

УДК 666.972.69; 693.54

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
"Строительные материалы
и изделия"
Белорусского национального
технического университета

Елена Александровна ИВАНОВА,
инженер,
заведующая лабораторией
ОДО "МЭТРАС"

Ромуальд Францевич ОСОС,
инженер,
старший научный сотрудник
НИИЛ модифицированного бетона
и строительной продукции
Белорусского национального
технического университета

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

**EFFICIENCY AND PROBLEMS
IN CEMENT CONCRETE
ENERGY SAVING
TECHNOLOGIES**

В статье изложены результаты исследований и производственного внедрения снижающих расход энергии технологий цементного бетона в строительной отрасли Беларуси, рассмотрены основные проблемы и направления их решения с целью снижения энергоёмкости строительства.

The results of study and industrial introduction of cement concrete technologies reducing power consumption in the construction industry of Belarus are presented in the article. The main problems and ways of solving them in order to decrease power intensity of construction are considered.

ВВЕДЕНИЕ

Нараставшие с началом девяностых годов XX века кризисные явления в энергообеспечении народного хозяйства Беларуси поставили перед его строительной отраслью задачу резкого снижения энергопотребления. Учитывая значительные объемы использования цементного бетона в современном строительстве и перспективность его применения как конструкционного материала в дальнейшем, особую значимость приобрела разработка энергосберегающих технологий в производстве сборных изделий и при устройстве (возведении) монолитных конструкций из бетона и железобетона. С 1994—1995 гг. такие технологии стали активно внедряться в строительной отрасли республики. Их можно условно разделить на два типа: "пассивные" (беспрогревные) и "активные" (малоэнергоёмкие).

При реализации беспрогревной технологии отсутствует подвод тепла к бетону от внешних искусственных источников, а ускорение его твердения (т. е. повышение темпа роста прочности) обеспечивается за счет применения соответствующих химических добавок и аккумуляции теплоты, выделяемой при гидратации цемента (экзотермии).

Малоэнергоёмкие технологии характеризуются наличием периода подъема температуры с разогревом бетона до 30 °С—50 °С, а в дальнейшем требуемый режим твердения поддерживается благодаря экзотермии цемента.

Результаты исследований, выполненных на кафедре "Строительные материалы и изделия" Белорусского национального технического университета (БНТУ) и в ее научно-исследовательской лаборатории модифицированного бетона, а также анализ опыта их внедрения с 1995 года и использования в виде энергосберегающих технологий в строительной отрасли свидетельствуют,

что в летний период по варианту беспрогревной технологии за 18—24 ч твердения бетона прочность его достигает 50 % от проектной. Таким образом, обеспечиваются условия бездефектной распалубки не только монолитных конструкций, но и сборных изделий, армированных ненапрягаемой арматурой. За 36—48 ч твердения достигается прочность бетона 70 %—80 % от проектной, что обеспечивает требуемые условия бездефектной распалубки сборных изделий с напрягаемой арматурой и снятие опалубки возводимых (устраиваемых) монолитных строительных конструкций, включая монолитные перекрытия зданий и сооружений.

Использование малоэнергоёмкой технологии позволяет за 14—18 ч твердения бетона с начальным разогревом достичь прочности на уровне 70 %—80 % от проектной с затратами тепловой энергии при изготовлении сборных изделий примерно 125 000—250 000 кДж (0,03—0,06 Гкал) на 1 м³ бетона, а при бетонировании монолитным способом (например, с использованием электродного прогрева) до 125 000 кДж (до 0,03 Гкал или 35 кВт · ч), в зависимости от условий ведения работ.

Приведенные данные подтверждены практикой работы по беспрогревной технологии при производстве сборных изделий (завод ЖБИ № 7, г. Могилев) и ее малоэнергоёмких вариантов (завод пустотных изделий ОАО "Минскжелезобетон" г. Минска и другие предприятия Беларуси), а также при круглогодичном ведении бетонных работ монолитным способом (МПК № 198, г. Логойск — фундаменты крытой автостоянки "Комаровского" рынка и другие объекты в г. Минске; ЗАО "Славянский строитель" — несущие внутренние стены и перекрытия 18-этажного здания из монолитного бетона в г. Санкт-Петербурге), а также практикой строительства других организаций (объектов). Реализация энергосберегающих технологий с наибольшей эффективностью, оцениваем-

мой снижением энергетических, финансовых затрат и ускоренным оборотом бортовоснастки (опалубки), требует соблюдения ряда условий, связанных с выбором цемента, соответствующих цели применения химических добавок [1-3], созданием температурного режима твердения бетона и разрешением других проблем, рассмотренных в публикациях [4-6] и в настоящей статье.

ФАКТОР КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТА

Снизить энергетические затраты при тепловой обработке или прогреве бетона можно при использовании всех применяемых разновидностей портландцемента (1, 2 и 3 групп эффективности при пропаривании), а также шлакопортландцемента и пуццоланового цемента. Однако, наибольшую эффективность обеспечивают вяжущие, которые по минералогическому составу могут быть отнесены к цементам алиито-алюминатной группы, т. е. при суммарном содержании $C_3S + C_3A \geq 60\%$. В таблице 1, в которой приведены характеристики цементов отечественных заводов (получены по усредненным данным лабораторий этих предприятий за период с 1995 по 2000 гг.), к алиито-алюминатной группе могут быть отнесены вяжущие позиций 1, 2, 6 и 8 (последнее в исследованиях получено домолом цемента М500-Д0, поз. 6). Эти вяжущие обладают наибольшей экзотермией, так как удельная теплота гидратации клинкерных минералов за первые 3 сут составляет [7], кДж/кг синтезированного материала, для:

- $C_3A \sim 592$;
- $C_3S \sim 407$;
- $C_4AF \sim 186$;
- $C_2S \sim 63$.

В результате, как это будет показано далее, бетон, приготовленный на вяжущих с высоким содержанием C_3S и C_3A , в большей степени проявляет эффект саморазогрева при твердении как по беспрогревной, так и по малоэнергоёмкой технологии.

При неизвестном минералогическом составе цемента его ожидаемую эффективность можно оценить по косвенной характеристике — группе эффективности при пропаривании. Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что цементы алиито-алюминатной группы (поз.1, 2, 6 и 8) соответствуют 1 группе эффективности при пропаривании. По существу, аналогичную характеристику вяжущему дают данные по прочности в возрасте 2 сут, полученные (или приведенные в сертификате на цемент) по СТБ ЕН 197-1-2000, так как повышенный темп роста прочности (при устойчивой удельной поверхности 2800-3000 г/см² по прибору типа "ПСХ") непосредственно зависит от минералогического состава клинкера в цементе.

Следует отметить закономерность взаимосвязи "гидратация цемента-тепловыделение", заключающуюся в том, что с повышением температуры бетона (за счет саморазогрева или прогрева от внешних источников) процесс гидратации цемента ускоряется и растет количество выделяемой им теплоты. Этот эффект усиливается при введении в бетон химических добавок — ускорителей твердения: сульфата натрия Na_2SO_4 , нитрата кальция $Ca(NO_3)_2$, нитрит-нитрата кальция $Ca(NO_2)_2 + Ca(NO_3)_2$, хлористого кальция $CaCl_2$ [3] и других хлоридосодержащих добавок: ПВК, РС, СХП, галитовых отходов и пр.

