

УДК 502/504 : 691.328.1

ХИМИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ В ТЕХНОЛОГИИ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Поступила 25.11.2015 г.

© **Б. А. Усов, Г. Э. Окольников**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», г. Москва

THE CHEMICAL ADDITIVES IN THE PREFABRICATED REINFORCED CONCRET TECHNOLOGY

Received Nonember 25, 2015

© **B. A. Usov, G. E. Okolnikova**

Moscow State University of Mechanical Engineering, Moscow

В статье приведены данные исследований бетонов с химическими добавками для сборного железобетона. К добавкам относятся ускорители твердения, комплексы на основе ускорителей, пластификаторов и воздухововлекающих добавок. Авторы статьи изучали влияние добавок электролитов (NaCl , Na_2SO_4 , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), комплексных добавок (на основе пластификаторов и электролитов, воздухововлекающей добавки СПД и микрокремнезема) на свойства бетонной смеси, прочность пропаренного бетона и некоторые его свойства. По ускоряющему эффекту изученные добавки электролитов располагались в последовательности: $\text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Отмечается, что нарастание прочности бетона с электролитами увеличивается с уменьшением продолжительности прогрева и содержания алюминатов в портландцементе, что позволяет на 40...50 % сократить режим прогрева бетона или на 5...15 % расход цемента. Комплексные добавки (на их основе), независимо от минералогии цемента оказываются более эффективными и позволяют сократить расход цемента на 10...15 %, суперпластификаторы – до 20 %, но при длительных режимах и независимо от вида портландцемента. В статье содержится материал с показателями прочности по различным режимам тепловлажностной обработки, приведены показатели сокращения расхода цемента и морозостойкость бетона при введении воздухововлекающих добавок. Установлена эмпирическая формула для расчета сокращения продолжительности изотермического прогрева режима при тепловой обработке бетона.

Ключевые слова: индукционный период гидратации, потенциальные возможности цемента, электролиты, воздухововлекающие добавки, капиллярно-пористая структура пропаренного бетона, ускорение твердения бетона.

Главными приоритетами заводов сборного железобетона являются повышение производительности технологических линий за счет ускорения твердения бетона при одновременном снижении энергозатрат при производстве бетонных и железобетонных изделий. Наиболее эффективным способом, ускоряющим процессы гидратации портландцемента и твердение бетона, считается индивидуальное воздействие теплового поля с повышением тем-

The article presents research data of concrete with chemical admixtures for precast concrete. To the additives are hardening accelerators, systems-based accelerators, plasticizers and air-entraining additives. The authors studied the effect of the addition of electrolytes (NaCl , Na_2SO_4 , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), complex additives (on the basis of the electrolytes and plasticizers, air-entraining additives SPD and mikrokremsnezema) on properties of concrete, strength of concrete steamed and some of its properties. By accelerating the effect of electrolyte additives studied were located in the sequence: $\text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. It is noted that the increase of concrete strength with electrolytes increases with decreasing the duration of heating and the content of aluminates in Portland cement, which allows for 40...50 % reduction in the warm-up of concrete or 5...15 % of cement consumption. Complex agent (on their basis), irrespective of the Mineralogy of the cement is more efficient and reduce the cement consumption by 10...15 %, superplasticizers up to 20 %, but long-term modes and regardless of the type of Portland cement. The article contains a material with strength in different curing regimes, the indicators of reduction of consumption of cement and frost resistance of concrete with the introduction of air-entraining additives. Empirical formula to calculate the reduction of the duration of isothermal heating regime during heat treatment of concrete.

Keywords: the induction period of hydration, the potential of cement, electrolytes, air-entraining additives, capillary - porous structure of concrete steamed, accelerated hardening of concrete.

пературы от 20 до 80...90 °С в тепловых агрегатах (камерах) через различные теплоносители: пар, паровоздушную или парогазовую среду (с чередованием воздействия пара и продуктов сгорания газа), причем в средах: с обычным или избыточным давлением; с переменной или регулируемой влажностью пара и, наконец в печах аэродинамического подогрева.

