

УДК 666.9:691.32

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-38-45

**ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН МОРОЗОСТОЙКОСТЬЮ F400
С КОМПЛЕКСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ****В.В. МАРКОВЦОВА¹⁾, канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА²⁾,
канд. техн. наук, доц. Л.В. ЗАКРЕВСКАЯ³⁾****^{1), 2)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
³⁾ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых)**

В статье представлены результаты исследований влияния комплексных химических добавок на физико-механические свойства бетонов с учетом условий твердения. Экспериментально подтверждено, что комплексная добавка: гиперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, и воздухововлекающая добавка Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, позволяет получить бетон с более плотной структурой, способствует одинаково активному набору прочности бетона в ранние сроки в воздушно-сухих условиях твердения и при низкотемпературной тепловлажностной обработке, в возрасте 28 суток при твердении в условиях тепловлажностной обработки обеспечивает увеличение прочности бетона на 15%. Представлены новые экспериментальные данные об эффективности совместного использования гиперпластификатора Хидетал ГП-9-Альфа и воздухововлекающей добавки Хидетал П8 для получения бетонов класса С32/40 маркой по морозостойкости F 400.

Ключевые слова: тяжелые бетоны, физико-механические свойства, состав бетона, гиперпластификатор, воздухововлекающая добавка, комплексный модификатор, морозостойкость, ускоренный метод.

Введение. Разработка составов тяжелого бетона с повышенной эксплуатационной надежностью, т.е. высокой прочностью и повышенной морозостойкостью, на основе местных сырьевых ресурсов и широкой номенклатуры гиперпластификаторов и воздухововлекающих добавок, является сложной и многофакторной задачей для заводов ЖБИ, несмотря на известные физические и технологические основы проектирования составов, изложенные в работах Шейкина А.Е., Добшица Л.М., Кунцевича О.В., Миронова С.А. Шестоперова С.В. [1–5]. Анализ исследований [1–5] показывает, что морозостойкость цементного камня и бетона зависит от поровой структуры материала, а основными факторами, влияющими на ее формирование, являются: водоцементное соотношение, вид и характеристики цемента и заполнителя, режимы и условия твердения. Исследования, представленные в работах¹ [6–9], подтверждают, что для обеспечения морозостойкости структура бетона должна быть наполнена достаточным количеством резервных пор, а цементный камень и заполнитель, а также контактная зона по поверхности их раздела должны обладать необходимой прочностью, обеспечивающей сопротивление возникающим в бетоне деформациям. Ковшар С.Н.² анализируя влияние циклического замораживания и оттаивания на степень гидратации цемента делает вывод, что «интенсивность развития степени гидратации во времени прямо определяется величиной водоцементного отношения, а следовательно, и первоначальным запасом клинкера». Также установлено³, что кинетика изменения прочности цементного камня согласуется с изменением степени гидратации и среднего размера открытых капиллярных пор. По данным Несветаева Г.В. [6], условно закрытая пористость для бетонов с высокой морозостойкостью должна составлять не менее 3,5%, а величина открытой пористости не должна превышать 7%.

Приведенные в работе Красовского П.С. [7] положения свидетельствуют о том, что в структуре цементного камня можно выделить группу мелких пор размером 250–300 Å и группу капиллярных пор размером 0,1–1 мк. Отмечается [7], что размер и количество мелких пор определяется условиями формирования структуры, а размер и количество капиллярных пор зависит от удельной поверхности цемента, водоцементного отношения и времени твердения. Добшиц Л.М. [8], анализируя пути повышения долговечности бетона, подчеркивает, что «на величину морозостойкости бетонов оказывает влияние целый ряд факторов, однако определяющим является соотношение между объемами условно замкнутых и интегральных пор».

Влияние характеристик цемента на формирование пористости цементного камня изучалось Мироновым С.А., который в работе [4] отмечает, что наиболее морозостойким является портландцемент, содержащий 47–61% трехкальциевого силиката и 5–8% трехкальциевого алюмината, при этом глиноземистый и пуццоланизированные портландцементы показывают худшие результаты. Согласно Горчакову Г.И. [9], удельная поверхность цемента должна находиться в пределах 2800–3500 см²/г, также отмечается, что увеличение удельной поверхности приводит к снижению морозостойкости. Это подтверждено Шейкиным А.Е. [1], который экспериментально установил, что морозостойкость цементного камня снижается при использовании тонкомолотых цементов с удельной поверхностью равной 5000–6000 см²/г.