Таблица 1. Характеристика цементов

№ пп	Завод-изготовитель	Марка	Активность, МПа	Группа эффективности при пропаривании	Минералогический состав, %				K_{HF}	Сроки схватывания, ч; мин	
					C_3S	C_3A	C_2S	C_4AF		Начало	Конец
1	БЦЗ	М500-Д0	53	1	62	6,5	15	11,5	0,255	2 ⁰⁵	3 ¹⁰
2	БЦЗ	М400-Д0	43	1	56	7,3	18	13	0,265	2 ¹⁰	3 ²⁰
3	Кричевцементношифер	М500-Д0	48	2	54	5,0	21	16	0,26	3 ¹⁵	3 ⁵⁵
4	Кричевцементношифер	М400-Д0	42	3	51	4,5	26	15	0,27	3 ²⁰	5 ¹⁰
5	Красносельск-стройматериалы	М500-Д0	49	2	53	2,3	23	15,7	0,25	2 ³⁵	3 ⁵³
6	Красносельск-стройматериалы	М500-Д0	51	1	55	4,7	20	15	0,255	2 ⁰⁵	3 ¹⁷
7	Красносельск-стройматериалы	М400-Д0	42	2	52	3,8	22	17,5	0,265	2 ³⁰	3 ⁴⁰
8	Красносельск-стройматериалы	М550-Д0	56	1	55	4,7	20	15	0,265	1 ⁴⁰	2 ³⁰

РОЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК В БЕТОН

С позиций энергосбережения в производстве сборного железобетона и строительства из монолитного бетона при минимальных финансовых затратах на добавки достаточно эффективно использовать монодобавку ускорителя твердения. Наибольший же эффект снижения энергетических затрат на прогрев бетона (для ускорения его твердения) обеспечивают комплексные добавки, содержащие ускоритель твердения и пластифицирующую добавку 1 группы (суперпластификатор) [3], по качественным характеристикам не уступающую уровню разжижителя С-3. В этом случае, за счет снижения начального водосодержания бетона (при сохранении требуемой по условиям работ формуемости смеси) и воздействия ускорителя твердения обеспечивается не только снижение энергетических затрат на прогрев бетона, но и рост его прочностных и эксплуатационных характеристик, основывающихся на повышении плотности и непроницаемости цементного камня и бетона в целом. Пластифицирующие добавки 2, 3 и 4 групп, являясь менее качественными (такие как модифицированные лигносульфонаты, а также ЛСТ и др.), снижают энергосберегающую эффективность комплексной добавки вследствие рассмотренных далее особенностей механизма их воздействия на гидратацию цемента и кинетику роста прочности бетона.

Добавки — ускорители твердения. Механизм воздействия химических добавок — ускорителей твердения — на процессы гидратации, схватывания и твердения цемента представляет собой комплекс физико-химических явлений [1, 8-12], в результате которых возрастает темп и сокращается время перехода цементного теста из вязко-пластичного в камневидное состояние, повышаются плотность и прочность цементного камня и бетона в целом. Такие добавки являются электролитами и в водной среде образуют истинные растворы, распадаясь на составляющие ионы. Обладая значительным энергетическим потенциалом, ионы вещества добавки способны проникать с молекулами воды в адсорбционные слои жидкости, в зону ее контакта с поверхностью вяжущего. Вследствие значительно большего, чем у молекул воды, собственного энергетического поля, присутствие таких ионов приводит к росту сил, обеспечивающих растворение (гидратацию) клинкерных минералов с повышением интенсивности протекания этого процесса. К аналогичному результату приводит явление частичного связывания веществом добавки продуктов гидратации цемента: гидроокиси кальция, гидроалюминатов и гидроферритов, что также ускоряет процесс растворения. Кроме того, эффект проявляется в углублении явления дезагрегации (пептизации) цементных флюкул. Присутствие в воде ионов электролита значительно повышает усилие отталкивания одноименно заряженных пленок жидкости, адсорбированной поверхностью зерен цемента, составляющих флюкулу, что проявляется в интенсивности развития процесса их распада и, как следствие, сопровождается вовлечением в реакцию с водой дополнительной поверхности вяжущего, способствует росту плотности и прочности цементного камня (бетона).

С течением времени, на фоне углубления процесса гидратации цемента и накопления продуктов гидролиза в жидкой фазе, развиваются химические реакции с веществом добавок, сопровождающиеся образованием новых соединений. В результате образуются вторичные (двойные) соли, уплотняющие коагуляционную структуру

цементного геля, а в конечном итоге — цементного камня и бетона. Несколько иначе проявляется механизм воздействия на гидратирующийся и твердеющий цемент добавок-затравок, представляющих собой тонкодисперсную твердую фазу, являющуюся подложкой, инициирующей ускорение образования новых фаз в цементном геле за счет снижения энергетического порога начала образования кристаллогидратов. Эффект применения данного типа добавок (например, микрокремнезема) основывается на том, что образование и формирование новых фаз из водного раствора продуктов гидратации цемента является энергетически невыгодным (затратным) процессом. Его развитие может быть инициировано введением готовых "центров" кристаллизации, обладающих сродством по отношению к реагирующему с водой вяжущему веществу. В результате вокруг "центров" кристаллизации с меньшими потерями энергии в системе цемент-вода формируются гидрокристаллы клинкерных минералов, что способствует ускоренному росту прочности бетона.

Пластифицирующие добавки. Существенное отличие добавок-пластификаторов, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), от добавок — ускорителей твердения — заключается в замедлении реакций гидратации цемента на начальной стадии взаимодействия его с водой, что сопровождается увеличением сроков схватывания пластифицированной цементно-водной системы и замедлением процессов, подготавливающих и обеспечивающих твердение вяжущего, т. е. рост прочности бетона. Связано это со следующими причинами.

По определению и состоянию водных растворов химических веществ, относящихся к поверхностно-активным [12, 13], концентрация молекул ПАВ всегда выше у поверхности раздела фаз "жидкость-твердое тело" или "жидкость-газообразная среда", чем в объеме раствора. В системе "цемент-вода", т. е. в цементном тесте, поверхность раздела твердой и жидкой фаз проходит по поверхности флюкул вяжущего, обладающей огромным избыточным потенциалом, который стремится к самоликвидации при контакте с водой в форме образующейся вокруг частиц сольватной водной оболочки.

Как известно, потенциал поверхности распределен не равномерно и обладает явно выраженными участками его превышения — активными центрами поверхности. Для частиц измельченного клинкера это могут быть как особенности (выступы, разломы) поверхности, так и "выходы" на поверхность молекул наиболее активного клинкерного минерала — трехкальциевого алюмината или C_3A . Благодаря повышенному энергетическому потенциалу активные центры гидратируются в первую очередь, т. е. взаимодействуют с водой в обычных условиях, а при наличии в ней ПАВ именно к ним перемещаются его молекулы и в первую очередь адсорбируются у этих участков поверхности зерен цемента.

