.

Указывается на то, что применение традиционных суперпластификаторов – в частности, модифицированных лигносульфонатов, а также продуктов поликонденсации меламина и формальдегида – в сочетании с тепловлажностной обработкой обеспечивает лишь незначительный прирост прочности бетона на ранних сроках твердения. При применении таких добавок требуется длительный изотермический прогрев при высоких температурах (до 80–90 °С) и не допускается сокращение отдельных этапов режима пропаривания из-за удлинения индукционного периода гидратации цемента, обусловленного адсорбцией молекул добавок на поверхности клинкерных минералов⁷ [18].

Для новейших суперпластификаторов на основе поликарбонкислотных эфиров отмечается возможность применения низкотемпературных режимов ТВО⁸ [20]. Лешкановым А.Ю.⁹ разработан низкотемпературный режим с продолжительностью ТВО 8 часов, 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, обеспечивающего распалубочную прочность до 70% от марочной.

Смирновой О.М. [20] проведены исследования и определены параметры низкотемпературной обработки бетона паром с поликарбонкислотным суперпластификатором: Стахемент 2026: продолжительность предварительной выдержки 2,5–3 часа, скорость повышения температуры 7 °С/час, температура изотермической выдержки 40–50 °С.

При назначении режимов тепловлажностной обработки важным этапом является учет влияния добавок на физико-механические и реологические свойства цемента. В работе Зеленковской Ж.Л. [21] предложена зависимость, позволяющая рассчитывать длительность предварительной выдержки бетона с учетом вида и содержания химических добавок. Влияние пластифицирующих добавок предложено учитывать двумя коэффициентами и дозировкой добавки. При этом эффективность пластифицирующей добавки не учитывается, поскольку коэффициенты предлагается принимать с постоянным значением.

⁶ См. сноски 4, 5.

⁷ См. сноску 4.

⁸ См. сноску 3.

⁹ См. сноску 3.

$$\tau_{пв} = 0,6 \exp(0,5G_{rc}) + \frac{[3,0 \exp(0,3G_{rc})](1 + b_{пввв} V_{возд}^{m_{пввв}})}{(1 + D_{ус})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times (1 + b_{пвпл} D_{пл}^{m_{пвпл}}) \left(\frac{B}{C} - 0,2\right)^{n_{пл}}}{(1 + D_{ус})},$$

где G_{rc} – группа цемента по эффективности при пропаривании;

$b_{пввв}$, $m_{пввв}$ – коэффициенты, зависящие от вида воздухововлекающей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,5 и 1,5);

$b_{пвпл}$, $m_{пвпл}$ – то же от вида пластифицирующей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,7 и 1,3);

$V_{возд}$ – объем вовлеченного в бетонную смесь воздуха при введении воздухововлекающей добавки, % по объему;

$D_{пл}$, $D_{ус}$ – дозировка пластифицирующей добавки и ускорителя твердения, % от массы цемента по сухому веществу;

$n_{пл}$ – показатель степени (может быть принят равным 2,0).

Зависимости, полученные в ходе исследований [21], позволили авторам работы рассчитать кинетику изменения относительной (в % от проектной) прочности бетона. Расчёты по предложенной методике показали, что при длительности изотермической выдержки 4–6 часов относительная прочность бетона I группы пропаривания может достигать 40% при температуре 40 °С и увеличиваться до 60% при температуре 60 °С. Максимальные значения относительной прочности 70–80% от прочности бетона в проектном возрасте 50 МПа могут быть получены при температуре изотермической выдержки 80 °С. Показано, что при длительности изотермической выдержки более 6 часов интенсивность нарастания прочности снижается. Сопоставляя результаты исследований [16; 17] с результатами, представленными в работе [21], можно сделать вывод о невозможности использования данной методики для прогнозирования прочности бетона с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров.

В нормативной литературе, в частности П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017¹⁰, при назначении режимов тепловлажностной обработки бетона влияние модификаторов бетона также рекомендуется учитывать через расчет двух коэффициентов $K_{f,m1}$ и $K_{f,m2}$, характеризующих отношение кубиковой прочности бетона на сжатие, твердеющего в нормальных температурно-влажностных условиях в течение соответственно 1 и 2 сут., с химическими добавками, к соответствующей прочности бетона без добавок. Только для трех пластифицирующих добавок С-3, ЛСТМ-2, ЛСТ эти коэффициенты могут быть определены по формулам, приведенным в нормативном документе¹¹. Для суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров формулы для расчетов не представлены, следовательно, режимы ТВО могут быть установлены только экспериментальным путем.