¹ Ковшар С.Н. Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деструктивных факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2010. – 23 с. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/3475>.

² См. сноску 1.

³ См. сноску 1.

Научные исследования свидетельствуют о снижении морозостойкости бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке, в сравнении с бетонами нормального твердения. По мнению Малининой Л.А. [10], морозостойкость определяется в первую очередь структурой бетона, а тепловая обработка изменяет ее, в большинстве случаев увеличивая общую пористость, делая поры сообщающимися. В работе [11] установлено, что общая пористость бетона, подвергнутого пропариванию, выше на 10,3÷21,6% относительно пористости непропаренных бетонов. На величину пористости влияет время предварительного выдерживания до пропаривания, скорости подъема температуры, температуры изотермического прогрева⁴ [10; 11].

Одним из требований к составу бетонов марок по морозостойкости F400 и F500, согласно рекомендациям⁵, является снижение расхода воды и обеспечение необходимого воздухоудержания, которое может быть достигнуто путем ввода химических добавок, пластифицирующего и воздухововлекающего действия. Исследованиями [12; 13] показано, что эффективными пластифицирующими добавками, снижающими водопотребность на 30% и более являются гиперпластификаторы. Особенностью гиперпластификаторов разных производителей являются различия в структуре молекул и химическом составе [13], отмечается также, что поликарбоксилаты обладают заметным воздухововлекающим действием, содержание воздуха в бетонной смеси может достигать 5% и более. В работе Шуддякова К.В.⁶ установлено, что замена пластификатора на основе нафталинформальдегида на пластификатор на основе поликарбоксилата обеспечивает увеличение марки по морозостойкости на 37%, обеспечивая получение марки по морозостойкости до F500. Экспериментальные данные [14] свидетельствуют о том, что бетон без воздухововлекающей добавки, но с использованием эффективного пластификатора Реламикс ПК, обеспечивал существенный рост плотности, непроницаемости и прочности и после 50...55 циклов снизил прочность до уровня 40...45 МПа. В работе [15] исследовалась морозостойкость цементного камня на основе цементов четырех заводов со следующими пластифицирующими добавками: Glenium 115 (на основе эфиров поликарбоксилатов), Glenium ACE 430 (на основе эфиров поликарбоксилатов), Glenium 323 MIX (на основе эфиров поликарбоксилатов и лигносульфонатов), Reobuild 181k (на основе нафталинсульфоната). Полученные результаты показали, что пластифицирующие добавки по-разному влияют на открытую и условно закрытую (резервную) пористость в зависимости от цемента, при этом явной зависимости пористости и морозостойкости нет [15]. Таким образом, при применении гиперпластификаторов с целью получения заданной морозостойкости требуется проведение исследований по установлению их влияния на свойства цементных композиций.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка на основе сырьевых материалов филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» составов модифицированных бетонов класса C32/40 и маркой по морозостойкости F 400 с изучением влияния комплексных добавок, состоящих из пластифицирующего и воздухововлекающего компонентов, и режимов твердения на прочностные характеристики бетона.

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения исследований использовались материалы, которые применяются на филиале «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» для изготовления сборных железобетонных конструкций. Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Кричевцементношифер» по ГОСТ 31108-2020. Физико-механические характеристики портландцементов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики портландцементов

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

Мелкий заполнитель: природный песок карьера «Боровое» производства филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» по ГОСТ 8736-2014, насыпная плотность 1507 кг/м³, плотность зерен 2450 кг/м³, содержание пылеватых и глинистых частиц 2,40%, пустотность 39,2%, влажность 3,2%, песок относится к группе средних, класс II, модуль крупности M_{кр}=2,20.

Крупный заполнитель: щебень фракции 5-20 производства РУПП «Гранит» по ГОСТ 8267-93, насыпная плотность 1415 кг/м³, марка щебня по прочности (дробимость) 1400, содержание пылеватых и глинистых частиц 0,9%,

⁴ Торопова М.В. Влияние тепловлажностной обработки на структурообразование и эксплуатационные свойства бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Иваново, 2002. – 19 с.