Правильное назначение режимов тепловой обработки определяется, по

существо, двумя условиями бетоноведения:

а) оптимальным использованием в составе бетона потенциальных возможностей цемента (степени его гидратации) к моменту распалубки (также для монолитных конструкций) и отправки изделий на склад готовой продукции;

б) получении капиллярной пористой структуры у прогретого бетона с наименьшими нарушениями (с минимальными значениями величины диаметров капиллярной пористости и количества открытых пор) по сравнению с непропариваемым.

Обобщение экспериментальных данных по первому условию (кинетике твердения бетонов на портландцементных марках 400...500) применительно к тепловой обработке водяным паром низкого давления до температуры 100 °С свидетельствует:

о незначительном в течение 2–3,5 ч. после начала тепловой обработки (при подъеме температуры) приросте прочности, отличающимся сначала кратковременным удерживанием показателей прочности на одном уровне, благодаря индукционного периода гидратации цемента.;

о быстром росте прочности до значений в 50...70 % от R_{28} (28-и суточной) в зависимости от водоцементного соотношения В/Ц бетона и активности цемента в течение 4–6 ч. (считая от начала изотермического выдерживания);

при увеличении длительности изотермического прогрева (сверх 6 до 10–12 ч.) интенсивность нарастания прочности значительно уменьшается, чередуясь периодичной сменой спадов и повышения прочности, но при сохранении общей тенденции к увеличению по мере удлинения цикла прогрева. Однако, чем короче цикл пропаривания, тем больше последующий прирост в течение первых часов и суток.

На практике в ямных пропарочных камерах тепловое воздействие передается на металлические формы (с уже отформованными железобетонными элементами), расположенные в штабеле или с различной интенсивностью прогрева по высоте и в туннельных камерах при горизонтальном перемещении форм с различным теплосохранением по длине камеры. [1]

К тому же еще в обоих случаях с геометрией изделий, характеризующихся большой длиной и сравнительно малой толщиной, склонной к крутяще-изгиб-

ным или другим деформациям от действия взаимно противоположных процессов (развивающейся усадки цемента (уменьшение объема)) и, наоборот, к увеличению размеров от повышения температуры при прогреве паром, дополняемой спонтанно возрастающей экзотермией цемента с относительно сложным характером распределения такого тепла в объеме бетона.

Благодаря приоритетному свойству металла (высокой теплопроводности) первоначальным поглотителем тепла из подводимого пара при его передаче к свежесформованному бетону становятся металлические формы и арматурные каркасы, или, точнее, металл – единственная подводящая и аккумулирующая среда, фокусирующая тепловой поток, и, главное, создающая направленное тепловое поле вокруг изделия из бетона.

При отдаче тепла из затвердевшего бетона следует полагать, что сначала оно излучается через металл формы, сохраняя влагу и необходимое теплосодержание, противодействующие активному образованию усадочных трещин и повышающее давление заземленного воздуха.

Таким образом, в различных изделиях с самого начала тепловой обработки возникает неравномерное и переменное температурное поле, приводящее в изделиях к неравномерному расширению составляющих бетона, особенно вовлеченного воздуха и воды.

Все это способствует возникновению явлений тепло- и массопереноса. При внутреннем массопереносе вода с растворенными в ней веществами, газообразными продуктами и вовлеченный воздух перемещаются по сечению и объему изделия, управляя в значительной мере процессом образования макроструктуры бетона.

В зависимости от относительной влажности греющей среды одновременно возможен эффект внешнего массообмена, проявляющийся прежде всего в дополнительном водонасыщении или обезвоживании бетона. При этом в газообразной фазе бетона возникает внутреннее избыточное давление, а приращение пористости обуславливает деструктивные процессы. Увеличение общей пористости прогретого бетона по сравнению с нормально твердеющим достигает 8...15 % и более в зависимости от режима, условий твердения и также состава бетона, т. е. технологических

факторов изготовления изделий.

Одним из направлений оптимизации процессов производства сборного железобетона, в части сокращения режимов теплового воздействия, цикла формования изделий, повышения их поверхностной прочности и долговечности, является введение в состав бетонной смеси химических добавок: электролитов и поверхностно-активных веществ (ПАВ), применение композитной арматуры [2].