Обобщение данных выше приведенных исследований позволяет выделить следующие общие подходы при назначении режимов ТВО бетонов с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров: длительность предварительного выдерживания $3 \div 6$ часов, скорость подъема температуры не более 10 °С/час, температура изотермического прогрева 40 °С ÷ 60 °С, содержание добавки в бетоне не более 0,5% от массы цемента.

Целью выполнения данного исследования является определение эффективности низкотемпературных режимов тепловой обработки бетонов класса $C^{32/40}$ с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров и комплексными добавками на их основе.

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для приготовления бетонной смеси в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Кричевцементошифер» по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», ГОСТ 30515 «Цементы. Общие технические условия». Физико-механические характеристики портландцемента приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-механические характеристики портландцемента

Класс портландцемента	НГЦТ, %	Группа эффективности пропаривания	Средняя активность при пропаривании, МПа	Сроки схватывания, ч-мин		Минералогический состав клинкера, %			
				начало	конец	C ₃ S	C ₃ A	C ₂ S	C ₄ AF
ЦЕМ I 42,5Н	27,25	I	33,6	2 ²⁰	5 ⁰⁰	64,4	6,1	14,1	11,2

¹⁰ См. сноску 2.

¹¹ См. сноску 2.

В качестве крупного заполнителя использовался щебень производства РУПП «Гранит» по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». В качестве мелкого заполнителя в составе бетонной смеси применялся природный песок карьера «Боровое» производства филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементосифер», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Физико-механические характеристики щебня и песка представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Физико-механические характеристики заполнителей

Наименование показателя	Песок	Щебень
Истинная плотность, г/см ³	2,45	2,65
Насыпная плотность, кг/м ³	1507	1415
Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	2,40	0,9
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, %	–	20,2
Пустотность, %	39,2	47,8
Влажность, %	3,2	4,3
Модуль крупности	2,20	–
Размер фракции, мм	–	5-20
Марка по дробимости	–	1400

В качестве модифицирующих добавок использовались добавки производства СКТ-СТАНДАРТ («Торговый Дом «Хидетал»), ООО «Стахема-М», ЗАО «Группа компаний «ПЕНЕТРОН-РОССИЯ» по СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия».

Добавка Хидетал ГП-9-Альфа – это суперпластификатор 5-го поколения (гиперпластификатор) на основе эфиров поликарбоксилатов универсального применения. Основные свойства: водоредуцирование, пластификация. Дополнительные свойства: при водоредуцировании быстрый набор ранней прочности, повышение морозостойкости и водонепроницаемости. Пластификатор I группы. За счет высокой водоредуцирующей способности позволяет значительно сократить расход цемента с выходом на марочную прочность. Позволяет существенно сократить время и изменить режим ТВО. Снижает или полностью исключает водоотделение и расслоение на высокоподвижных смесях.

Добавка Хидетал П8 – воздухововлекающая добавка на основе комплекса амфотерных и анионных поверхностно-активных веществ. Добавка предназначена для повышения воздухоудержания и морозостойкости бетона, улучшает формуемость жестких бетонных смесей, позволяет улучшить уплотняемость, получить высококачественную поверхность изделий. Позволяет повысить объем растворной смеси на 10–15%, сохраняет при этом прочность за счет снижения количества воды.

Добавка Стахемент 2000М – гиперпластификатор на основе поликарбонатов (I группы). Повышает трещиностойкость, морозостойкость бетона, снижает усадку, повышает водонепроницаемость с получением W12 и выше. Добавка Стахемент 2000М позволяет изготавливать бетоны высоких марок (М 600 и более) по прочности на сжатие из высокопластичных (литых) бетонных смесей, увеличить подвижность с П1 до П5, повышать начальную и конечную прочность бетона, повышать плотность, морозостойкость, водонепроницаемость и другие физико-механические свойства бетона, снизить расход цемента на 20% и более.

Добавка Микропоран – воздухововлекающая добавка на основе абиетинных солей. В затвердевшем бетоне повышает морозостойкость и стойкость против воздействия химических средств для размораживания. В бетонной смеси или в растворе создаёт малые закрытые воздушные поры диаметром 10–300 мкм (так называемый эффективный воздух). Пores в свежеприготовленной смеси действуют как слабый пластификатор, в затвердевшем бетоне повышают морозостойкость и стойкость против воздействия химических средств для размораживания. Характеристика химических добавок приведена в таблице 4.