⁵ Указания по повышению морозостойкости транспортных сооружений. Рекомендации по приготовлению бетонов марок F400 и F500 для сборных конструкций, насыщаемых пресной водой / Орден Октябрьской революции научно-исследовательским институтом (НИИТСом); канд. техн. наук В.С. Гладков. – М.: Транстрой, 1993. – 33 с.

⁶ Шуддяков К.В. Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Пенза, 2021. – 24 с.

содержание зерен пластинчатой и игловатой формы 20,2%, марка по морозостойкости 300, щебень относится к 3 группе щебня по содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы.

Для затворения цементного теста и бетонной смеси использовалась вода, соответствующая требованиям СТБ 1114-98.

В качестве модифицирующих добавок использовались гиперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилата Хидетал ГП-9-Альфа по ТУ ВУ 490681049.005-2012 и Стахемент-2000М по ТУ ВУ 800013176.004-2011, воздухововлекающие добавки Хидетал П8 по ТУ ВУ 490681049.003-2012 и Микропоран по ТУ ВУ 800013176.002-2011, гидроизоляционная добавка Пенетрон Адмикс по ТУ ВУ 191081376.001-2015.

Для проведения исследований изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм. Прочность бетона на сжатие определялась по ГОСТ 10180-2012, подвижность бетонной смеси – по ГОСТ 10181-2014. По истечению 28 суток образцы-кубы испытывались на морозостойкость по третьему ускоренному методу. Образцы бетона перед испытанием на морозостойкость насыщались 5%-ным водным раствором хлористого натрия при температуре $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ по 4.11 ГОСТ 10060.0-95 в ванне для насыщения и оттаивания образцов (рисунок 1). Контрольные образцы через 2–4 ч после извлечения из раствора испытывались на сжатие. Основные образцы после насыщения подвергались испытаниям на замораживание и оттаивание. Для проведения испытаний использовался морозильник компрессионный ММ-164-80 МКШ-240. Для хранения контрольных образцов-кубов в течение 28 суток использовалась камера нормального твердения (КНТ) (рисунок 2). Взвешивание образцов выполнялось на технических электронных весах AD 05H. Перемешивание бетонной смеси производилось с использованием лабораторного бетоносмесителя LC Technic на 20 литров принудительного действия. Для определения прочности на сжатие использовались: пресс гидравлический П-125.



Рисунок 1. – Ванна для насыщения и оттаивания образцов



Рисунок 2. – Камера нормального твердения

Результаты и их обсуждение. Подбор состава бетона выполнялся в соответствии с нормативной документацией и требованиями к бетону, обеспечивающими класс С32/40 F400 для изготовления изделий, применяемых в климатических условиях, характеризующихся средней температурой наружного воздуха наиболее холодной пятидневкой в районе строительства ниже минус $40 ^\circ\text{C}$. Согласно СТБ 1544-2005, бетон класса С32/40 может применяться для сооружения объектов, эксплуатация которых подразумевает воздействие существенных нагрузок механического характера, таких как мостовые сооружения, эстакады для автомобильного транспорта, несущие конструкции в виде колонн, балок, перемычек и т.д. При подборе состава бетонных смесей были приняты во внимание вопросы обеспечения минимального расхода цемента из условий снижения энергоемкости и стоимости смеси, обеспечения удобоукладываемости, высокой плотности и прочности бетона на сжатие. Подобранный состав бетонной смеси, принятый в качестве контрольного состава, приведен в таблице 2.

Таблица 2. – Контрольный состав бетонной смеси

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/В
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5-20 мм, F300	Вода		
КБ	410	770	1050	200	2430	0,49

С целью получения бетонов с высокой морозостойкостью исследовались в качестве модификаторов комплексы добавок, включающие гиперпластификатор и воздухововлекающую добавку. Применение в исследованиях воздухововлекающих добавок в комплексе с гиперпластификаторами обусловлено механизмом действия воздухововлекающих добавок. Известно, что воздухововлекающие добавки не только гидрофобизируют поры и капилляры бетона, но способствуют формированию пор, размерами 50–250 мкм. Такие поры не заполняются водой при общем водопоглощении, но могут служить «резервными емкостями» для гашения внутренних напряжений, возникающих при замерзании воды. Воздухововлекающие добавки уменьшают расслоение бетонных смесей при их транспортировании, укладке и уплотнении [13].