Электролиты изменяют величину заряда частиц у термодинамически неустойчивых в воде систем, к которым относятся все вяжущие вещества. Понижая напряженность электрического поля цементно-водной фазы в бетоне, а тем – и степень сольватации гидратирующихся цементных частиц, они сближают последние, одновременно образуя комплексные соединения с мягким и (всегда после помола клинкера) очень тонкодисперсным минералом C_3A (трехкальциевым алюминатом) [1]. Последнее уже является катализатором для ускорения процессов гидратации и кристаллизации $C-S-H$ (кристаллических или аморфных гидросиликатов кальция) – основных носителей прочности цементного камня [3].

Сокращение индукционного периода гидратации цемента позволяет регулировать процессы схватывания и ускорения твердения цементного камня, а одновременное образование комплексов с C_3A – в ранний период, что приводит к тенденции образования незначительным количеством капиллярных пор, и в дальнейшем к умеренному внутреннему массопереносу. Последнее позволяет сократить длительность прогрева изделий или понизить влажность греющей среды.

ПАВ пластифицирующего, пластифицирующе-ускоряющего и воздухововлекающего действия, а также комплексные добавки (по эффекту действия) разделяются на:

гидрофильные – ЛСТ (лигносульфонаты технические на основе переработки целлюлозы), способствующие диспергированию частиц цементного теста и тем улучшающие его текучесть;

гидрофобизирующие, вовлекающие в смесь мельчайшие пузырьки воздуха, с заметным пластифицирующим эффектом и предназначенные для регулирования структуры, в том числе и в массообменных процессах при ускорении твердения

бетона, и повышения стойкости бетона при эксплуатации.

К последним относят СНВ (смолу нейтрализованную воздухововлекающую – натриевую соль абиетиновой кислоты), синтетическую поверхностно-активную добавку (СПД) [1].

Учитывая вышеизложенное, авторами статьи изучалось влияние добавок электролитов ($NaCl$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$), комплексных (на основе пластификаторов + электролиты), воздухововлекающей добавки СПД и микрокремнезема на свойства бетонной смеси, прочность пропаренного бетона и некоторые его свойства. По ускоряющему эффекту изученные добавки электролитов располагаются в последовательности: $CaCl_2 > NaCl > Na_2SO_4 > Ca(NO_3)_2$. Оптимальное количество добавки (по наибольшему росту прочности бетона) определяет водоцементное отношение В/Ц. При $В/Ц = 0,35...0,55$ на обычном, быстротвердеющем портландцементе и при введении $NaCl$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$ оно достигает 1...2 % и для $Ca(NO_3)_2$, $NaCl + NaNO_2$, $CaCl_2 + NaNO_2$ – 2...3 %, а на сульфатостойком цементе с $В/Ц = 0,35...0,75$ той же группой добавок соответственно 0,5...1 и 1...2 % от массы цемента (соотношение добавок $NaCl + NaNO_2$, $CaCl_2 + NaNO_2$ составляло 1 : 1 по массе) [4].

Рекомендуется применять: $NaCl$ и $CaCl_2$ в бетонных и ненапрягаемых железобетонных конструкциях с диаметрами арматуры более 5 мм; $NaCl + NaNO_2$ и $CaCl_2 + NaNO_2$ – в бетонных и железобетонных конструкциях; $Ca(NO_3)_2$ – в бетонных и железобетонных конструкциях, в том числе предварительно-напряженных, кроме случаев применения сталей марок Ат-IV, Ат-V, Ат-VI, А-IV и А-V; Na_2SO_4 – в бетонных и железобетонных конструкциях, в том числе и с напрягаемой арматурой, где более приемлема композитная арматура [2]. В работе [5] рассмотрен также вопрос применения различных активированных и пластифицирующих добавок в бетонные смеси.

Дозировки добавок действительны и для конструкционных легких бетонов, если фактическое водоцементное отношение считать с количеством воды, оставшимся от поглощения ее пористым, заполнителем. Прочность пропаренного легкого бетона на шлако-портландцементе при введении Na_2SO_4 в количестве 0; 0,5; 1 и 1,5 % от массы

цемента через 4 ч. после пропаривания составила соответственно 15,1; 16; 16,7 и 17 МПа (1 – режим пропаривания 2 + 2 + 6 + 2 ч. при 80 °С (предварительное выдерживание + подъем температуры + изотермический прогрев + остывание), 2 – плотность керамзита 495 кг/м³, водопоглощение 25 %, 3 – состав бетона по массе 1 : 1,75 : 1,65 : 0,73 (цемент : песок : керамзит : вода) с расходом цемента 330 кг/м³ и жесткости смеси – 40 с.). Эффект электролитов в бетоне тем больше, чем меньше В/Ц, расход цемента и с низким содержанием трехкальциевого алюмината.