Таблица 4. – Характеристика химических добавок

Наименование показателя	Хидетал ГП-9-Альфа	Стахемент 200М	Хидетал П8	Микропоран
Документ по стандартизации	ТУ ВУ 490681049.005-2012	ТУ ВУ 800013176.004-2011	ТУ ВУ 490681049.003-2012	ТУ ВУ 800013176.002-2011
Внешний вид	Непрозрачная белая жидкость	Непрозрачная жидкость светло-коричневого цвета	Голубая жидкость	Прозрачная жидкость желтого цвета
Массовая доля сухих веществ, %, не менее	30,6	30,0	2,6	5,0
Плотность при 20 °С, кг/м ³	1,064	1,075	1,005	1,015
Водородный показатель (значение pH) раствора	4,5	5,9	7	9,1
Содержание хлор-ионов, %	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Рекомендуемая дозировка, % ввода	0,4–0,8	0,5–1,2	0,05–0,4	0,1–0,2

Добавка Пенетрон Адмикс относится к гидроизоляционным добавкам, позволяет увеличить марку бетона по водонепроницаемости и морозостойкости, выпускается в соответствии с ТУ ВУ 191081376.001-2015. Рекомендуемая дозировка 0,8–1,3%.

Для проведения исследований были составлены комплексы из химических добавок следующего состава:

- D1: Стахемент 2000М 1,0% от массы цемента; Микропоран 0,15% от массы цемента;
- D2: Хидетал ГП-9-Альфа 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента;
- D3: Хидетал ГП-9-Альфа 1,0% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента; Пенетрон Адмикс 1,3% от массы цемента.

Для определения прочности бетона изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм, которые подвергались ТВО при заданных режимах и далее твердели в воздушно-сухих условиях, после чего в возрасте 7 и 28 суток определялась прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012. Для определения прочности на сжатие использовался пресс гидравлический П-125. Подвижность бетонной смеси определялась по ГОСТ 10181-2014. Тепловлажностная обработка производилась в лабораторной камере по низкотемпературным режимам, отличающимся температурой и длительностью изотермического прогрева.

Результаты исследований. Составы бетона подбирались, исходя из обеспечения класса бетона $C^{32/40}$, марки по подвижности П2. При введении комплексных химических добавок компонентный состав контрольного состава бетонной смеси (СК) был откорректирован с учетом водоредуцирующего действия добавок суперпластификаторов. Подобранные составы бетонных смесей представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Составы бетонных смесей с комплексными химическими добавками

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/Ц	Обозначение комплексной добавки	Компонентный состав комплексной химической добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
	Ц	П	Щ	В				Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс		
СК	410	770	1050	200	2430	0,49	–	–	–	–	–	–	5	П2
С1	410	874	1050	160	2494	0,39	D1	–	–	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	–	7	П2
С1	410	874	1050	160	2494	0,39	D2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	–	–	–	8	П2
С2	450	800	1050	175	2475	0,39	D2	3,15 (0,7)	0,225 (0,05)	–	–	–	8	П2
С3	400	890	1050	155	2495	0,39	D3	4,00 (1,0)	0,20 (0,05)	–	–	5,20 (1,3)	5	П2

В качестве контрольного принят бетон без химических добавок (СК), твердеющий в воздушно-сухих условиях при температуре $t=18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности $W=60\%$, прочность которого составила в возрасте 7 сут. и 28 сут. соответственно 18,7 МПа и 48,8 МПа.

Общий цикл тепловлажностной обработки подразделяется на следующие периоды:

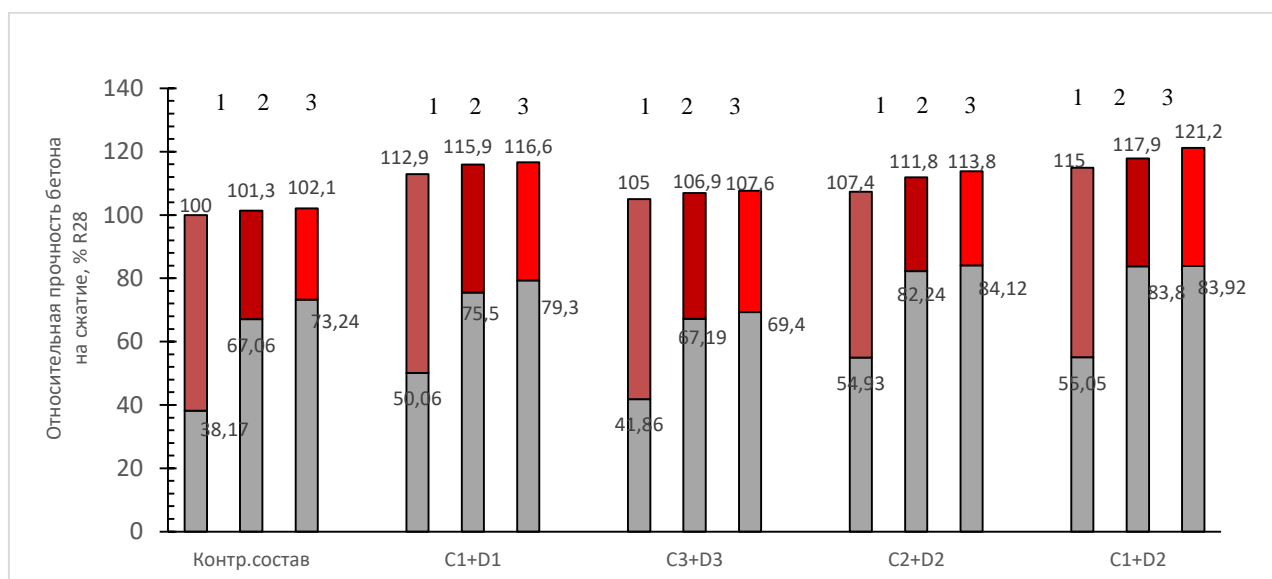
- от момента окончания формирования изделия до начала повышения температуры среды в камере – период предварительного выдерживания $\tau_{\text{пр.в}}$;
- от начала повышения температуры среды в камере до достижения заданного наивысшего уровня температуры – период подъема температуры $\tau_{\text{п}}$;
- выдерживание при наивысшей заданной температуре – период изотермического прогрева $\tau_{\text{из}}$;
- понижение температуры среды камеры – период охлаждения $\tau_{\text{ост}}$.

Согласно П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017¹² (см. таблицу 3) рекомендуемый режим тепловлажностной обработки для бетона класса $C^{32}/_{40}$, обеспечивающий достижение около 70% прочности бетона от проектной: 3+3+2. С учетом данных рекомендаций для проведения эксперимента приняты четыре трапециевидных режима тепловлажностной обработки (ТВО) длительностью 12 и 14 часов: время предварительного выдерживания – 4 ч; время подъема температуры – 3 ч; продолжительность изотермического прогрева при температуре 40 $^{\circ}\text{C}$ (60 $^{\circ}\text{C}$) – 3 ч и 5 ч и период охлаждения – 2 ч. Принятые режимы ТВО представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Режимы ТВО бетона, модифицированного комплексными добавками

Обозначение	Общий цикл ТВО	Температура изотермического прогрева, $^{\circ}\text{C}$
1	воздушно-сухие условия	температура $t=18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; влажность $W=60\%$
2	12 (4+3+3+2)	60
3	14 (4+3+5+2)	60
4	12 (4+3+3+2)	40
5	14 (4+3+5+2)	40

