

ISSN 2077-8481

ВЕСТНИК

№ 2, 2012



БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

УДК 620.9.008

О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут, Э. И. Батяновский

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА

UDC 620.9.008

O. U. Sheyda, E. E. Korbut, E. I. Batyanovskiy

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURES FOR MASS CONCRETE ENERGY-SAVING TECHNOLOGY

Аннотация

Рассмотрена проблема сохранения во времени формовочных свойств бетонных смесей с химическими добавками, способствующими ускоренному твердению бетона и снижению энергетических затрат на этот процесс, с учетом свойств цемента, условий транспортирования смеси и других факторов.

Ключевые слова:

цементный бетон, зимнее бетонирование, бетонные смеси, добавки, схватывание, добавки-ускорители, добавки-пластификаторы.

Abstract

This paper reflects the problem of maintaining moulding properties of concrete mixtures with chemical admixtures which accelerate concrete hardening and reduce the amount of energy consumed by this process, with taking into account cement properties, conditions of mixture transportation and other factors.

Key words:

cement concrete, winter concreting, concrete mixture, admixtures, setting, accelerating agents, plasticizing agents.

Введение

В заводской технологии производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций широко используют химические добавки, ускоряющие твердение бетона, с целью снижения энергетических затрат на осуществление этого процесса [1, 2]. В монолитном строительстве с применением цементного бетона этот эффективный даже в специфических технологиях [3] прием используется явно не достаточно. Одним из сдерживающих факторов является отсутствие четких представлений о влиянии добавок ускорителей твердения бетона на сохраняемость во времени пластических свойств бетонных смесей. Устоявшееся мнение о резком ускоре-

нии схватывания цемента и ухудшении формовости (удобокладываемости) бетонных смесей, базирующееся на опыте применения хлоридсодержащих химических веществ, распространяется на группу ускорителей твердения в целом. Кроме этого, в технологии монолитного бетона не получили должного развития представления о теплофизических закономерностях ускоренного твердения бетона с химическими добавками в сочетании с применяемыми приемами его тепловой интенсификации – электродным прогревом, обогревом греющими проводами, индукционным нагревом и др., что позволяет в первые сутки обеспечивать прочность бетона до 70...90*% от проектной при

сниженных энергетических затратах.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по оценке изменений формуемости бетонных смесей с добавкой сульфата натрия (Na_2SO_4) и комплексной на ее основе в зависимости от свойств цемента и влияния иных факторов.

Следует отметить, что добавка сульфата натрия разрешена к применению в железобетоне с обычной и напрягаемой арматурой, включая сталь группы «В» и арматуру диаметром менее 5 мм [4, 5], т. е. в случаях, когда запрещены к применению добавки на основе хлоридов и, частично, нитратов. Кроме этого, в соответствии с положениями нормативов [6] она разрешена к применению в железобетоне в дозировке до 1 % от массы цемента при наличии выпусков арматуры и закладных деталей с алюминиевыми или цинковыми защитными покрытиями, т. е. в случаях, когда по приведенным нормативным документам запрещаются к введению в бетон практически все иные добавки-электролиты.

Влияние добавок на схватывание цемента

Схватывание как явление. Схватывание затворенного водой цемента (цементного теста) отражает процесс связывания воды затвердения частицами твердой фазы. В начальный период взаимодействия распределение жидкости в системе солевых оболочек частиц (флокул) цемента неравномерно и миграция воды связана с проявлением электростатических сил поверхности вяжущего. Со временем в системе «цемент-вода» развивается процесс гидролиза-гидратации, который сопровождается «выходом» в объем жидкой фазы элементарных частиц вяжущего. Они, в свою очередь, адсорбируют некоторое количество молекул воды, образуя собственную оболочку из ее тончайших слоев. Развитие гидратационного процесса на некоторой стадии приводит к зарождению первичных связей между

обводненными частицами вяжущего, проявлению сил Ван-дер-Ваальса в формирующейся коагуляционной структуре цементного теста.

Этот момент фиксируется как начало схватывания с помощью прибора Вика.