Исследовалось водоредуцирующее действие комплексных химических добавок следующего состава:

- комплексная добавка № 1 (КМ № 1): Стахемент 2000М (гиперпластификатор), 1,0% от массы цемента; Микропоран (воздухововлекающая добавка), 0,15% от массы цемента;
- комплексная добавка № 2 (КМ № 2): Хидетал ГП-9-Альфа (гиперпластификатор), 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 (воздухововлекающая добавка), 0,05% от массы цемента;
- комплексная добавка № 3 (КМ № 3): Хидетал ГП-9-Альфа (гиперпластификатор), 1,0% от массы цемента; Хидетал П8 (воздухововлекающая добавка), 0,05% от массы цемента; Пенетрон Адмикс (гидроизоляционная добавка), 1,3% от массы цемента.

Подвижность бетонных смесей, модифицированных комплексными добавками, определялась по ГОСТ 10181. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Влияние комплексных добавок на подвижность бетонной смеси

Состав бетонной смеси	обозначение	Комплексная химическая добавка компонентный состав кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микро-поран	Пенетрон Адмикс		
КБ	-	-	-	-	-	-	5	П2
КБ	КМ № 1	-	-	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	-	21	П5
КБ	КМ № 2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	-	-	-	23	П5

Полученные экспериментальные данные показали, что введение в состав бетонной смеси комплексных добавок КМ № 1 и КМ № 2, состоящих из гиперпластификатора и воздухововлекающей добавки, позволяет увеличить подвижность бетонной смеси с 5 см (состав КБ) соответственно до 21 см и 23 см (КБ+КМ № 1, КБ+КМ № 2). Водоредуцирующее действие комплексных добавок использовали для снижения количества воды затворения. Составы бетонной смеси были откорректированы путем снижения количества воды затворения до уровня водовязущего отношения В/В = 0,39 и корректировки расхода цемента. Таким образом, для проведения дальнейших исследований использовались три состава бетонных смесей: состав КБ1 с расходом цемента 410 кг/м³, состав КБ2 с расходом цемента 450 кг/м³, состав КБ3 с расходом цемента 400 кг/м³. Составы бетонных смесей после корректировки приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Составы бетонных смесей с учетом водоредуцирующего действия комплексных химических добавок

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/В
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5–20 мм, F300	Вода		
КБ1	410	874	1050	160	2494	0,39
КБ2	450	800	1050	175	2475	0,39
КБ3	400	890	1050	155	2495	0,39

Результаты определения подвижности бетонных смесей откорректированных составов при введении комплексных химических добавок представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Подвижность модифицированных бетонных смесей со сниженным водовязущим отношением

Обозначение состава	Обозначение комплексной химической добавки	Компонентный состав комплексной химической добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс		
КБ1	КМ № 1	-	-	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	-	7	П2
КБ1	КМ № 2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	-	-	-	8	П2
КБ2	КМ № 2	3,15 (0,7)	0,225 (0,05)	-	-	-	8	П2
КБ3	КМ № 3	4,00 (1,0)	0,20 (0,05)	-	-	5,20 (1,3)	5	П2

Полученные результаты показали, что после снижения водовяжущего отношения с $V/B = 0,49$ до $V/B = 0,39$ осадка конуса бетонных смесей при введении комплексных химических добавок, содержащих гиперпластификатор и воздухововлекающую добавку, составляет 7–8 см, что обеспечивает требуемые технологические свойства бетонной смеси. Увеличение в составе КБ2 содержания цемента до 450 кг/м^3 незначительно повлияло на подвижность бетонной смеси, которая по сравнению с составом КБ1, содержащим 410 кг/м^3 , увеличилась на 1 см. Уменьшение в составе КБ3 содержания цемента до 400 кг/м^3 привело к снижению подвижности бетонной смеси до 5 см.