Прирост прочности бетона с добавкой в целом уменьшается при увеличении продолжительности тепловой обработки, в особенности стадии изотермического прогрев. Однако, исходя из прироста прочности бетона с добавкой представляется возможным сократить время тепловой обработки бетона или расход цемента.

При изучении влияния добавок на продолжительность пропаривания было принято, что стадии предварительного выдерживания и остывания, как правило, зависят от продолжительности загрузки и разгрузки камер и, по существу, для каждого изделия отличаются, но ежедневно повторяются в рабочей неделе и в целом для любого завода являются постоянными. Температура прогрева бетонов на портландцементе составляла 80 °С. Поэтому исследовалось влияние добавок на сокращение длительности обычно регулируемых стадий – подъема температуры и изотермического прогрева при температуре 80 °С. Исследовался бетон марки 200 (класс В15) на портландцементе Ангарского завода. Бетон без добавки после его пропаривания в течение 10,5; 12 и 14,5 ч набирал соответственно прочность в размере 50, 60 и 70 % от R_{28} . Для достижения указанных значений прочности бетон с добавкой было достаточно пропаривать 6,5; 8,5 и 10,5 ч. При неизменных режимах пропаривания введение добавки привело к увеличению прочности бетона соответственно на 20, 15 и 10 % от R_{28} .

Из сопоставления указанных данных следует, что при распулбочной прочности бетона около 60 % от R_{28} сокращение продолжительности его тепловой обработки (в %) за счет добавки вдвое больше прироста прочности (в %), считая от прочности бе-

тона без добавки, при прочности бетона около 70 % от R_{28} это сокращение примерно в 3 раза больше прироста прочности.

Зависимость между сокращением режима пропаривания и приростом прочности позволяет ориентировочно (поскольку не учтены стадии предварительного выдерживания и остывания) определить продолжительность тепловой обработки бетона с добавкой и имеет следующий вид:

$$B_{\text{д}} = B - aB(R_{\text{д}} - R),$$

где $B_{\text{д}}$ – продолжительность режима тепловой обработки (включая и предварительное выдерживание) бетона с добавкой, ч.; B – то же, бетона без добавки; $R_{\text{д}}$ – прочность бетона с добавкой после тепловой обработки, % от R_{28} ; R – то же, бетона без добавки; a – коэффициент, принимаемый 0,02 при R до 60 % от R_{28} , 0,03 при R около 70 % от R_{28} и 0,04 при R около 85 % от R_{28} .

Из прироста прочности бетонов на быстротвердеющем высокоалюминатном ($C_3A > 10$ %), среднеалюминатном ($C_3A = 6...10$ %) и низкоалюминатном портландцементе ($C_3A < 6$ %), пуццолановом и шлакопортландцементе сразу после прогрева с добавками возможно сократить длительность тепловой обработки бетона на 30 %.

Для уточнения возможности применения ускорителей твердения для сокращения расхода цемента изготавливали бетоны марки 400 с добавками Na_2SO_4 и $CaCl_2$ на портландцементе Ангарского, Белгородского и Воскресенского заводов. Подбор состава бетона с добавками заключался в определении наибольшего значения В/Ц при неизменном расходе воды и при равных показателях подвижности смеси и прочности бетона. Бетоны пропаривали по тепловым режимам, обеспечивающим получение 50 % – и 70 % прочности от марочной.

Из данных таблицы 1 видно, что добавки электролитов позволили сократить расход цемента в бетонах на низкоалюминатных белгородском и ангарском портландцементе на 8...10 %, а на среднеалюминатном воскресенском цементе – около 5 %.