Результатом адсорбции крупных молекул ПАВ является частичная блокировка электростатического потенциала поверхности, вследствие которой уменьшается толщина слоя жидкой фазы, удерживаемого частицами (флюкулами) вяжущих в отсутствие ПАВ. Таким образом, значительная часть воды перейдет из связанного в свободное состояние, что и обуславливает первоначально эффект пластификации. При этом, чем значительнее уровень блокировки электростатического потенциала поверхности (либо за счет активности молекул ПАВ — качество добавки, либо за счет их количества — величина дозировки), тем значительнее эффект пластификации. Одновременно проявляется побочный отрицатель-

ный эффект присутствия в системе "цемент-вода" молекул ПАВ, заключающийся в препятствии доступу молекул воды к поверхности цемента и соответствующем "торможении" процесса гидратации вяжущего и последующего твердения (т. е. роста прочности бетона). Особенно это характерно для рядовых пластификаторов, например ЛСТ, ЩСПК, мылонафта, ГКЖ и др. Поэтому для каждой пластифицирующей добавки существует вполне определенная область ее рационального дозирования [3], учитывающая обе означенные стороны эффекта адсорбции молекул ПАВ на поверхности вяжущего.

Влияние комплексных добавок, содержащих ускоритель твердения и суперпластификатор, на процессы гидратации, схватывания и твердения цемента отражается в своеобразном сочетании рассмотренных ранее эффектов, проявляемых каждой из них. Для энергосберегающих технологий характерно использование пластифицирующего эффекта комплексной добавки с целью снижения водосодержания бетона при сохранении требуемой формуемости смеси. Вследствие этого, а также из-за наличия в комплексной добавке компонента — ускорителя твердения — при беспрогревной технологии (температура твердения бетона обычно не превышает 30 °С) реакции цемента с водой и рост прочности бетона, как это будет показано далее, замедляются в начальные 24 ч твердения, но затем их темп повышается (в сравнении с бетоном без добавок и с монодобавкой ускорителя). Для малоэнергоёмкой технологии с разогревом бетона до 30 °С—50 °С характерен значительный прирост прочности бетона с комплексной добавкой (относительно бетона с ускорителем при одинаковых режимах его твердения), что создает предпосылки для понижения температуры начального нагрева бетона, т. е. для снижения энергетических затрат на его прогрев.

Влияние добавок на схватывание цемента и сохранение удобоукладываемости (формуемости) бетонной смеси во времени показано на примере ускорителя твердения сульфата натрия (Na_2SO_4 или СН), суперпластификатора С-3 и комплексной добавки на их основе.

Введение добавки СН способствует интенсификации процесса гидратации цемента и вызывает сокращение сроков его схватывания. Этот эффект действия добавки в большей мере проявляется с ростом активности вяжущего. Так, при дозировках СН 0,5 %—1,0 % от массы цемента (см. таблицу 1) время начала схватывания вяжущих 1 группы эффективности при пропаривании сократилось (в сравнении с его значением для нормальной густоты цементного теста без добавки СН) на 9 %—12 % и на 20 %—25 % соответственно; для цементов 2 и 3 групп — на 12 %—16 % и на 4 %—6 % соответственно.

Влияние добавки суперпластификатора С-3 в дозировке 0,35 %—0,8 % от массы цемента (без корректировки водосодержания) проявляется в увеличении времени начала схватывания на 15 %—55 % для исследованных видов цемента (в большей степени для вяжущих меньшей активности и с увеличением дозировки добавки).

Комплексная добавка С-3+СН неоднозначно влияет на сроки схватывания цемента. В случае "без снижения расхода воды" и при дозировке добавки 0,35 %—0,5 % + 0,5 %—0,75 % от массы цемента (МЦ) начало и конец схватывания цемента несколько отодвигаются во времени с ростом содержания компонента С-3 в комплексной добавке. При этом сроки схватывания цемента с комплексной добавкой во всех случаях меньше, чем с монодобавкой С-3. Снижение количества воды затворения до получения цементного теста нормальной густоты сопровождается сокращением времени начала

схватывания на 20 %—35 % в сравнении с цементом с комплексной добавкой без корректировки водосодержания и на 16 %—26 % — в сравнении с цементом без добавок.

Тенденция изменения подвижности пластичных бетонных смесей различной начальной консистенции час-

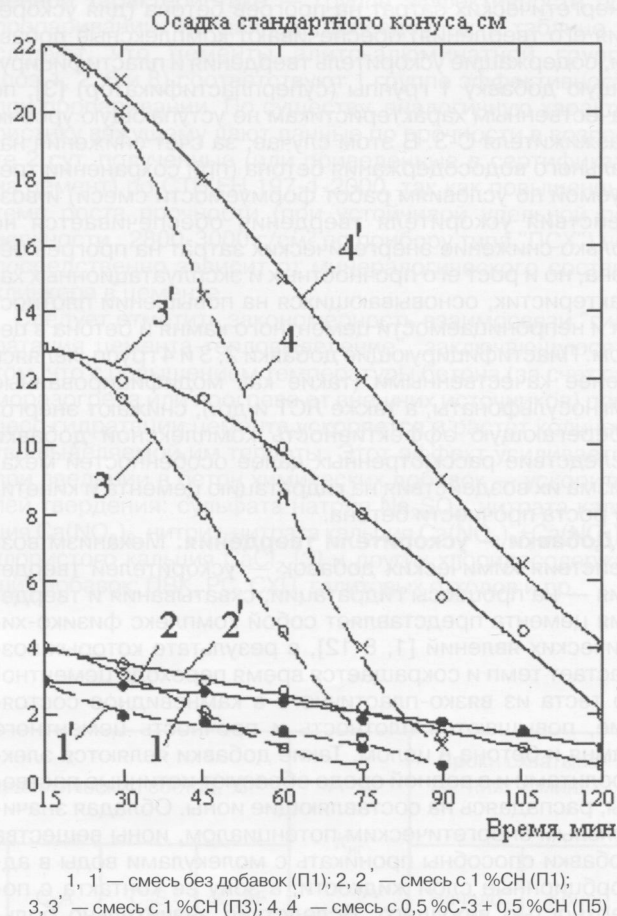


Рисунок 1. Тенденция изменения подвижности бетонной смеси с добавками под влиянием температуры среды (сплошная линия для температуры 5 °С—8 °С, прерывистая — для температуры 25 °С—30 °С)

точно отражена на рисунке 1. Во всех случаях состав бетона соответствовал классу по прочности $\text{C}^{25}/_{30}$. Очевидно, что подвижность бетонной смеси без добавок закономерно снижается с течением времени (при нарастающем темпе с повышением температуры до 25 °С—30 °С). Добавка СН незначительно влияет на темп снижения формуемости (до 45—60 мин от приготовления смеси), а затем этот процесс прогрессирует (особенно с ростом температуры). Комплексная добавка за счет стабилизирующего действия С-3 не ускоряет темп снижения формуемости смесей марок П1-П3 до 90 мин от момента приготовления, затем он несколько выше, чем у смеси без добавки. Литая смесь марки П5 ускоренно теряет формуемость и за 60—90 мин соответствует марке П2. Эта же тенденция просматривается при сравнении темпа снижения подвижности смеси марок П3 и П1. Он выше у смеси с большей начальной подвижностью. Данное явление обусловлено снижением относительного водосодержания цементного теста X. Так, в

приведенных примерах для П1, П3 и П5 его значения соответствовали $X \sim 1,68$; $X \sim 1,39$ и $X \sim 1,24$ для бетона одинакового класса по прочности ($C^{25/30}$) при возрастающей подвижности, что способствовало повышению темпов протекания процессов, приводящих к схватыванию цемента, особенно в присутствии добавки — ускорителя твердения — и с повышением температуры смеси. Статистическая обработка полученных данных позволяет получать зависимости для расчета ожидаемого периода сохраняемости требуемых формовочных свойств бетонной смеси с добавками различных видов.