Углубление процесса гидратации вяжущего сопровождается постепенным связыванием воды твердой фазой как физическим (адсорбция поверхностью), так и химическим путем (образование новых фаз – этtringита, гидроокиси кальция, гидроалюминатов кальция). С течением времени вся жидкость переходит из свободного в связанное состояние и взаимное расположение частиц твердой фазы, включая непрореагировавшие к этому времени «ядра» взаимодействующих с водой частиц цемента, фиксируется за счет появления связей между накопившимися в жидкости элементарными частицами новых фаз (новообразованиями). Эти силы незначительны, но достаточны для того, чтобы цементное тесто утратило способность к пластическим деформациям, а его структура приобрела способность удерживать приданную форму.

По прибору Вика в это время фиксируют конец периода схватывания. Дальнейшее развитие процесса гидратации вяжущего сопровождается резким ускорением образования новых фаз, роста плотности их взаимной «упаковки» и прочности цементного камня. То есть явление схватывания – процесс формирования и становления коагуляционной структуры цементного теста переходит в процесс твердения, который характеризуется постепенным образованием структуры кристаллогидратных новообразований из гидросиликатов, алюминатов и ферритов клинкерных минералов портландцемента [7, 8].

Период времени, предшествующий схватыванию, когда бетонная смесь на портландцементе достаточно устойчиво сохраняет формовочные свойства, называют индукционным. Его

продолжительность зависит от сочетания целого ряда факторов, в том числе и от количества вводимых в бетон химических добавок.

Добавки-ускорители твердения бетона являются истинными электролитами. Их ионы активно влияют на развитие (ускорение) процесса гидролиза клинкерных минералов, способствуют дезагрегации цементных флоккул, интенсифицируют процесс образования новых фаз [9–11]. В результате сокращается продолжительность индукционного периода, ускоряются схватывание и потеря формовочных свойств бетонной смеси.

Добавки-пластификаторы содержат поверхностно-активные вещества, адсорбция молекул которых поверхностью вяжущего (при оптимальных дози-

ровках – у ее «активных центров»), наоборот, приводит к торможению гидратационного процесса и увеличению сроков схватывания цементного теста и бетона. Изложенное относится и к исследуемым добавкам: сульфату натрия (Na_2SO_4 ; СН), пластификаторам первой группы (суперпластификаторам (СП)) и их сочетаниям в виде комплексного вещества. Их влияние на сроки схватывания цемента изучали по стандартной методике [12], варьируя количество добавки и используя цементы отечественных заводов (табл. 1). Характеристика о минералогическом составе вяжущих получена как средние значения накопленных в течение времени (начиная с 1995 г.) данных по сертификатам, представленным лабораториями заводов ЖБИ Беларуси.

Табл. 1. Характеристики цементов, использованных в исследованиях

| Номер цемента | Завод-изготовитель | Марка цемента | Группа активности при пропаривании | Минералогический состав, % | | | | $K_{\text{ш}}$ | Срок схватывания, ч | |
|---------------|----------------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-------|
| | | | | C_2S | C_3A | C_2F | C_4AF | | Начало | Конец |
| 1 | БЦЗ | M500-Д0 | 1 | 60 | 7,3 | 15 | 11,5 | 0,255 | 2,05 | 3,10 |
| 2 | БЦЗ | M400-Д0 | 1 | 56 | 6,5 | 18 | 13 | 0,265 | 2,10 | 3,20 |
| 3 | Кричевцементно-шифер | M500-Д0 | 2 | 54 | 5 | 21 | 16 | 0,26 | 3,15 | 5,10 |
| 4 | Кричевцементно-шифер | M400-Д20 | 3 | 51 | 4,5 | 26 | 15 | 0,27 | 3,20 | 5,10 |
| 5 | Красносельскцемент | M500-Д0 | 1 | 55 | 4,7 | 20 | 15 | 0,255 | 2,05 | 3,17 |
| 6 | Красносельскцемент | M500-Д20 | 2 | 53 | 3,3 | 23 | 15,7 | 0,26 | 2,35 | 3,55 |
| 7 | Красносельскцемент | M400-Д20 | 2 | 52 | 3,8 | 22 | 17,5 | 0,265 | 2,30 | 3,40 |