Далее были проведены испытания по определению прочности бетона на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 суток. Перед испытанием образцы взвешивались, определялись их геометрические размеры и рассчитывалась плотность бетона. Твердение образцов осуществлялось в следующих условиях:

- воздушно-сухие условия при температуре $t=18-20 \text{ }^\circ\text{C}$, влажности 60% (ВСУ);
- тепловлажностная обработка 10 часов по режиму 4+3+3: 4 часа – предварительная выдержка, 3 часа – подъем температуры, 3 часа – изотермический прогрев при температуре $t=60 \text{ }^\circ\text{C}$ (ТВО);
- нормально-влажностные условия при температуре $t=18 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности 90% в камере нормально-влажностного твердения (НВУ).

Результаты определения плотности и прочности на сжатие модифицированных бетонов представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Влияние комплексных добавок и режимов твердения на прочность и плотность бетона

Обозначение состава	Комплексная химическая добавка	Режим твердения	Плотность, кг/м^3 , в возрасте, суток			Прочность на сжатие, МПа (% от $R_{28 \text{ сут.}}$) % от $R_{\text{контр}}$, в возрасте, суток		
			7	14	28	7	14	28
КБ1	-	НВУ	2485	2488	2490	25,80 (51,6)	33,81 (67,6)	49,98 (100,00)
						100	100	100
КБ1	КМ № 1	ВСУ	2447	2449	2450	28,87 (51,2)	34,17 (60,6)	56,42 (100)
						111,9	101,09	112,98
		ТВО	2488	2490	2494	36,9 (65,1)	48,37 (85,4)	56,66 (100)
						143,0	143,1	113,4
КБ1	КМ № 2	ВСУ	2410	2415	2418	37,91 (66,9)	46,34 (81,8)	56,66 (100)
						146,9	137,1	113,4
		ТВО	2494	2492	2496	40,98 (71,1)	49,51 (85,9)	57,62 (100)
						158,8	146,4	115,3
КБ2	КМ № 2	ВСУ	2482	2484	2488	33,47 (61,4)	42,82 (78,6)	54,50 (100)
						129,7	126,6	109,0
		ТВО	2520	2518	2522	40,2 (73,5)	44,87 (82,1)	54,66 (100)
						155,8	132,7	109,4
КБ3	КМ № 3	ВСУ	2430	2432	2434	27,7 (53,1)	32,52 (62,3)	52,20 (100)
						107,4	96,2	104,4
		ТВО	2486	2488	2492	32,84 (62,8)	41,87 (80,1)	52,24 (100)
						127,4	123,8	104,5

Анализ полученных результатов показывает, что режимы твердения оказывают влияние на интенсивность набора прочности в ранние сроки твердения. Так, прочность бетона КБ1 с комплексной добавкой КМ № 1 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 51,2% и 60,6% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 65,1% и 85,4% соответственно.

Наибольшую эффективность при ТВО обеспечивает комплексная химическая добавка КМ № 2. Через 7 сут. и 14 сут. бетоны состава КБ1 и КБ2, модифицированные комплексной химической добавкой КМ № 2, после ТВО показали соответственно 71,1% и 85,9%; 73,5% и 82,1% от прочности бетона в возрасте 28 сут. Также установлено, что при применении комплексной химической добавки КМ № 2 условия твердения не оказывают существенного влияния на интенсивность набора прочности бетона. Так, прочность бетона КБ1 с комплексной добавкой КМ № 2 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 66,9% и 81,8% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 71,1% и 85,9% соответственно, разница между значениями прочности составила 4,2% и 4,1% соответственно.

Влияние условий твердения увеличивается при увеличении доли цемента в составе бетона. Так, прочность бетона КБ2 с комплексной добавкой КМ № 2 в возрасте 7 и 14 суток при твердении в воздушно-сухих условиях составила 61,4% и 78,6% соответственно, а при твердении в условиях ТВО составила 73,5% и 82,1% соответственно, при этом разница между значениями прочности увеличилась и составила 12,1% и 3,5%.