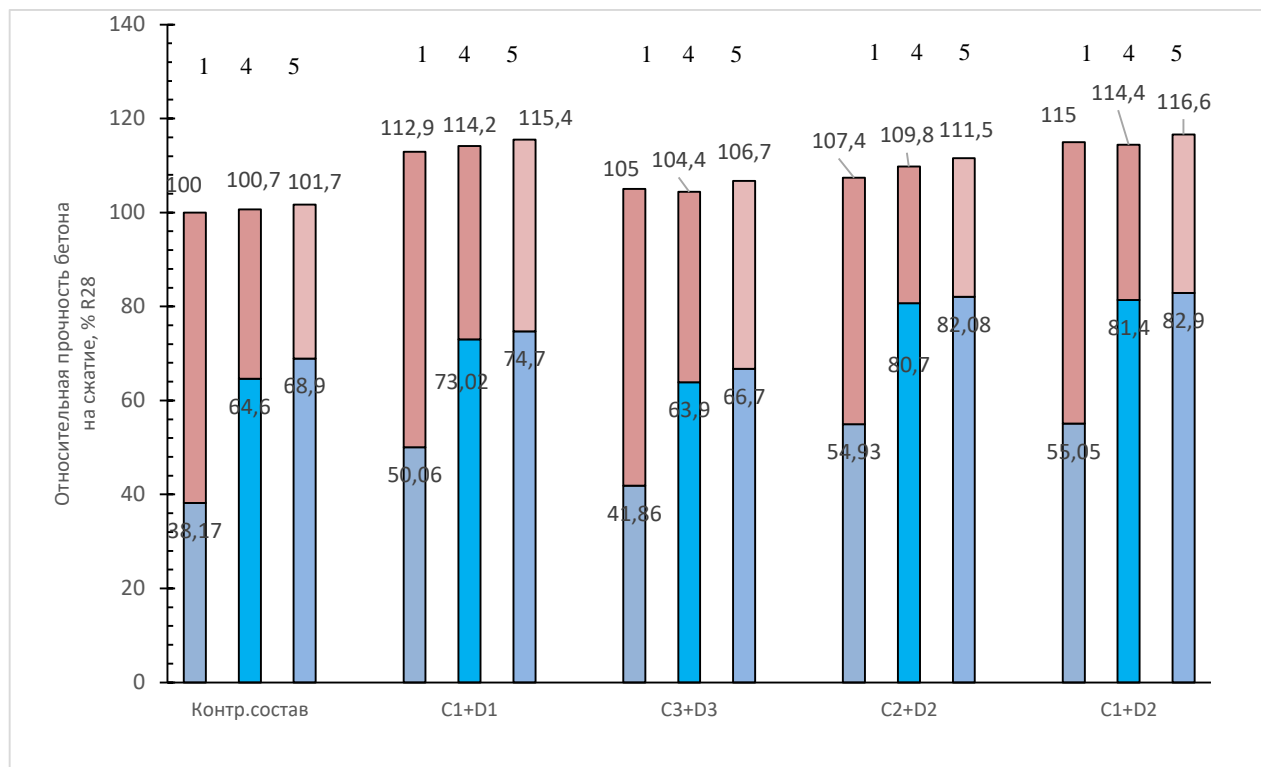
Влияние температуры и длительности изотермического прогрева на прочность модифицированного бетона представлены на графиках, которые построены в виде гистограмм с накоплением. Каждый столбик гистограммы состоит из двух частей, отражающих относительное значение прочности в возрасте 7 суток и 28 суток. Графики представлены на рисунках 1, 2.



1 – воздушно-сухие условия; 2 – ТВО: 4+3+3+2; 3 – ТВО: 4+3+5+2

Рисунок 1. – Прочность модифицированного бетона, в возрасте 7 (нижняя часть столбика) и 28 суток (верхняя часть столбика) после ТВО с температурой изотермического прогрева 60 $^{\circ}\text{C}$

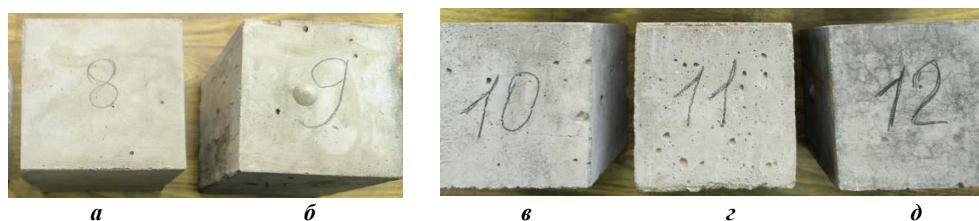
¹² См. сноску 2.



1 – воздушно-сухие условия; 4 – ТВО: 4+3+3+2; 5 – ТВО: 4+3+5+2

Рисунок 2. – Прочность модифицированного бетона, в возрасте 7 (нижняя часть столбика) и 28 суток (верхняя часть столбика) после ТВО с температурой изотермического прогрева 40 °С

Внешний вид образцов-кубиков после ТВО представлен на рисунке 3.



а – C1+D1; б – C3+D3; в – C2+D2; г – C1+D2; д – СК

Рисунок 3. – Примеры образцов-кубиков после ТВО: 4+3+5+2 при температуре изотермического прогрева 60 °С из бетона разных составов

Обсуждение. В ходе исследования установлено, что в возрасте 28 суток при твердении в воздушно-сухих условиях по сравнению с бездобавочным бетоном прочность на сжатие модифицированного бетона составов C1+D1, C3+D3, C2+D2, C1+D2 увеличилась соответственно на 12,9%, 5,0%, 7,4%, 15%, то есть наибольшее увеличение прочности обеспечивают комплексная добавка D1: Стахемент 2000М 1,0% от массы цемента; Микропоран 0,15% от массы цемента; и комплексная добавка D2: Хидетал ГП-9-Альфа 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента.