Оценка изменений сроков схватывания. Влияние добавок сульфата натрия (СН), суперпластификатора (СП) (исследовано влияние добавок С-3; СП-1; Стахемент-Ф; данные приведены для Ст-Ф под маркировкой «СП» (при практическом равенстве результатов для указанных добавок)) и комплексной на их основе на сроки схватывания отечественных цементов, различающихся минералогическим и вещественным составом, маркой (активностью), приведены в

табл. 2...4. Выявлено, что введение добавки СН сокращает сроки схватывания цемента с увеличением ее дозировки по всем видам использованного вяжущего. При этом действие добавки в большей мере проявляется с ростом активности вяжущего. Так, при равных дозировках СН в 0,5 и 1 % от массы цемента время начала схватывания вяжущих первой группы активности сократилось (от его значения для теста нормальной густоты цемента без добавки СН) на 9...12 и

20...25 % соответственно; для цементов второй и третьей групп активности – на 4...6 и 12...16 % соответственно.

Табл. 2. Изменение сроков схватывания цементов при введении добавки СН

| Номер цемента (см. табл. 1) | Исходный срок схватывания, ч | | Срок схватывания, ч, цемента при введении СН в количестве, % | | | | | |
|---|------------------------------|-------|--|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 0,5 | | 1,0 | | 1,5 | |
| | Начало | Конец | Начало | Конец | Начало | Конец | Начало | Конец |
| 1 | 2,05 | 3,10 | 1,52 | 2,48 | 1,35 | 2,24 | 1,12 | 2,05 |
| 2 | 2,10 | 3,20 | 1,55 | 3,02 | 1,44 | 2,35 | 1,20 | 2,17 |
| 3 | 3,15 | 3,55 | 3,04 | 3,31 | 2,45 | 3,15 | 2,24 | 2,58 |
| 4 | 3,20 | 3,10 | 3,08 | 4,49 | 2,49 | 4,35 | 1,31 | 3,55 |
| 5 | 2,05 | 3,17 | 1,54 | 3,00 | 1,36 | 2,38 | 1,25 | 2,29 |
| 6 | 2,35 | 3,53 | 2,27 | 3,46 | 2,16 | 3,30 | 1,58 | 3,06 |
| 7 | 2,30 | 3,40 | 2,24 | 3,30 | 2,09 | 3,12 | 1,58 | 2,45 |
| Средние данные о сокращении сроков схватывания для вяжущих 1-й группы эффективности, % | | | | | | | | |
| – | 100 | 100 | 9...12 | 7...10 | 20...25 | 20...24 | 32...40 | 25...35 |
| Средние данные о сокращении сроков схватывания для вяжущих 2-й и 3-й групп эффективности, % | | | | | | | | |
| – | 100 | 100 | 4...6 | 6...10 | 12...16 | 11...17 | 24...27 | 22...25 |

Табл. 3. Изменение сроков начала схватывания цементов при введении добавки СП

| Номер цемента (см. табл. 1) | Начало схватывания, ч, цемента при введении СП в количестве, % | | | |
|---|--|---------|---------|---------|
| | 0 | 0,35 | 0,5 | 0,65 |
| 1 | 2,05 | 2,24 | 2,39 | 2,58 |
| 2 | 2,10 | 2,30 | 2,36 | 3,11 |
| 3 | 3,15 | 3,42 | 4,24 | 4,55 |
| 4 | 3,20 | 4,05 | 4,33 | 5,10 |
| 5 | 2,05 | 2,30 | 2,39 | 3,03 |
| 6 | 2,35 | 3,00 | 3,16 | 3,45 |
| 7 | 2,30 | 3,05 | 3,16 | 3,50 |
| Средние данные о сокращении сроков схватывания для вяжущих 1-й группы эффективности, % | | | | |
| – | 100 | 15...20 | 19...27 | 42...50 |
| Средние данные о сокращении сроков схватывания для вяжущих 2-й и 3-й групп эффективности, % | | | | |
| – | 100 | 18...25 | 30...35 | 47...55 |

Следует также отметить, что влияние добавки СН на начало схватывания цемента вполне предсказуемо и сокращение индукционного периода при рекомендуемой дозировке СН в

0,5...1 % от массы цемента (МЦ), составляющее 5...25 %, может быть учтено соответствующим поправочным коэффициентом, при этом время начала схватывания по абсолютной величине

составляет 1,5 ч и более, что удовлетворяет нормативным требованиям (не менее 45 мин) [13].