Влияние добавок на коррозионное состояние арматуры предопределяется химическим составом их вещества.

Пластифицирующие добавки (за исключением УПБ и комплексных добавок, содержащих хлориды: ЛМГ, Универсал, Хидетал и др.) не активизируют стальную арматуру в бетоне, а повышение его плотности и непроницаемости за счет понижения начального водосодержания с введением пластификаторов способствуют росту защитных свойств бетона по отношению к арматуре, повышению эксплуатационной надежности и долговечности железобетонных конструкций.

Добавка УПБ и хлоридосодержащие добавки, включая комплексные, опасны с позиций сохранности арматуры в бетоне и, особенно, преднапряженной, поэтому должны применяться с ограничениями действующих нормативов [3, 14, 15]. Это обусловлено тем, что хлориды ограничительно связываются продуктами гидратации цемента в нерастворимые соединения (менее 0,2 % от массы цемента) [12] и обладают способностью снова переходить в свободное состояние при определенных условиях, например, при развитии процесса карбонизации бетона защитного слоя. Поэтому в европейских нормативах запрещается вводить добавки, содержащие хлориды, не только в железобетон, но и в бетон с "другим заданным металлом" [16] (например, анкерами, закладными деталями).

Бесхлоридные неорганические добавки — ускорители твердения: нитрат натрия ($NaNO_3$ или HN_3), нитрат кальция ($Ca(NO_3)_2$ или НК), нитрит-нитрат кальция ($Ca(NO_2)_2 + Ca(NO_3)_2$ или НКК), тринатрийфосфат (Na_3PO_4 или ТНФ), сульфат натрия (Na_2SO_4 или СН) в меньшей степени, чем хлориды, воздействуют на стальную арматуру. Вместе с тем повышенное содержание ионов NO_3^- может вызвать коррозионное растрескивание стали 3 группы [14, 17], а ионов SO_4^{2-} — активизировать коррозию стали. Безопасные дозировки этих добавок в железобетон (включая преднапряженный) составляют по сухому веществу до 3 % от МЦ, а для добавки СН — до 2 % и, в случае недопустимости образования высолов на поверхности конструкции, ее дозируют до 1 % от МЦ [3, 14].

При разработке энергосберегающих технологий на основе использования сульфатосодержащих добавок: сульфата натрия СН, суперпластификатора С-3 (содержит в своем составе до 9 %—10 % СН по массе сухого вещества) и комплексной добавки на их основе С-3 + СН (при дозировке этих веществ 0,35 %—0,8 % + 0,5 %—1,0 % от МЦ) были выполнены исследования на наличие возможного коррозионного воздействия на арматуру в бетоне сульфата натрия СН в дозировке 0,5 %—2,0 % от МЦ.

Составы бетона (12 разновидностей) характеризовались расходами цемента в диапазоне 200—500 кг на 1 м³ бетона при классах по прочности образцов в пределах $C^{8/10}$ — $C^{35/45}$ и подвижности бетонной смеси от 1 до 10 см осадки стандартного конуса. Эти пределы приняты с

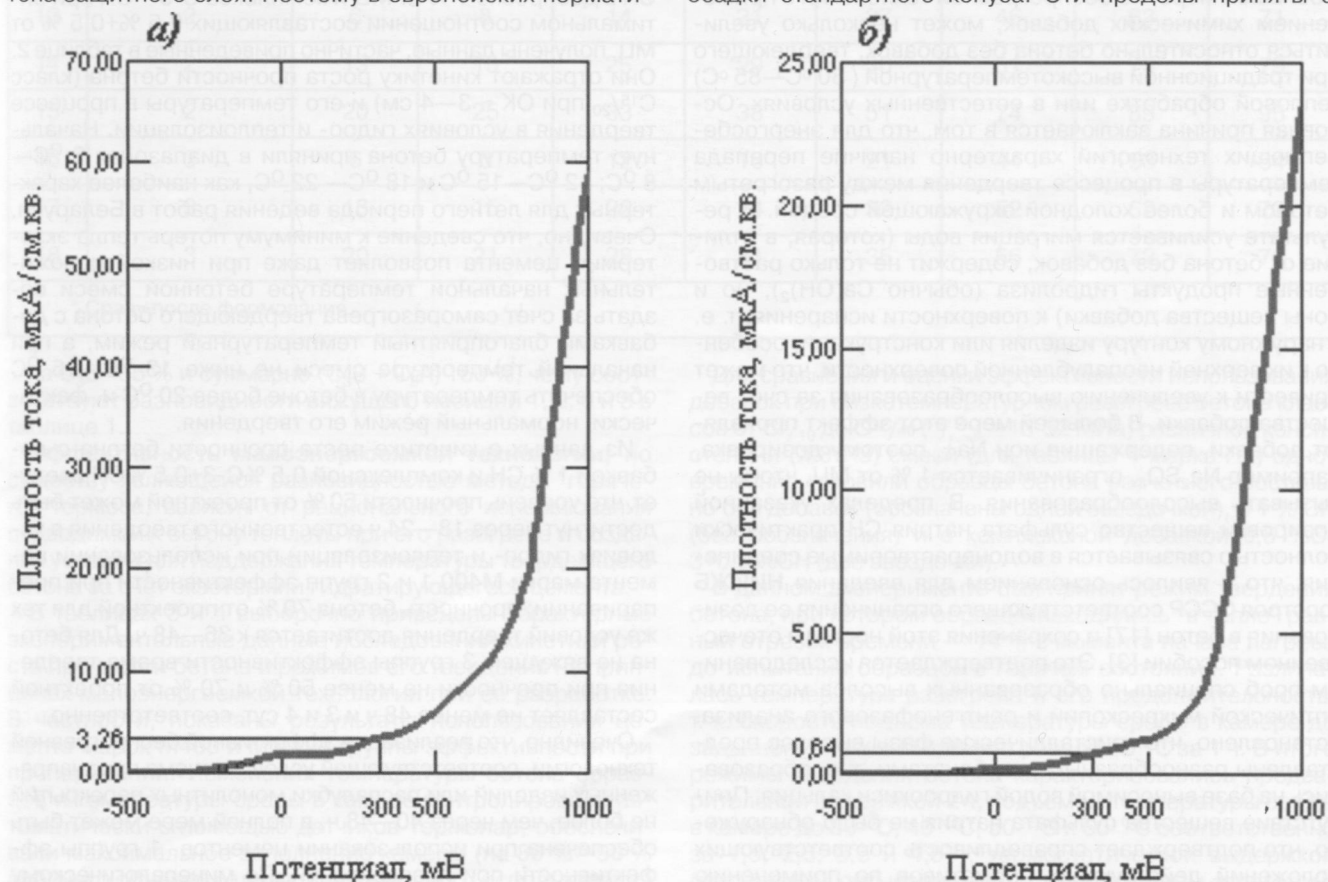


Рисунок 2. Анодные поляризационные кривые составов бетона с расходом цемента, кг/м³: а - 200; б - 405

учетом того, что при расходе цемента менее 300 кг, при превышении величин водосодержания (В/Ц бетона изменялось от 0,4 до 0,75) и осадки конуса, принятых в нормативных документах [18], снижается защитная способность бетона по отношению к стальной арматуре, так как при этом возникает вероятность роста пористости бетона и, соответственно, его проницаемости. Кроме того, при снижении содержания в бетоне цемента уменьшается база для поддержания в жидкости, заполняющей объем пор цементного камня, щелочности среды на уровне фактора $pH \geq 12$, что является необходимым условием сохранности стальной арматуры в бетоне.