Установлено, что наиболее интенсивный набор прочности модифицированного бетона идет при выдерживании в условиях ТВО по режиму 3 при температуре изотермического прогрева 60 °С. В возрасте 7 суток для составов C1+D1, C3+D3, C2+D2, C1+D2 прочность модифицированного бетона была соответственно 79,3%, 69,4%, 84,1%, 83,9% от прочности бездобавочного бетона в возрасте 28 сут. при воздушно-сухих условиях твердения. В возрасте 28 суток прочность на сжатие модифицированного бетона превышала прочность бездобавочного бетона соответственно на 16,6%, 7,6%, 13,8%, 21,2%.

Следует отметить, что снижение температуры изотермического прогрева с 60 °С до 40 °С не привело к снижению интенсивности набора прочности. Так, прочность на сжатие бетона состава C1+D2 в возрасте 7, 28 суток после ТВО по режиму 5 была соответственно 82,9% и 116,6%; по режиму 3 соответственно 83,9% и 121,2% от прочности на сжатие бездобавочного бетона при воздушно-сухих условиях твердения.

Сокращение времени изотермического прогрева с 5 часов до 3 часов также существенно не повлияло на значение прочности на сжатие в возрасте 7 суток после ТВО. В частности, прочность бетона на сжатие состава C1+D2 в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 была соответственно 83,8 %, 83,9%; 81,4% и 82,9% прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения.

Комплексная добавка D1 показала худший результат по сравнению с комплексной добавкой D2. Прочность на сжатие бетона состава C1+D1 в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 была соответственно 75,5%, 79,3%; 73% и 74,7% прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения.

Наименьший прирост прочности после тепловлажностной обработки показал состав C3 с комплексной добавкой D3: в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 прочность была соответственно 67,2%, 69,4%; 63,9% и 66,7% от прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения. Полученные значения прочности находятся на уровне показателей для бездобавочного бетона, прочность которого в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 составляла соответственно 67,1%, 73,2%; 64,5% и 68,9% прочности на сжатие в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения. По сравнению с комплексной добавкой D2 в составе комплексной добавки D3 количество суперпластификатора Хидетал ГП-9-Альфа было увеличено с 0,7% до 1,0% от массы цемента, что, вероятно, привело к замедлению процесса гидратации из-за блокирования частиц цемента.

Следует отметить, что бездобавочный бетон контрольного состава после ТВО 4+3+5+2 при температуре изотермического прогрева 60 °С, в течение 7 суток набрал 73,2% от прочности в возрасте 28 суток при твердении в воздушно-сухих условиях, т.е. набор прочности после ТВО проходил почти в 2 раза быстрее.

Заключение. Несмотря на широкое внедрение поликарбоксилатных суперпластификаторов, действующие нормативные документы не содержат расчетных зависимостей для определения их влияния на физико-механические свойства цемента при определении режимов ТВО бетонов с такими добавками, что делает экспериментальный подход обязательным. Низкотемпературные режимы тепловлажностной обработки являются эффективным методом интенсификации твердения бездобавочных бетонов, позволяющим получить до 70% прочности на 7 сутки после ТВО при длительности изотермического прогрева 5 часов и температуре изотермического прогрева 60 °С. Применение комплексных добавок, включающих суперпластификатор на поликарбоксилатной основе и воздухововлекающую добавку, делает возможным обеспечение прочности до 80% на 7 сутки после ТВО при длительности изотермического прогрева 3 часа и при температуре изотермического прогрева 40 °С. Установлено, что наибольший набор прочности обеспечивает комплексная химическая добавка, включающая суперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа в количестве 0,7% от массы цемента и воздухововлекающую добавку Хидетал П8 в количестве 0,05% от массы цемента. Применение низкотемпературных режимов ТВО в сочетании с поликарбоксилатными суперпластификаторами и комплексными добавками на их основе позволяет достигать высоких прочностных характеристик, что особенно актуально для энергосберегающих и экологически ориентированных технологий в производстве сборного железобетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 2022. – 456 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/231595>.
2. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / Под ред. С.А. Миронова. – М.: Стройиздат, 1973. – 96 с.
3. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 158 с.
4. Блещик Н.П. Проектирование состава бетона и режима тепловой обработки железобетонных конструкций // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 37–42.
5. Библик М.С., Бабицкий В.В. Расчетно-экспериментальная методика оптимизации режима тепловлажностной обработки бетона // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 31–35.
6. Ушеров-Маршак А.В., Бабаевская Т.В., Циак М. Методологические аспекты современной технологии бетона // Бетон и железобетон. – 2002. – № 1. – С. 5–7.
7. Влияние времени и температуры твердения на структурообразование цементного камня / А.И. Гныря, Ю.А. Абзаев, С.В. Коробков и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 171–185.
8. Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement / X. Pang, L. Sun, M. Chen et al. // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 156. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106776.
9. Review on effect of steam curing on behavior of concrete / A.M. Zeyad, B.A. Tayeh, A. Adesina et al. // Cleaner Materials. – 2022. – Vol. 3. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100042.
10. A Review of the Effects of Raw Material Compositions and Steam Curing Regimes on the Performance and Microstructure of Precast Concrete / Y. Zhou, Y. Zhan, M. Zhu et al. // Materials. – 2022. – № 15. DOI: 10.3390/ma15082859.
11. Высокотехнологичные бетоны с использованием суперпластифицирующих добавок на основе поликарбоксилата / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, А.С. Слепухин и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 63–66.
12. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – 308 с.