Исследуемые комплексы химических добавок обеспечивают разную интенсивность набора прочности бетона в ранние сроки твердения. Прочность бетона в возрасте 7 суток при твердении в воздушно-сухих условиях увеличивается от 7,4% при использовании комплексной добавки КМ № 3 до 46,9% при использовании комплексной добавки КМ № 2. Прочность бетона в возрасте 7 суток при твердении в условиях ТВО увеличивается от 27,4% при использовании комплексной добавки КМ № 3 до 58,8% при использовании комплексной добавки КМ № 2.

Комплексные химические добавки обеспечивают повышение прочности бетона в возрасте 28 суток, при этом условия твердения не оказывают существенного влияния. Так, прочность бетона на сжатие в возрасте 28 сут. с комплексными добавками КМ № 1, КМ № 2, КМ № 3 увеличивается на 13%, 9–15%, 4% соответственно.

По значениям прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток определены следующие классы бетона:

- С30/37 – бетон без комплексной добавки;
- С32/40 – бетоны с комплексными добавками при режиме твердения ВСУ;
- С32/40 – бетон с комплексными добавками при режиме твердения ТВО.

Таким образом, модификация бетона комплексными добавками при твердении в воздушно-сухих условиях и в условиях тепловлажностной обработки позволила повысить класс бетона по прочности на сжатие, по сравнению с немодифицированным бетоном.

Проведенные исследования показали, что комплексные химические добавки оказывают водоредуцирующее действие, и при снижении водоцементного отношения с 0,49 до 0,39 подвижность модифицированных бетонных смесей разработанных составов находится в пределах от 5 до 8 см по осадке конуса при рекомендуемом значении⁷ не более 6 см. Для проведения дальнейших исследований все составы были откорректированы под осадку конуса бетонной смеси 5 см, что обеспечит соблюдение технологических параметров бетонной смеси и позволит дополнительно уменьшить водоцементное отношение, величина которого, как показано в работе⁸, влияет на количество макропор, а следовательно, и на стойкость бетона к морозной деструкции. Составы бетонных смесей после корректировки по удобоукладываемости по осадке конуса представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Составы бетонных смесей для испытаний на морозостойкость

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				В/В	Химические добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)				
	портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	песок Мк=2,2	щебень гранитный, фр. 5–20 мм, F300	Вода		Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс
КБ1	410	874	1050	160	0,39	-	-	-	-	-
КБ1+КМ № 1	410	884	1050	155	0,37	-	-	4,10 (1,0%)	0,62 (0,15%)	-
КБ3+КМ № 3	400	890	1050	155	0,39	4,00 (1,0%)	0,20 (0,05%)	-	-	5,20 (1,3%)
КБ2+КМ № 2	450	855	1050	148	0,33	3,15 (0,7%)	0,225 (0,05%)	-	-	-
КБ1+КМ № 2	410	900	1050	140	0,34	2,87 (0,7%)	0,205 (0,05%)	-	-	-

Для определения морозостойкости бетона изготавливались образцы-кубики с ребром 100 мм, которые твердели в условиях ТВО 14 (4+3+5+2) и через 28 суток испытывались на морозостойкость по ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 10060.2-95. Образцы перед испытанием насыщались 5%-ным водным раствором хлористого натрия. Контрольные образцы бетона после насыщения испытывались на сжатие по ГОСТ 10180. Основные образцы модифицированного бетона после насыщения подвергались замораживанию и оттаиванию, число циклов определяли по таблице 3 ГОСТ 10060.0-95. Результаты испытаний на морозостойкость представлены в таблице 8.

⁷ См. сноску 5.

⁸ См. сноску 1.

Таблица 8. – Влияние комплексных химических добавок на морозостойкость бетона

Обозначение состава	Прочность на сжатие, МПа		Величина снижения прочности на сжатие, %		Соответствие СТБ 1544-2005
	контрольных образцов	после испытаний на морозостойкость F400	нормированное значение	фактическое значение	
КБ1	50,2	21,6	5	42,18	Не соотв.
КБ1+КМ № 1	56,6	42,4	5	25,1	Не соотв.
КБ3+КМ № 3	52,4	26,3	5	49,8	Не соотв.
КБ2+КМ № 2	54,6	54,8	5	-	Соотв.
КБ1+КМ № 2	57,0	55,1	5	3,3	Соотв.