Таким образом, сокращение расхода цемента и ускоряющий эффект при введении добавок электролитов уменьшаются с увеличением содержания трехкальциевого алюмината в портландцементе. Проведенные исследования показали, что для практических целей при применении добавок ускорителей твердения с целью сокращения расхода цемента увеличенное значение В/Ц бетона целесообразно определять по формуле:

Таблица 1

Прочность пропаренного бетона с добавками ускорителей твердения

Добавка		Подвижность смеси, см	В/Ц	Расход цемента, кг/м ³	Прочность (МПа) через		
Вид	Количество % от массы цемента				4 ч.	1 сут.	28 сут.
Белгородский портландцемент							
А) Режим пропаривания 2 + 2 + 4 + 2 ч. (при температуре $t = 75...80$ °С)							
Na ₂ SO ₄	0,0	2,5	0,50	352	18,3	20,8	42,0
	1,5	2,5	0,50	352	25,3	27,0	43,2
	1,5	2,5	0,53	331	23,1	24,2	44,4
	1,5	2,5	0,59	307	18,8	23,7	36,9
CaCl ₂	1,5	2,5	0,5	352	26,7	28,7	45,2
	1,5	2,5	0,53	331	23,2	24,2	44,4
	1,5	2,5	0,59	307	18,6	23,7	36,9
Б) Режим пропаривания 2 + 2 + 8 + 2 ч. (при температуре $t = 75...80$ °С)							
Na ₂ SO ₄	0,0	2,5	0,50	352	26	28,8	44,0
	1,5	2,5	0,50	352	30,8	34,0	47,2
	1,5	2,5	0,53	331	29,6	32,7	44,0
	1,5	2,5	0,57	307	27,9	29,5	38,5
CaCl ₂	1,5	2,5	0,50	352	32,9	36,6	46,8
	1,5	2,5	0,53	331	31,2	34,0	45,0
	1,5	2,5	0,57	301	24,5	26,0	26,0
Воскресенский портландцемент							
А) Режим пропаривания 2 + 2 + 4 + 2 ч. (при температуре $t = 75...80$ °С)							
Na ₂ SO ₄	0,0	2,5	0,50	358	29,2	34,0	46,8
	1,5	2,5	0,53	339	29,2	33,2	47,0
	1,5	2,5	0,59	303	24,4	27,8	39,0
Б) Режим пропаривания 2 + 2 + 8 + 2 ч. (при температуре $t = 75...80$ °С)							
Na ₂ SO ₄	0,0	2,5	0,50	358	31,7	35,0	48,0
	1,5	2,5	0,53	339	32,2	36,0	48,7
	1,5	2,5	0,59	303	27,3	30,2	40,8

$$\frac{B}{C} = \frac{0,45R_{ц}}{R_6 - (R_6 - R_6)a + 0,18R_{ц}}$$

где $R_{ц}$ – активность (марка) цемента; R_0 – прочность бетона без добавки; R_6 – то же, с добавкой; a – коэффициент, принимаемый равным 1 при определении R_6 и R_6 в 28-суточном возрасте или 0,8 и 0,5 соответственно для добавок CaCl₂ и Na₂SO₄, при определении R_6 и R_6 через 4...12 ч. после пропаривания.

Исследования бетона на шлакопортландцементе с ускоряющей и комплексной добавкой ускоритель + замедлитель (Na₂SO₄ + ССБ) показали, что расход цемента за счет электролита сокращается на 6 %, а с комплексной добавкой – на 8...10 % [1, 6].

Возможность применения воздуховлекающих добавок в технологии сборного железобетона исследовалась на добавке СПД (синтетической пластифицирующей добавке), по ее воздуховлекающей способности, близкой к СНВ (смоле нейтрализованной воздуховлекающей), но более дешевой. При оптимальном количестве добавки СПД (0,01...0,02 % от массы цемента) однородность, структурная связность и удобообрабатываемость бетонной смеси повышались. Благодаря чему уменьшались водоцементное отношение (на 0,02...0,04), подвижность смеси (на 30...50 %). Но при обеспечении заданной жесткости эта добавка позволила сократить расход цемента.