Методика испытаний полностью соответствовала стандартной, поэтому ее описание не приводится. Экспериментальные данные исследований, частично представленные в виде графиков на рисунке 2а для бетона при расходе цемента Ц = 200 кг; В/Ц = 0,75; дозировке СН — 1,5 % от МЦ и на рисунке 2б для бетона: Ц = 405 кг; В/Ц = 0,46; дозировке СН — 1,0 % от МЦ, свидетельствуют, что все проверенные составы бетона характеризуются защитной способностью по отношению к стальной арматуре, оцениваемой величиной плотности тока менее 5 мкА/см² при потенциале +300 мВ. Это означает, что бетон с добавкой сульфата натрия обеспечивает пассивное состояние стальной арматуры, включая предварительно напрягаемую, а также ее сохранность в бетонах низких классов, характерных для производства элементов нулевого цикла зданий и сооружений, и для изготовления изделий крупнопанельного домостроения (КПД), плит пустотного настила и др.

Высолообразование бетона изделий и конструкций, изготавливаемых (возводимых) по малоэнергоемкой и, в большей мере, по беспрогревной технологии с применением химических добавок, может несколько увеличиться относительно бетона без добавок, твердеющего при традиционной высокотемпературной (80 °С—85 °С) тепловой обработке или в естественных условиях. Основная причина заключается в том, что для энергосберегающих технологий характерно наличие перепада температуры в процессе твердения между разогретым бетоном и более холодной окружающей средой. В результате усиливается миграция воды (которая, в отличие от бетона без добавок, содержит не только растворенные продукты гидролиза (обычно Са(ОН)₂), но и ионы вещества добавки) к поверхности испарения, т. е. к наружному контуру изделия или конструкции, особенно к их верхней неопалубленной поверхности, что может привести к увеличению высокообразования за счет вещества добавки. В большей мере этот эффект проявляют добавки, содержащие ион Na⁺, поэтому дозировка, например Na₂SO₄, ограничивается 1 % от МЦ, чтобы не вызывать высокообразования. В пределах указанной дозировки вещество сульфата натрия СН практически полностью связывается в водонерастворимые соединения, что и явилось основанием для введения НИИЖБ Госстроя СССР соответствующего ограничения ее дозирования в бетон [17] и сохранения этой нормы в отечественном пособии [3]. Это подтверждается исследованием проб специально образованных высолов методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа. Установлено, что кристаллические фазы высолов представлены разнообразными карбонатами, т. е. образовались на базе выносимой водой гидроокиси кальция. Присутствие вещества сульфата натрия не было обнаружено, что подтверждает справедливость соответствующих положений действующих нормативов по применению этой добавки. Существенным является также и то, что

кристаллы Na₂SO₄ способны выветриваться и появление их в виде белесого налета на поверхности бетона, твердеющего по беспрогревной технологии, имеет временный характер: он самоликвидируется под воздействием атмосферы. Одновременно это явление требует хранения данной добавки в закрытой таре (упаковке).

КИНЕТИКА И РЕЖИМЫ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Для беспрогревной технологии изготовления изделий и ведения строительства из цементного бетона необходимо создать условия наиболее полного использования экзотермии вяжущего при организации твердения бетона по методу "холодного" термоса. Поэтому применение монодобавок-пластификаторов, включая и суперпластификаторы, например С-3, которые "тормозят" процессы гидратации и, соответственно, снижают тепловыделение цемента в начале твердения, неоправданно. Это подтверждается тем, что в первые 1—1,5 сут снижается темп роста прочности бетона с добавкой С-3, в сравнении с бетоном без добавки, а эффект от снижения водоцементного отношения бетона начинает проявляться через 36—40 ч твердения и выражается в росте его прочности на 3 сут и в дальнейшем. Отмеченное характерно для всего диапазона дозировки С-3 от 0,35 % до 0,8 % от МЦ; в последнем случае "тормозящий" эффект в 1—2 сут значительно больше, но и выше последующий прирост прочности бетона после 3 сут твердения, т. е. снижение начального водосодержания бетона было наибольшим (25 %). В процессе экспериментов по выявлению рациональных режимов беспрогревного твердения бетона с использованием добавки сульфата натрия СН в дозировке 1 % от МЦ и комплекса С-3 + СН при оптимальном соотношении составляющих 0,5 % + 0,5 % от МЦ, получены данные, частично приведенные в таблице 2. Они отражают кинетику роста прочности бетона (класс С15/20 при ОК ~ 3—4 см) и его температуры в процессе твердения в условиях гидро- и теплоизоляции. Начальную температуру бетона приняли в диапазонах 5 °С—8 °С; 12 °С—15 °С и 18 °С—22 °С, как наиболее характерных для летнего периода ведения работ в Беларуси. Очевидно, что сведение к минимуму потерь тепла экзотермии цемента позволяет даже при низкой положительной начальной температуре бетонной смеси создать за счет саморазогрева твердеющего бетона с добавками благоприятный температурный режим, а при начальной температуре смеси не ниже 13 °С—15 °С обеспечить температуру в бетоне более 20 °С и, фактически, нормальный режим его твердения.

Из данных о кинетике роста прочности бетона с добавкой 1 % СН и комплексной 0,5 % С-3 + 0,5 % СН следует, что уровень прочности 50 % от проектной может быть достигнут через 18—24 ч естественного твердения в условиях гидро- и теплоизоляции при использовании цемента марки М400 1 и 2 групп эффективности при пропаривании; прочность бетона 70 % от проектной для тех же условий твердения достигается к 36—48 ч. Для бетона на вяжущем 3 группы эффективности время твердения при прочности не менее 50 % и 70 % от проектной составляет не менее 48 ч и 3 и 4 сут, соответственно.

Очевидно, что реализация эффективной беспрогревной технологии, соответствующей условию съема преднапряженных изделий или распалубки монолитных перекрытий не более, чем через 40—48 ч, в полной мере может быть обеспечена при использовании цементов 1 группы эффективности при пропаривании. По минералогическому составу — это цемент с содержанием в клинкере минера-

Таблица 2. Кинетика изменения температуры и прочности бетона на сжатие при твердении в условиях термоса

№ пп	Группа эффективности цемента М400	Температура бетона, °С, к исходу суток				Прочность бетона на сжатие, % от проектной, через сутки			
		0*	1	2	3	1	2	3	4
Добавка СН в количестве 1 % от МЦ									
1	1	6	11	16	22	35	47	59	69
2	1	13	20	27	31	44	55	67	78
3	1	20	30	36	41	57	78	88	95
4	2	6	9	13	18	28	44	55	66
5	2	13	17	25	28	40	51	63	74
6	2	20	28	34	37	54	73	85	92
7	3	6	8	11	16	23	40	49	52
8	3	13	15	21	23	35	47	58	69
9	3	20	23	46	30	39	56	70	75
Добавка 0,5 %С-3 + 0,5 %СН									
10	1	6	9	17	24	32	50	65	76
11	1	13	18	28	33	41	58	74	82
12	1	20	28	37	42	54	79	92	96
13	2	6	8	14	21	27	46	63	71
14	2	13	15	25	29	36	51	70	79
15	2	20	25	33	38	51	74	89	95
16	3	6	8	12	16	21	44	53	64
17	3	13	15	22	24	32	52	62	73
18	3	20	21	28	31	35	56	72	76

* Сразу после формирования.