Табл. 4. Влияние комплексной добавки на сроки схватывания цемента

| Номер цемента (см. табл. 1) | Состав комплексной добавки СП + СН, % от МЦ по сухому веществу | Срок схватывания цемента, ч | | Изменение начала схватывания, % от исходного (см. табл. 1) |
|--------------------------------|--|-----------------------------|-------|--|
| | | Начало | Конец | |
| 1 | 0,3 + 0,5 | 1,58 | 2,59 | -6 |
| 1 | 0,4 + 0,5 | 2,10 | 3,11 | +4 |
| 1 | 0,5 + 0,5 | 2,20 | 3,23 | +12 |
| 1* | 0,5 + 0,5 | 1,32 | 2,10 | -26 |
| 3 | 0,5 + 0,5 | 3,13 | 3,55 | -1 |
| 3* | 0,5 + 0,5 | 2,36 | 3,05 | -20 |
| 5 | 0,5 + 0,5 | 2,12 | 3,24 | +6 |
| 5* | 0,5 + 0,5 | 1,45 | 2,18 | -16 |
| 6 | 0,5 + 0,5 | 2,40 | 3,30 | +3 |
| 6* | 0,5 + 0,5 | 2,10 | 3,00 | -16 |

Примечание - * - с уменьшением начального водоодежания до консистенции цементного теста, соответствующей тесту нормальной густоты

Влияние добавки суперпластификатора проявилось в увеличении времени начала схватывания всех исследованных видов цемента с ростом количества вводимой добавки; при этом эффект замедления в большей степени проявляется на вяжущих меньшей активности. В целом замедление процессов взаимодействия в системе «цемент-вода» при использовании СП в бетоне с целью повышения формоустойчивости (удобноукладываемости) смеси может быть также учтено соответствующими поправочными коэффициентами, учитывающими увеличение срока начала схватывания цемента в 1,3...1,5 раза относительно бетона без добавок.

Комплексная пластифицирующе-ускоряющая твердение добавка СП + СН оказывает неоднозначное влияние на сроки схватывания цемента (см. табл. 4). Так, при неизменном количестве воды затворения в пластифицированном тесте начало и конец схватывания цемента несколько отодвигается во времени с ростом содержания компонента СП в

комплексной добавке. При этом сроки схватывания цемента с комплексной добавкой во всех случаях меньше, чем с монодобавкой СП (см. табл. 3).

Снижение количества воды затворения до получения цементного теста нормальной густоты (данные 1*, 3*, 5*, 6*) сопровождается сокращением срока начала схватывания примерно на 15...25 % относительно цемента без добавок. При этом абсолютная величина сроков начала схватывания цемента первой и второй групп эффективности (№ 1, 5 и 3, 6 соответственно) с комплексной добавкой СП + СН ~ (0,5 + 0,5) %, равная 1,30...2,30 ч, на исследованных цементах удовлетворяет нормативным требованиям.

Формовочные свойства бетонных смесей

Условия ведения бетонных работ в Беларуси характеризуются наличием разветвленной сети предприятий по производству бетонных смесей: бетоно-смесительных узлов (БСУ) заводов и комбинатов по изготовлению сборного

железобетона, бетоносмесительных установок собственных баз строительных организаций и предприятий по производству товарного бетона. Такое централизованное (или районное) приготовление бетонных смесей на стационарных БСУ предполагает достаточно продолжительную транспортировку их к месту работ. Возникает проблема сохранения свойств бетонных смесей во времени, особенно в случае введения в них на стадии приготовления химических добавок, сокращающих сроки схватывания.