В процессе испытаний на образцах-кубиках из бетона составов КБ1+КМ № 1 и КБ3+КМ № 3 появились трещины и сколы, шелушение ребер. После обнаружения данных дефектов испытания согласно ГОСТ 10060.0-95 были прекращены. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. – Состояние образцов-кубов после замораживания и оттаивания в течение 400 циклов для бетона, не прошедших испытания, для составов: а – КБ1+КМ № 1; б – КБ3+КМ № 3

Испытания на морозостойкость показали, что 400 циклов замораживания-оттаивания прошли бетоны, модифицированные комплексной добавкой, включающей Хидетал ГП-9-Альфа в количестве 0,7% от массы цемента и Хидетал П8 в количестве 0,05% от массы цемента в составе.

При допустимом по ГОСТ 10060.0-95 снижении прочности на сжатие 5% после 400 циклов замораживания-оттаивания снижение прочности на сжатие для составов КБ1+КМ № 2 и КБ2+КМ № 2 составило соответственно 3,3% и без снижения. Таким образом, составы бетонов КБ1+КМ № 2 и КБ2+КМ № 2 могут быть рекомендованы для изготовления бетонных и железобетонных изделий с показателем по морозостойкости F400. С точки зрения экономической целесообразности, наиболее эффективен состав КБ1+КМ № 2, где расход цемента на 9% ниже, по сравнению с составом КБ2+КМ № 2.

Заключение. Установлено, что выдерживание бетона, модифицированного комплексной добавкой «гиперпластификатор – воздухововлекающая добавка» в условиях тепловлажностной обработки позволяет повысить плотность бетона по сравнению с бетоном нормально-влажностного твердения, при этом формирование наиболее плотной структуры бетона после ТВО обеспечивает добавка Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, в комплексе с Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, при расходе цемента 450 кг/м³.

Комплексные добавки снижают влияние условий твердения модифицированного бетона. Бетон, модифицированный комплексной добавкой: Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, Хидетал П8, 0,05% от массы цемента, одинаково активно набирает прочность как в воздушно-сухих условиях твердения, так и в условиях ТВО, в возрасте 7 и 14 суток разница в прочности составляет 11,9% и 9,3%. Наибольшее увеличение прочности в возрасте 28 суток – на 15%, получено для бетона, выдержанного в условиях ТВО.

Определены два состава тяжелого бетона с комплексной добавкой: гиперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа, 0,7% от массы цемента, и воздухововлекающая добавка Хидетал П8, 0,05% от массы цемента. Расход материалов для состава 1: портландцемент «Кричевцементношифер» ЦЕМ I 42,5Н – 450 кг/м³; песок карьера «Боровое» – 855 кг/м³; гранитный щебень карьера «Микашевичи» – 1050 кг/м³; вода – 148 кг/м³. Расход материалов для состава 2: портландцемент «Кричевцементношифер» ЦЕМ I 42,5Н – 410 кг/м³; песок карьера «Боровое» – 900 кг/м³; гранитный щебень карьера «Микашевичи» – 1050 кг/м³; вода – 140 кг/м³. Составы позволяют получить тяжелый бетон класса С32/40, марки по морозостойкости F 400.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
2. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – Л.: Стройиздат, 1983. – 132 с.
3. Добшиц Л.М. Морозостойкость бетонов транспортных сооружений: учебное пособие. – М.: МИИТ, 1999. – 236 с.
4. Миронов С.А., Лагойда А.В. Бетоны, твердеющие на морозе. – М.: Стройиздат, 1975. – 263 с.
5. Шестоперов С.В. Технология бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 432 с.
6. Несветаев Г.В. Бетоны: учебно-справочное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. – 381 с.
7. Красовский П.С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов: учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. – 204 с.
8. Добшиц Л.М. Пути повышения долговечности бетонов // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 4–9.
9. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
10. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 158 с.
11. Плотникова Л.Г., Пичугин А.П., Веригин Ю.А. Влияние тепловой обработки на пористость бетона // Ползуновский Вестник. – 2012. – №1/2. – С. 93–97. – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2012_01_2/pdf/093plotnikova.pdf.
12. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: моногр. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с.
13. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – 308 с.
14. Батяновский Э.И., Гуриченко Н.С., Корсун А.Н. Повышение морозостойкости цементного бетона // Механика в технология илмий журналы. – 2022. – № 2(7). – С. 148–159.
15. О морозостойкости бетонов с суперпластификаторами [Электронный ресурс] / Г.В. Несветаев, И.В. Корчагин, Ю.Ю. Лопатина и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, № 5. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf>.