ла С₃S 55 % и суммарно (С₃S + С₃A) 60 %, чему соответствуют разновидности вяжущего позиций 1, 2, 6 и 8 в таблице 1.

Эффективность малоэнергоемкой технологии, по существу являющейся разновидностью метода "горячего" термоса, зависит от рационального использования подводимой к бетону теплоты при его разогреве и создания условий для поддержания температуры твердеющего бетона за счет экзотермии гидратирующегося цемента.

В таблицах 3 и 4 выборочно приведены характерные экспериментальные данные исследований кинетики роста прочности бетона и режимов его твердения на принципах малоэнергоемкой технологии при ее разработке. В частности, показаны результаты использования цемента марок М400 и М500 2 группы эффективности при пропаривании. Изменения температуры бетона образцов и температуры среды в камере контролировали автоматически с помощью датчиков-термопар; обеспечивали максимальное заполнение камеры (на 80 %—90 % рабочего объема) с целью более полного использования эффекта тепловыделения гидратирующегося цемента.

Для сравнения и оценки эффективности использования добавок при низкотемпературном разогреве бетона классов от С⁸/₁₀ до С³²/₄₀ ($f_{c,cube}^G \sim 13-52$ МПа) различной консистенции (ЖЗ-ПЗ) смеси (для таблицы 4 марка П2) одновременно готовили образцы бетона расчетного состава, но без добавок (обозначены одной звездочкой), с 1 % СН (без обозначения) и с комплексной добавкой 0,5 %С-3+0,5 %СН (две звездочки).

В данном эксперименте был принят режим твердения бетона, при котором образцы находились "в тепле" равный отрезок времени — 14 ч, с момента начала нагрева до испытания образцов в горячем состоянии. Различалась температура разогрева и его продолжительность, т. к. скорость подъема температуры среды в камере до заданного значения принята равной 10 °С за 1 ч. В итоге режимы твердения бетона характеризовались предварительной выдержкой 2 ч, подъемом температуры среды в камере до 30 °С, 40 °С, 50 °С и 60 °С соответственно за 1,5; 2,5; 3,5 и 4,5 ч; термостатической выдержкой (медленным остыванием вместе с тепловым агрегатом) в течение 12,5; 11,5; 10,5 и 9,5 ч соответственно.

Таблица 3. Изменение температуры среды в камере и твердевшего бетона с добавкой 1 %СН

Температура нагрева среды в камере, °С	Температура среды в камере (числитель) и бетона (знаменатель) через время, ч, с момента начала нагрева														
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	6	8	10	12	14
30	$\frac{14}{15}$	$\frac{19}{17}$	$\frac{25}{21}$	$\frac{31}{24}$	$\frac{24}{25}$	$\frac{24}{27}$	$\frac{25}{28}$	$\frac{26}{20}$	$\frac{26}{30}$	$\frac{27}{30}$	$\frac{27}{30}$	$\frac{26}{30}$	$\frac{26}{29}$	$\frac{25}{28}$	$\frac{24}{28}$
40	$\frac{16}{16}$	$\frac{20}{18}$	$\frac{25}{23}$	$\frac{32}{26}$	$\frac{36}{29}$	$\frac{40}{34}$	$\frac{32}{35}$	$\frac{33}{37}$	$\frac{33}{38}$	$\frac{34}{40}$	$\frac{35}{42}$	$\frac{35}{41}$	$\frac{33}{41}$	$\frac{32}{40}$	$\frac{31}{37}$
50	$\frac{16}{15}$	$\frac{20}{17}$	$\frac{26}{23}$	$\frac{33}{27}$	$\frac{37}{30}$	$\frac{42}{35}$	$\frac{48}{39}$	$\frac{52}{45}$	$\frac{42}{46}$	$\frac{42}{47}$	$\frac{44}{50}$	$\frac{44}{50}$	$\frac{43}{48}$	$\frac{43}{47}$	$\frac{42}{46}$
60	$\frac{15}{14}$	$\frac{18}{16}$	$\frac{25}{22}$	$\frac{31}{26}$	$\frac{36}{29}$	$\frac{41}{35}$	$\frac{46}{39}$	$\frac{50}{44}$	$\frac{55}{49}$	$\frac{61}{53}$	$\frac{50}{55}$	$\frac{51}{56}$	$\frac{51}{56}$	$\frac{49}{54}$	$\frac{48}{52}$

Таблица 4. Кинетика роста прочности разогретого бетона

Температура нагрева бетона, °С	Класс бетона	Марка цемента	Прочность бетона, % от проектной, в возрасте				
			"Горячие" образцы	Через 4 ч после остывания	2 сут	3 сут	28 сут
До 30 °С	C ⁸ / ₁₀ *	M400	33	37	50	68	100
	C ⁸ / ₁₀	M400	51	54	74	83	107
	C ²⁵ / ₃₀ *	M500	34	38	52	69	102
	C ²⁵ / ₃₀	M500	53	57	77	85	105
	C ³² / ₄₀	M500	57	61	79	89	109
	C ⁸ / ₁₀ **	M400	54	58	77	90	110
До 40 °С	C ²⁵ / ₃₀ **	M500	58	62	81	92	114
	C ⁸ / ₁₀	M400	58	61	80	88	106
	C ²⁵ / ₃₀	M500	62	66	81	90	104
	C ³² / ₄₀	M500	64	67	85	92	107
	C ⁸ / ₁₀ **	M400	68	73	84	92	110
До 50 °С	C ²⁵ / ₃₀ **	M500	70	75	85	93	119
	C ⁸ / ₁₀ *	M400	50	54	61	72	102
	C ⁸ / ₁₀	M400	72	75	83	90	107
	C ⁸ / ₁₀ **	M400	75	82	87	93	111
До 60 °С	C ²⁵ / ₃₀ **	M500	77	85	88	95	114
	C ⁸ / ₁₀	M400	79	82	89	95	102
	C ²⁵ / ₃₀	M400	81	84	91	97	102
	C ³² / ₄₀	M500	85	87	92	97	103
	C ⁸ / ₁₀ **	M400	84	87	95	102	110
	C ²⁵ / ₃₀ **	M500	86	90	94	101	108

* Образцы бетона без добавок.

** Образцы бетона с комплексной добавкой 0,5 %С-3+0,5 %СН.

Примечание — Без звездочек — образцы бетона с добавкой 1 %СН.

Данные таблицы 3 отражают несколько характерных моментов:

— наличие градиента температуры между средой и более холодным бетоном на стадии подъема даже со скоростью 10 °С/ч (составил до 10 °С);

— снижение температуры среды с прекращением подвода тепла до 10 °С;

— превышение температуры твердеющего разогретого бетона над температурой среды в камере в дальнейшем.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что решение задачи бездефектной распалубки бетонных изделий и железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой обеспечивается через 14 ч (с учетом предварительной выдержки бетона 16 ч) термостатического твердения бетона с мододелкой СН при начальном разогреве среды в камере до 30 °С—40 °С. В означенных условиях бетон с добавкой СН характеризуется прочностью 50 %—63 % от проектной, а после 4-часового остывания образцов — 55 %—68 % от проектной. Бетон без ускорителя твердения в одинаковых условиях достигает прочности 33 %—40 % от проектной.