В статье приведены результаты исследований закономерностей влияния добавок сульфата натрия (СН) и комплексной добавки (СП + СН) на сохранность свойств бетонных смесей при следующих изменяющихся факторах: начальной формуемости смеси (состав бетона) и свойствах цемента; начальной температуре смеси и температуре на-

ружного воздуха; выдержке смеси в статическом состоянии и периодическом перемешивании (имитация побуждения в пути следования). Составы бетона (табл. 5) классов С12/15 и С32/40 приняты как соответствующие основному диапазону прочностей 20...50 МПа, применяемому в монолитном строительстве при подвижности смеси марок от П1 до П5.

Результаты экспериментальных исследований. В табл. 6 и 7 и на рис. 1 и 2 приведены данные об изменении формуемости бетонной смеси во времени в зависимости от состава бетона (цемент М400-Д20 и М500-Д20 – № 7 и 6 по табл. 1; 2-й группы эффективности), начальной консистенции смеси, наличия и вида добавки (СН – сульфат натрия, К – комплексная), температуры и других факторов.

Табл. 5. Характеристики* бетонных смесей и бетона

| Номер состава бетона | Класс бетона | Формуемость бетонной смеси | | Марка цемента | Расход составляющих бетона, кг/м ³ | | | | Водоцементное отношение бетона |
|---|--------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|---|-----|------|-----|--------------------------------|
| | | Марка по подвижности | Начальная осадка конуса, мм | | Ц | П | Ш | В | |
| Составы без добавок | | | | | | | | | |
| 1 | С12/15 | П1 | 3...4* | М400 | 275 | 735 | 1200 | 160 | 0,58 |
| 2 | С12/15 | П3 | 12...14 | М400 | 380 | 685 | 1090 | 201 | 0,53 |
| 3 | С32/40 | П1 | 3...4 | М500 | 470 | 610 | 1100 | 210 | 0,45 |
| 4 | С32/40 | П3 | 12...14 | М500 | 515 | 615 | 1000 | 230 | 0,45 |
| Составы с добавкой 1 % СН от МЦ | | | | | | | | | |
| 5 | С12/15 | П1 | 3...4 | М400 | 261 | 730 | 1230 | 147 | 0,56 |
| 6 | С12/15 | П3 | 12...14 | М400 | 360 | 720 | 1100 | 182 | 0,50 |
| 7 | С32/40 | П1 | 3...4 | М500 | 445 | 625 | 1100 | 200 | 0,45 |
| 8 | С32/40 | П3 | 12...14 | М500 | 490 | 650 | 1000 | 220 | 0,45 |
| Составы с комплексной добавкой 0,5 % СП + 0,5 % СН от МЦ | | | | | | | | | |
| 9 | С12/15 | П1 | 3...4 | М400 | 247 | 785 | 1220 | 130 | 0,52 |
| 10 | С12/15 | П3 | 12...14 | М400 | 340 | 715 | 1150 | 163 | 0,48 |
| 11 | С32/40 | П3 | 12...14 | М500 | 415 | 675 | 1100 | 178 | 0,43 |
| 12 | С32/40 | П5 | 22...24 | М500 | 450 | 725 | 1000 | 194 | 0,43 |
| Примечание – * – подвижность бетонных смесей определена через 15 мин после выгрузки ее из смесителя | | | | | | | | | |

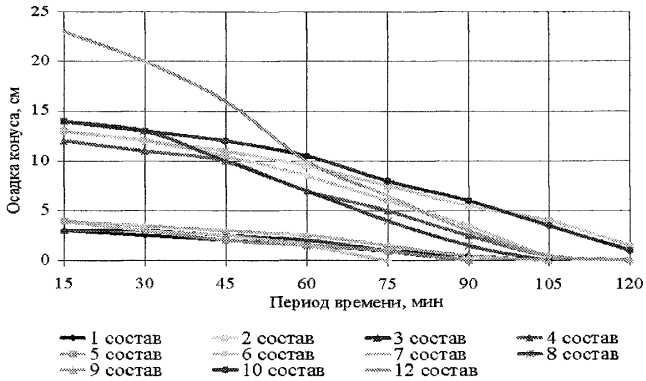


Рис. 1. Тенденция изменений формуемости бетонной смеси при температуре смеси $t_{см} \sim 18^\circ\text{C}$ и среды $t_{ср} \sim 18...22^\circ\text{C}$