Из таблицы 2 видно, что для бетона, приготовленного на белгородском портландцементе ($C_3A = 4$ %) из смесей с примерно одинаковой жесткостью, введение добавки СПД при уменьшении исходного водоцементного отношения на 0,02...0,04 позволило сократить расход цемента на 9 % без снижения прочности бетона. При введении добавки СПД в бетонные смеси на воскресенском и красноярском портландцементе (содержание $C_3A = 7$ %) расход цемента уменьшился до 7 %, Такое же сокращение расхода цемента достигнуто и при использовании шлакопортландцемента, но несколько меньшее для бетона на ангарском портландцементе. Для бетонов с большим, расходом цемента эффективность применения добавки СПД уменьшается. Так, при расходе красноярского портландцемента около 400 кг/м³ добавки СПД позволила уменьшить его расход на 7 % без ущерба для прочности бетона, а в бетоне с расходом этого же цемента свыше 500 кг/м³ экономия составила лишь 3 %. Для сокращения расхода цемента при повышенном его содержании в бетоне (более 500 кг/м³), особенно при применении мелких песков, СПД необходимо вводить совместно с ускорителем твердения. В этом случае представляется возможным уменьшить расход цемента до 7 % (таблица 3).

Таблица 2

Влияние добавок СПД на расход цемента и прочность пропаренного бетона

Количество СПД, % от массы цемента	Консистенция смеси		Плотность смеси, кг/м ³	В/Ц	Расход Цемента, кг/м ³	Прочность, МПа через		
	Подвижность, см	Жесткость, с.				4 ч.	1 сут.	28 сут.
Ангарский портландцемент марки 400								
0,000	3	15	2340	0,43	440	29,2	29,7	33,6
0,015	2	15	2320	0,40	418	30,5	31,1	36,7
0,000	4	15	2320	0,56	340	20,2	21,2	26,3
0,015	2	12	2300	0,53	323	21,0	23,3	26,7
Белгородский портландцемент, марки 400								
0,000	9,5	10	2400	0,60	350	14,0	15,1	28,4
0,010	8,5	7	2370	0,57	325	15,7	16,8	31,6
0,015	7,0	8	2300	0,56	323	15,4	16,7	32,1
Воскресенский портландцемент марки 400								
0,000	6,5	15	2400	0,60	350	19,0	19,5	30,7
0,010	4,0	14	2370	0,57	321	19,1	20,5	30,7
Красноярский портландцемент марки 500								
0,000	8	8	2350	0,48	405	20,3	23,4	28,0
0,015	4	9	2300	0,46	377	20,3	22,4	26,7
0,000	5	9	2370	0,39	520	27,7	28,7	36,0
0,010	4	9	2340	0,37	515	29,5	30,1	29,2

Таблица 3

Влияние комплексной добавки СПД + Na₂SO₄ на расход шлакопортландцемента и прочность пропаренного бетона, приготовленного на мелком песке (модуль крупности Мк = 1,12)

В/Ц	Количество СПД + Na ₂ SO ₄ , % от массы цемента	Консистенция смеси		Расход цемента, кг/м ³	Прочность в возрасте 1 сут., МПа
		Подвижность, см	Жесткость, с.		
0,51	0,00 + 0,0	13	5	420	15,1
0,50	0,02 + 1,5	9	5	397	17,5
0,49	0,03 + 1,5	6	6	395	19,0
0,51	0,00 + 0,0	0	43	280	16,9
0,50	0,02 + 0,5	0	40	261	18,1
0,50	0,02 + 1,5	0	37	259	16,5

Примечание: режим пропаривания 2 + 3 + 8 + 4 ч. при температуре 95 °С.

При использовании мелких песков с модулем крупности Мк = 1,1...1,4 дозировка СПД возрастает до 0,025...0,03 % от массы цемента против 0,01...0,02 %, оптимальной для бетонов на кварцевых песках с Мк от 1,8 и выше.

Исследования и промышленный опыт показали, что добавку СПД (как и любую другую воздуховлекающую добавку) следует точно дозировать, строго регламентируя время перемешивания (не более 3 мин. для тяжелого и 5 мин. для легкого бетона), а уменьшение объемной массы смеси не должно превышать 3 %. Если не учитывать этих факторов, то в производственных условиях воздуходержание бетонной смеси превышает 5 %, что приводит к потере прочности бетона.