REFERENCES

1. Sheikin, A.E. & Dobshits, L.M. (1989). *Tsementnye betony vysokoi morozostoikosti*. Leningrad: Stroiizdat. (In Russ.).
2. Kuntsevich, O.V. (1983). *Betony vysokoi morozostoikosti dlya sooruzhenii Krainego Severa*. Leningrad: Stroiizdat. (In Russ.).
3. Dobshits, L.M. (1999.) *Morozostoikost' betonov transportnykh sooruzhenii: uchebnoe posobie*. Moscow: MIIT. (In Russ.).
4. Mironov, S.A. & Lagoida, A.V. (1975). *Betony, tverdeyushchie na morose*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
5. Shestoperov, S.V. (1977). *Tekhnologiya betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Nesvetaev, G.V. (2013). *Betony: uchebno-spravochnoe posobie*. Rostov-na-Donu: Feniks. (In Russ.).
7. Krasovskii, P.S. (2013). *Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya struktury tsementnykh betonov: ucheboe posobie*. Khabarovsk: DVGUPS. (In Russ.).
8. Dobshits, L.M. (2017). Puti povysheniya dolgovechnosti betonov [Ways to improve the durability of concretes]. *Stroitel'nye Materialy*, (10), 4–9. (In Russ., abstr.in Engl.).
9. Gorchakov, G.I. & Bazhenov, Yu.M. (1986). *Stroitel'nye materialy*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
10. Malinina, L.A. (1977). *Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
11. Plotnikova, L.G., Pichugin, A.P. & Verigin, Yu.A. (2012). Vliyaniye teplovoi obrabotki na poristost' betona. *Polzunovskii Vestnik*, (1/2), 93–97. (In Russ.). – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2012_01_2/pdf/093plotnikova.pdf.
12. Tarakanov, O.V. (2016). *Khimicheskie dobavki v rastvory i betony: monogr.* Penza: PGUAS. (In Russ.).
13. Yuhnevskii, P.I. (2013). *Vliyaniye khimicheskoi prirody dobavok na svoistva betonov*. Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
14. Batyanovskii, E.I., Gurinchenko, N.S. & Korsun, A.N. (2022). Povysheniye morozostoikosti tsementnogo betona. *Mekhanika va tekhnologiya ilmii zhurnali [Scientific Journal of Mechanics and Technology]*, 2(7), 148–159. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Nesvetaev, G.V., Korchagin, I.V., Lopatina, Yu.Yu. & Khalezin, S.V. (2016). O morozostoikosti betonov s superplastifikatorami [About frost resistance of concrete with superplasticizers]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 8(5). (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf>.

Поступила 30.09.2024

HEAVY-DUTY CONCRETE WITH FROST RESISTANCE F400 WITH COMPLEX CHEMICAL ADDITIVES

V. MARKOVTSOVA¹⁾, L. PARFENOVA²⁾, L. ZAKREVSAYA³⁾

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

³⁾ *Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs)*

The article presents the results of studies of the influence of complex chemical additives on the physical and mechanical properties of concrete, taking into account the curing conditions. It has been experimentally confirmed that the complex additive: the hyperplasticizer Hidetal GP-9-Alpha, 0,7% of the cement mass, and the air-entraining additive Hidetal P8, 0,05% of the cement mass, allows to obtain concrete with a denser structure, promotes equally active strength gain of concrete in the early stages under air-dry curing conditions and under low-temperature heat and humidity treatment, at the age of 28 days under curing under heat and humidity treatment provides an increase in concrete strength by 15%. New experimental data are presented on the efficiency of the combined use of the hyperplasticizer Hidetal GP-9-Alpha and the air-entraining additive Hidetal P8 for obtaining concrete of class C32/40 with frost resistance grade F 400.

Keywords: heavy concrete, physical and mechanical properties, concrete composition, hyperplasticizer, air-entraining additive, complex modifier, frost resistance, accelerated method.