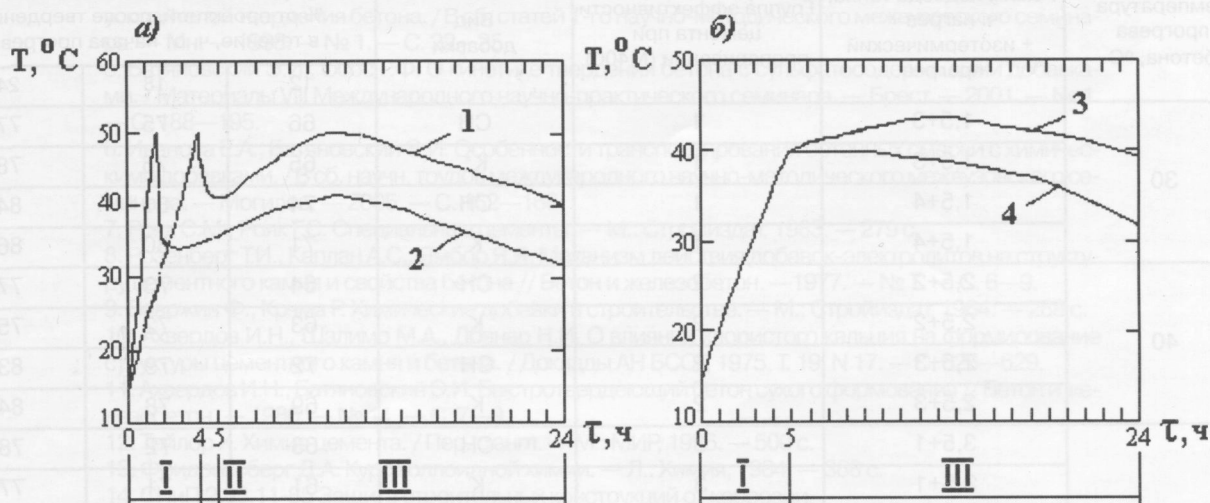
Повышение температуры нагрева до 50 °С и последующая термостатическая выдержка (остывание в камере) до 14 ч твердения бетона с добавкой СН обеспечивают уровень прочности "горячих" образцов до 70 %—75 % и после 4 ч остывания — до 75 %—80 %. Тем самым достигается требуемая передаточная прочность бетона изделий и конструкций с предварительно напрягаемой арматурой.

Увеличение температуры нагрева до 60 °С позволяет повысить прочность бетона с добавкой СН до 80 %—87 % для "горячих" образцов (до 82 %—90 % после их остывания). Однако необходимо отметить, что с повышением температуры разогрева снижается темп роста прочности бетона при "дозревании" на 2 и 3 сут.

Сравнение кинетики роста прочности бетона с добавками 1 %СН и 0,5 %С-3+0,5 %СН в условиях термостатического твердения образцов после кратковременного нагрева свидетельствует о проявлении тенденции к росту прочности бетона с комплексной добавкой, особенно с повышением температуры нагрева до 40 °С и более.

Температурный режим твердения бетона с начальным разогревом характеризуется закономерностями, приведенными на рисунке 3. При производстве сборного железобетона с использованием разнообразных тепловых агрегатов общая тенденция изменения температуры в них отражается закономерностями, представленными на графике рисунка 3а. Рекомендуемый медленный (плавный) подъем температуры (стадия I) до требуемого уровня за 3—4 ч сводит к минимуму разницу температуры разогреваемого бетона, среды и контактирующих с ней конструктивных элементов теплового агрегата. Как следствие, — ниже перепад температуры после прекращения подвода тепла (стадия II), выше температура бетона и интенсивнее тепловыделение цемента, инициируемое ускорением его гидратации под комплексным воздействием добавок и температуры. В технически исправных агрегатах (особенно, утепленных по внутреннему контуру) температура твердеющего бетона (стадия III), как правило, превышает температуру его разогрева в течение 6—12 ч твердения. Контрольным фактором соответствия температурных условий твердения бетона требуемым (т. е. обеспечивающим заданный уровень его прочности к моменту распалубки изделий) является скорость снижения температуры среды в тепловом агрегате (стадия III, рисунок 3а). Наибольший результат по снижению энергетических затрат при одновременном обеспечении прочности бетона не менее 70 % от проектной через 12—16 ч от начала подвода тепла обеспечивается, если скорость снижения температуры среды в тепловом агрегате не превышает 1,5 °С/ч. Ее рост до 2—3 °С/ч сопровождается понижением температуры твердеющего бетона и соответствующим замедлением темпа роста его прочности, что должно учитываться при постановке энергосберегающих технологий на производство и назначении температуры разогрева бетона с учетом конкретных условий его твердения.

Рекомендуемый медленный (~ 5 °С/ч) подъем температуры бетона монолитных конструкций (стадия I, рисунок 3б) обеспечивает практическую однородность "теплового поля" по ее сечению и сведение к минимуму деструктивных явлений от термических межфазных деформаций и миграции влаги в объеме бетона.



- 1 — при рекомендуемом режиме подъема температуры;
- 2 — при ускоренном режиме подъема температуры;
- 3 — для утепленных опалубок;
- 4 — рядовые опалубки с палубой из фанеры (дерева)

Рисунок 3. Тенденция изменения температурного режима твердения бетона:
а — сборные изделия;
б — монолитные конструкции

Безусловно, что минимальные затраты энергии (фактически только на разогрев бетона, внутреннего контура опалубки и, в меньшей мере, на потери в окружающую среду по внешнему контуру конструкции) обеспечивают утепленные опалубки с фанерными (деревянными) палубами при гидро- и теплоизоляции неопалубленных поверхностей. Тенденция изменения температурного режима твердения бетона для данного случая (стадия III, рисунок 3б) отражает общую закономерность в виде графика № 3, а для не утепленных опалубок — графика № 4. Естественно, что изменение конкретных условий (модуля поверхности, коэффициента теплопередачи опалубки и не опалубленных поверхностей, температуры воздуха, скорости ветра и т. д.) твердения бетона будет отражаться семейством однотипных кривых при соблюдении общей означенной тенденции. Так, графическая зависимость № 3 построена по экспериментальным данным, полученным при твердении бетона класса $C_{25/30}$ ($OK \sim 7-9$ см) с 1 %СН в утепленной опалубке ($K_T \sim 0,6$ Вт/(м² · °С) при $v_B = 0$ м/с; $M_n \sim 18$ м⁻¹; $t_{нв} = -10$ °С) с палубой из фанеры $\delta = 12$ мм, а график № 4 — для тех же условий, но для не утепленной опалубки с такой же палубой ($K_T \sim 5,8$ Вт/(м² · °С)). Прочность бетона (в процентах от проектной), разогретого электродами, при этом характеризовалась значениями (через 12, 18 и 24 ч твердения, соответственно) 45 %, 66 % и 72 % для утепленной и 41 %, 52 % и 58 % для не утепленной опалубки. В таблице 5 приведены данные о кинетике роста прочности бетона с добавкой 1 %СН и комплексной добавкой 0,5 %С-3 + 0,5 %СН в деревянных формах ($\delta \sim 25$ мм; $K_T \sim 2,44$ Вт/(м² · °С) при $v_B = 0$ м/с) при электропрогреве с последующим остыванием в форме (верх гидро- и теплоизолирован).