13. The supramolecular impact mechanism of polycarboxylate superplasticizers on controlled hardening construction of nanocomposites / R.M. Khalikov, O.V. Ivanova, L.N. Korotkova et al. // *Nanotechnologies in construction*. – 2020. – № 12(5). – P. 250–255. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.
14. Шмитко Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. К вопросам взаимосвязи структуры добавок-пластификаторов с величиной влажностной усадки цементных систем // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2021. – № 11(755). – С. 134–144.
15. Koryanova Y., Nesvetaev G. About influence of some superplasticizers on hydration and the structure of hardened cement paste // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – № 129. DOI: 10.1051/mateconf/201712905017.
16. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А. Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона // *Строительные материалы*. – 2023. – № 4. – С. 35–41. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41.
17. Прочность жестких бетонных смесей с поликарбоксилатными пластификаторами / Л.М. Добшиц, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2020. – № 4. – С. 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6.
18. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с.
19. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона: монография. – М.: Палеотип, 2006. – 244 с.
20. Smirnova O.M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – № 102(2). DOI: 10.34910/MCE.102.13.
21. Зеленковская Ж.Л., Ковшар С.Н. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий // *Наука и техника*. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157.

REFERENCES

1. Bazhenov, Y. M. (2022). *Tekhnologiya betona [Concrete technology]* (6th ed., rev. and enl.). Moscow: ASV. <https://e.lanbook.com/book/231595> (In Russ.).
2. Mironov, S. A. (Eds.). (1973). *Rost prochnosti betona pri preparivani i posleduyushchem tverdenii [Strength gain of concrete during steam curing and subsequent hardening]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
3. Malinina, L. A. (1977). *Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona [Steam curing of heavyweight concrete]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
4. Bleshchik, N. P. (2006). Proektirovanie sostava betona i rezhima teplovoy obrabotki zhelezobetonnykh konstruktсий [Design of concrete mix and thermal curing regime for reinforced concrete structures]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]*, (3), 37–42. (In Russ.).
5. Bibik, M. S., & Babitskiy, V. V. (2012). Raschetno-eksperimental'naya metodika optimizatsii rezhima teplovlazhnostnoy obrabotki betona [Computational-experimental method for optimizing the steam curing regime of concrete]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]*, (1), 31–35. (In Russ.).
6. Usharov-Marshak, A. V., Babayevskaya, T. V., & Tsik, M. (2002). Metodologicheskie aspekty sovremennoy tekhnologii betona [Methodological aspects of modern concrete technology]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, (1), 5–7. (In Russ.).
7. Gnyrya, A. I., Abzaev, Y. A., Korobkov, S. V., & Gauss, K. S. (2018). Vliyanie vremeni i temperatury tverdeniya na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya [Influence of curing time and temperature on the structure formation of cement paste]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]*, 20(2), 171–185. (In Russ.).
8. Pang, X., Sun, L., Chen, M., Xian, M., Cheng, G., Liu, Y., & Qin, J. (2022). Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement. *Cement and Concrete Research*, (156), Article 106776. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106776.
9. Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., Adesina, A., Azevedo, A. R. G., Amin, M., Hadzima-Nyarko, M., & Agwa, I. S. (2022). Review on effect of steam curing on behavior of concrete. *Cleaner Materials*, (3), Article 100042. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100042.
10. Zhou, Y., Zhan, Y., Zhu, M., Wang, S., Liu, J., & Ning, N. (2022). A review of the effects of raw material compositions and steam curing regimes on the performance and microstructure of precast concrete. *Materials*, 15(8), Article 2859. DOI: 10.3390/ma15082859.
11. Suleymanova, L. A., Pogorelova, I. A., Slepukhin, A. S., & Plekhova, S. I. (2016). Vysokotekhnologichnye betony s ispol'zovaniyem superplastifikatsionnykh dobavok na osnove polikarboksilata [High-performance concretes using polycarboxylate-based superplasticizers]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]*, (9), 63–66. (In Russ.).
12. Yuhnevskiy, P. I. (2013). Vliyanie khimicheskoy prirody dobavok na svoystva betonov [Influence of the chemical nature of admixtures on concrete properties]. Minsk: Belarusian National Technical University. (In Russ.).
13. Khalikov, R. M., Ivanova, O. V., Korotkova, L. N., & Sinitsyn, D. A. (2020). Supramolekulyarnyy mekhanizm vliyaniya polikarboksilatnykh superplastifikatorov na upravlyаемое tverdeniye stroitel'nykh nanokompozitov [Supramolecular mechanism of polycarboxylate superplasticizers' influence on controlled hardening of construction nanocomposites]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in Construction]*, 12(5), 250–255. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.
14. Shmit'ko, E. I., Bel'kova, N. A., & Makushina, Y. V. (2021). K voprosam vzaimosvyazi struktury dobavok-plastifikatorov s velikinoy vlazhnostnoy usadki tsementnykh sistem [On the relationship of plasticizer admixtures and moisture shrinkage of cement systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]*, 11(755), 134–144. (In Russ.).
15. Koryanova, Y., & Nesvetaev, G. (2017). About influence of some superplasticizers on hydration and the structure of hardened cement paste. *MATEC Web of Conferences*, (129), Article 05017. DOI: 10.1051/mateconf/201712905017.