Добавка СПД в оптимальном количестве практически не влияет на скорость гидратации минералов портландцементного клинкера, кинетику схватывания и структурообразования. Вовлеченный при введении добавки СПД воздух (в

количестве 3...5 %) не ухудшает структуры бетона, подвергнутого тепловой обработке. Вследствие этого добавку СПД (как и любую другую воздуховлекающую добавку) можно применять без увеличения длительности тепловой обработки бетона. Этот вывод подтверждается и данными о влиянии добавки СПД на морозостойкость, водонепроницаемость и другие свойства пропаренного бетона. Испытания на морозостойкость пропаренного бетона и бетона нормального твердения проводились при температурах -15, -18, -50, -60 °С. Морозостойкость бетонов оценивалась по остаточным деформациям, потерям прочности при сжатии, а также по изменению внешнего вида образцов. В последнем случае образцы испытывали при появлении на них трещин, нарушениях формы граней и углов.

Из данных таблицы 4 видно, что для бетона без добавки явные признаки разрушения образцов наблюдались через 42...129 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Морозостойкость (Мрз) пропаренного бетона

Портландцемент	Марка бетона	Количество СПД, % от массы цемента	В/Ц	Консистенция смеси		Расход цемента, кг/м ³	Мрз, число циклов	Состояние образцов
				Подвижность, см	Жесткость, сек.			
Ангарский	300	0	0,43	3	19	440	129	Т.
		0,015	0,4	2	15	418	950	Б. и.
		0,02	0,4	2	12	409	950	Б. и.
	200	0	0,56	6	10	355	100	Т.
		0,015	0,53	3	9	323	942	Б. и.
		0,02	0,53	3	10	323	942	Б. и.
Красноярский	400	0	0,39	5	9	520	150	Т.
		0,015	0,37	4	9	520	912	Б. и.
		0,02	0,36	3	9	520	912	Б. и.
	300	0	0,48	5	8	405	97	Т.
		0,015	0,46	4	9	377	901	Б. и.
		0,02	0,46	4	8	377	901	Б. и.
200	0	0,58	6	9	315	50	Т.	
	0,015	0,56	3	11	293	874	Б. и.	
	0,02	0,56	3	6	293	874	Б. и.	
Новокузнецкий	300	0	0,41	5	8	480	106	Т.
		0,015	0,39	3	5	446	896	Б. и.
		0,02	0,39	3	5	446	896	Б. и.
	200	0	0,51	5	4	370	42	Т.
		0,015	0,48	2	4	344	824	Б. и.
		0,02	0,47	2	4	344	824	Б. и.

Примечание: Т – трещины, Б. и. – без изменений.

Прочность их к этому времени уменьшалась на 25...50 %. Образцы, отформованные из бетона с добавкой СПД, не имеют каких-либо заметных нарушений формы граней и углов, а также видимых трещин даже после 824...950 циклов. И только в единичном случае для бетона марки 200, изготовленного на ангарском портландцементе, к 950 циклам появились волосяные трещины. Особо следует подчеркнуть повышение морозостойкости бетона на шлакопортландцементе.

Результаты определения остаточных деформаций расширения бетонов пропаренного и нормального твердения, подвергшихся попеременному замораживанию при температуре $-50, -60$ °С, также свидетельствуют о высокой морозостойкости бетона с добавкой СПД. Остаточные деформации расширения в 1 мм/м, применяемые иногда в качестве критерия снижения морозостойкости, в бетоне без добавки были достигнуты через 15...20 циклов замораживания и оттаивания. В бетонах с добавкой СПД деформации расширения к 90 циклам, составили всего лишь 0,35...0,15 мм/м соответственно для пропаренного бетона и бетона нормального твердения.

Исследования показали, что при введении добавки СПД водонепроницаемость бетона увеличивается не менее, чем на одну марку [1]. Исследования и производственный опыт также показали, что

добавка СПД может применяться в технологии сборного железобетона для сокращения расхода цемента (в среднем на 5 %) и, особенно, при изготовлении изделий и конструкций, к которым предъявляются высокие требования по морозостойкости и водонепроницаемости.

Сегодня получены и находят широкое применение в бетонах еще более эффективные пластификаторы С-3, С-3 + ЛСТ, именуемые суперпластификаторами, а также рекомендовавшиеся ранее, как правило, для экономии и повышения коррозионной стойкости цемента активные тонкомолотые добавки. Так аморфный микрокремнезем (МК) некоторые исследователи считают добавкой для получения бетонов нового поколения [7].