Из вышеизложенного следует, что используя добавки в сочетании с кратковременным прогревом бетона в течение 4,5—5,5 ч, даже в не утепленной деревянной опалубке возможна реализация малоэнергоемкой техноло-

гии, однако с меньшей эффективностью, чем в теплоизолированных опалубках в связи с необходимостью изотермического прогрева в течение 1—4 ч. При этом очевидно, что наименьшие энергетические затраты на стадии твердения бетона с прогревом обеспечивает применение цемента 1 группы по эффективности пропаривания, характеризующегося наибольшей экзотермией. При использовании не утепленной опалубки рационально увеличение температуры разогрева до 50 °С, что в совокупности с активным (1 группы) вяжущим обеспечивает за 16—24 ч твердения бетона уровень прочности 80 %—90 % от проектной.

Следует отметить, что наиболее интенсивно прочность разогретого бетона, твердеющего в не утепленной опалубке, нарастает в первые 12—18 ч, а затем темп ее роста снижается. Это непосредственно связано с теплопотерями в окружающую среду. В результате чего выделяющаяся теплота экзотермии цемента не накапливается, а расходуется на поддержание температуры твердеющего бетона. И когда потери тепла в окружающую среду начинают превалировать, температура твердеющего бетона снижается, что сопровождается потерей темпа роста его прочности.

КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Низкотемпературный режим твердения бетона с добавками при беспроегревной и малоэнергоемкой технологиях изготовления сборных изделий или возведения монолитных конструкций привносит определенные особенности, которые необходимо учитывать технологическим и контролирующим службам строительных предприятий и организаций. Основное отличие от бетона, твердеющего в условиях традиционной тепловой обработки при температуре, достигающей 80 °С—85 °С, заключается в его более высокой влажности в целом и, особенно, поверхностей изделий (конструкций), кон-

Таблица 5. Кинетика роста прочности бетона с кратковременным прогревом ($t_{нв} = -10$ °С)

Температура прогрева бетона, °С	Режим подвода тепла, ч: нагрев + изотермический прогрев	Группа эффективности цемента при пропаривании (М400)	Вид добавки	Прочность бетона на сжатие, % от проектной, после твердения в течение, ч, от начала прогрева		
				12	18	24
30	1,5+3	1	СН	66	75	77
	1,5+3	1	К*	65	76	78
	1,5+4	1	СН	74	81	84
	1,5+4	1	К	71	80	86
40	2,5+2	2	СН	64	73	77
	2,5+2	2	К	63	72	75
	2,5+3	2	СН	72	79	83
	2,5+3	2	К	69	78	84
50	3,5+1	3	СН	63	72	78
	3,5+1	3	К	61	71	77
	3,5+2	3	СН	71	78	82
	3,5+2	3	К	70	77	84
	3,5+1	1	СН	82	88	91
	3,5+1	1	К	80	89	93

* Комплексная добавка.

тактирующих с бортоснажкой (опалубкой). Кроме того, при низкой температуре твердения бетона ограничивается эффект испарения гидрофобных составляющих смазок и, наоборот, усиливается эффект сорбции их формирующейся пористостью "пристенного" слоя твердеющего цементного камня. В результате имеет место снижение твердости, прочности и упругости контактного слоя бетона. Вследствие отмеченных явлений значение прочности бетона, определенной методами: пластических деформаций, упругого отскока, резонансным и ультразвуковым (с поверхности), существенно занижается относительно фактической. Отклонение между фактической прочностью бетона на сжатие, установленной по изготовленным и выбуренным образцам, и определенной указанными методами составляет до 30 %—50 % на гранях "из-под металла" и до 10 %—15 % на "открытой" в процессе твердения поверхности. При этом результаты определения прочности бетона каждым из этих методов в отделимости были стабильными, что свидетельствует о возможности их применения с учетом соответствующей тарировки.

Практическое совпадение в определении прочности бетона показал метод отрыва со скалыванием и занижение ее на 10 %—15 % — метод сквозного прозвучивания ультразвуком. Однако первый из них трудоемок, а применимость второго существенно ограничена конструктивными особенностями контролируемых "объектов" в виде сборных изделий или монолитных конструкций, наличием и насыщенностью их арматурой, технической сложностью (иногда — невозможностью) выполнения определений. Следует отметить, что точность

оценки прочности бетона прямо зависит от уровня соблюдения требований соответствующих стандартов, методик выполнения определений, системности контроля и подготовленности (навыков) исполнителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Рациональное использование разработанных эффективных энергосберегающих технологий цементного бетона обеспечивает:

— снижение энергетических затрат на ускоренное твердение бетона сборных и монолитных конструкций до 125 000 кДж/м³ при достижении прочности на уровне 70 %—80 % от проектной за 14—18 ч твердения в тепловых агрегатах (опалубках);

— беспрогревный вариант ускоренного твердения бетона в летний период при достижении прочности 70 %—80 % от проектной за 40—48 ч выдержки в условиях гидро- и теплоизоляции;

— ускоренный (двукратный) оборот бортоснажки (опалубки) за 8—12 ч работы при форсированном режиме разогрева бетона с добавками в варианте малоэнергоемкой технологии.

2 Наибольшая эффективность от использования энергосберегающих технологий может быть обеспечена системным соблюдением изложенных в настоящей статье положений и рекомендаций, касающихся качества цемента, применения добавок, обеспечения условий и режимов твердения бетона, постановкой надлежащего технологического контроля за производственным процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. — М.: Стройиздат, 1989. — 188 с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. — М.: Стройиздат, 1990. — 400 с.
3. П1-99 к СНиП 3.09.01-85 Применение добавок в бетоне — 33 с.
4. Батяновский Э.И., Осос Р.Ф. Технологические особенности производства ЖБИ с применением ускорителей твердения бетона. / В сб. статей 1-го научно-методического межвузовского семинара. — Мн. — 1998. — № 1. — С. 22—25.
5. Батяновский Э.И., Осос Р.Ф. О кинетике твердения бетона с сульфатосодержащими добавками. / Материалы VIII Международного научно-практического семинара. — Брест. — 2001. — № 1. — С. 188—195.
6. Иванова Е.А., Батяновский Э.И. Особенности транспортирования бетонных смесей с химическими добавками. / В сб. науч. трудов международного научно-методического межвузовского семинара. — Могилев. — 2005. — С. 162—168.
7. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. — М.: Стройиздат, 1983. — 279 с.
8. Розенберг Т.И., Каплан А.С., Ямбор Я.Я. Механизм действия добавок-электролитов на структуру цементного камня и свойства бетона // Бетон и железобетон. — 1977. — № 7. — С. 6—9.
9. Вавржин Ф., Крчма Р. Химические добавки в строительстве. — М.: Стройиздат, 1964. — 288 с.
10. Ахвердов И.Н., Шалимо М.А., Довнар Н.И. О влиянии хлористого кальция на формирование структуры цементного камня и бетона. / Доклады АН БССР, 1975. Т. 19, N 17. — С. 626—629.
11. Ахвердов И.Н., Батяновский Э.И. Быстротвердеющий бетон сухого формования // Бетон и железобетон. — 1986. — № 11. — С. 7—9.
12. Тейлор Х. Химия цемента. / Пер. с англ. — М.: МИР, 1996. — 500 с.
13. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. — Л.: Химия, 1984. — 368 с.
14. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии.
15. СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции.
16. Европейский стандарт EN 206-1:2001.
17. Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85)/ НИИЖБ. — М.: Стройиздат, 1989. — 39 с.
18. СТБ 1168-99 Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона.

Статья поступила в редакцию 18.05.06.