16. Kastornykh, L. I., Kaklyugin, A. V., & Gikalo, M. A. (2023). Vliyanie superplastifikatorov na osnove polikarboksilatov na effektivnost' termoobrabotki monolitnogo betona [Influence of polycarboxylate-based superplasticizers on the efficiency of thermal treatment of cast-in-place concrete]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (4), 35–41. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Dobshits, L. M., Anisimov, S. N., Smirnov, A. O., Leshkanov, A. Y., & Anisimova, A. A. (2020). Prochnost' zhestkikh betonnykh smesey s polikarboksilatnymi plastifikatorami [Strength of stiff concrete mixes with polycarboxylate plasticizers]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies]*, (4), 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6. (In Russ.).
18. Tarakanov, O. V. (2016). Khimicheskie dobavki v rastvory i betony [Chemical admixtures in mortars and concretes]. Penza: PGUAS. (In Russ.).
19. Izotov, V. S., & Sokolova, Y. A. (2006). *Khimicheskie dobavki dlya modifikatsii betona [Chemical admixtures for concrete modification]*. Moscow: Paleotip. (In Russ.).
20. Smirnova, O. M. (2021). Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers. *Magazine of Civil Engineering*, 102(2), Article 10213. DOI: 10.34910/MCE.102.13.
21. Zelenkovskaya, Z. L., & Kovshar, S. N. (2023). Naznachenie i obosnovaniye traditsionnykh rezhimov teplovoy obrabotki betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy [Design and justification of conventional thermal curing regimes for concrete and reinforced concrete products]. *Nauka i tekhnika [Science and Technology]*, 22(2), 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 15.12.2025

LOW-HEAT STEAMING TREATMENT OF HEAVY CONCRETE WITH COMPLEX ADDITIVES BASED ON POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZERS

L. PARFENOVA¹⁾, V. MARKOVTSOVA²⁾, S. RAZZAKOV³⁾

^(1), 2) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,*

³⁾ *Namangan State Technical University)*

This article presents the low-temperature hardening parameters of concrete with complex admixtures, including a polycarboxylate superplasticizer and an air-entraining admixture. It was found that the use of a polycarboxylate superplasticizer and an air-entraining admixture in concrete allows for a reduction in isothermal heating time from 5 hours to 3 hours and an isothermal heating temperature from 60°C to 40°C, while ensuring high hardening intensity and strength gain after 7 days of 80–84% of the design strength, and at 28 days, a 15–20% increase in the strength of air-dry concrete without the admixture. A complex admixture containing Hidetal GP-9-Alpha and Hidetal P8 is more effective in low-temperature hardening than the complex admixtures Stahement 2000M and Microporan. Polycarboxylate superplasticizers have been shown to enable the use of reduced and low-temperature HTT regimes, which will reduce energy costs and the risk of structural defects.

Keywords: heavy-duty concrete, heat-moisture treatment, isothermal heating, curing intensification, polycarboxylate superplasticizer, air-entraining admixture.