Первоначально интерес к МК был обусловлен как к промышленному отходу, благодаря проблемы защиты от запыления им окружающей атмосферы и еще необходимостью экономии энергии в промышленности строительных материалов за счет частичной замены цемента. Теперь микрокремнезем, увлажненный суперпластификатором (прежде с целью превращения его в транспортабельный вязкий или полутвердый коммерческий продукт) применяется широко и в производстве сухих строительных смесей.

МК представляет тонкодисперсные шарообразные частички аморфного кремнезема с удельной поверхностью около

20 м²/г, но у золы уноса – 4000...7000 см²/г, портландцемента – 3000...4000 см²/г или в 3...8 раз выше последних. Размер частиц в среднем около 0,1 мкм или почти в 100 раз меньше размера зерна цемента.

Однако частицы могут агломерировать в агрегаты до 0,5 мкм. Насыпная масса в уплотненном состоянии составила 0,17...0,20 т/м³, угол естественного откоса – 75...80°; в уплотненном состоянии масса – 0,35...0,80 т/м³, (цемента – 1,5 т/м³), угол откоса – 25...30°. Показатель рН водной суспензии 8,1...8,4, в среднем – 7,74.

Взаимодействие частиц МК с продуктами гидратации цемента начинается на ранних стадиях практически с момента затворения водой и заканчивается в возрасте 28 сут. Образующийся силикатный гель, переходит постепенно в различные морфологические типы CSH, что и определяет повышение прочности цементного камня с МК в бетонах.

При твердении в нормальных условиях указанная реакция протекает, главным образом, в период от 7 до 14 сут. При повышенных температурах (не более 100 °С) взаимодействие SiO₂ и CaO может полностью заканчиваться в процессе тепловлажностной обработки. Однако этот вывод нуждается еще в подтверждении статистикой испытаний.

Выводы

Эффективность добавок электролитов зависит от их вида, количества, расхода и алюминатности портландцемента в бетоне, а также режима тепловой обработки. Нарастание прочности бетона с электролитами, как правило, увеличивается с уменьшением продолжительности прогрева и содержания алюминатов в портландцементе, что позволяет на 40...50 % сократить режим прогрева бетона или на 5...15 % расход цемента.

С уменьшением длительности прогрева, алюминатности портландцемента повышается влияние ускорителей на сокращение расхода цемента, а пластифицирующих добавок, наоборот, уменьшается. Комплексные добавки (на их основе), независимо от минералогии цемента оказываются более

эффективными и позволяют сократить расход цемента на 10...15 %, суперпластификаторы – до 20 %, но при длительных режимах, независимо от вида портландцемента.

Применение микрокремнезема позволяет получать бетоны при расходе цемента 200...450 кг/м³ и с прочностью 300...1000, водонепроницаемостью W12...16, морозостойкостью F200...600. С помощью МК возможно заменить в бетонах до 45 % цемента.

Библиографический список

1. Усов Б. А., Аликина И. Б., Чарикова Т. А. Физико-химические процессы строительного материаловедения в технологии бетона и железобетона. – М.: Изд-во МГОУ, – 2009.
2. Окольников Г. Э., Герасимов С. В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С. 14–21.
3. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1973.
4. Химические добавки для модификации бетона / Изотов В. С. [и др.]. – М.: КазГАСУ, Изд-во «Палеотип», 2006.
5. Гуринович Л. С., Усов Б. А. Механохимическая обработка строительных материалов // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С. 22–25.
6. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М., 1998.
7. Новиков А. М. Микрокремнезем как одно из основных направлений улучшения физико-химических и технологических характеристик бетона // 7-я Международная научно-техническая конф. «Mix-BUID»: сб. трудов. – М., 2005.

Сведения об авторах

Окольникова Галина Эриковна, кандидат технических наук (e-mail: okolnikova_ge@mail.ru)

Усов Борис Александрович, кандидат технических наук (e-mail: boris_40@list.ru)

Information about the authors

Okolnikova Galina Erikovna, candidate of technical sciences (e-mail: okolnikova_ge@mail.ru)

Usov Boris Aleksandrovich, candidate of technical sciences (e-mail: boris_40@list.ru)