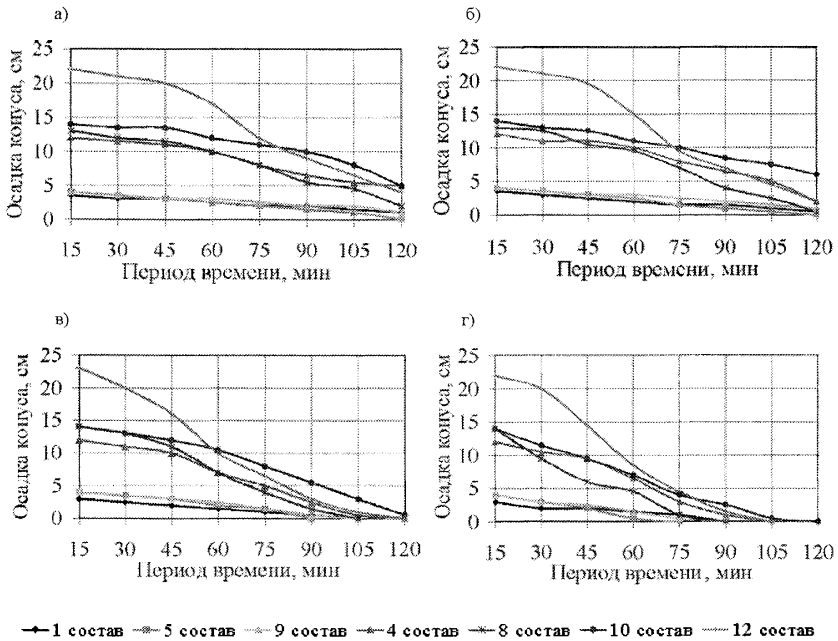


Рис. 2. Тенденция изменений формуемости бетонной смеси при равенстве температур в указанном диапазоне: а – при $t_{см} \sim 5...8^\circ\text{C}$; б – при $t_{см} \sim 12...15^\circ\text{C}$; в – при $t_{см} \sim 18...22^\circ\text{C}$; г – при $t_{см} \sim 25...30^\circ\text{C}$

Из данных, относящихся к бетонной смеси без добавок (составы № 1–4), следует, что формуемость их закономерно ухудшается с течением времени, что отражается в снижении осадки конуса. Введение в бетонную смесь добавки СН (1 % от МЦ) незначительно сказывается на темпе снижения ее формуемости (до 45...60 мин от приготовления), а затем ухудшение формуемости смеси с этой добавкой начинает прогрессировать.

Комплексная добавка (0,5 % С–3 + 0,5 % СН от МЦ) в равноподвижных смесях не ухудшает их формуемости.

Следует отметить, что с ростом начальной величины осадки конуса пластичных бетонных смесей абсолютные значения снижения этого показателя за равный отрезок времени от момента приготовления смеси возрастают. Так, если низкопластичная смесь (без добавок и с ними, № 1, 5, 9) до 75...90 мин соответствует марке П1, то литая (№ 12) за этот период переходит из марки П5 в марку П2...П1.

Зависимость изменения формуемости бетонной смеси с добавками СН и СП + СН от состава бетона связано с расходом цемента и воды (водоцементным отношением). Рост содержания цемента и понижение расхода воды способствуют проявлению эффекта ускорения процесса потери формуемости смесью с СН к 60...75 мин от момента приготовления, а с комплексной добавкой – к 75...90 мин.

Данные рис. 1 и 2 подтверждают прямую зависимость ухудшения формуемости бетонной смеси и с добавками, и без них с повышением температуры смеси и окружающей среды. Влияние на этот процесс добавок нарастает с повышением температуры. Очевидна ускоренная потеря подвижности смеси с добавкой СН, отражающая повышение темпа развития реакций гидратации цемента и связывания им воды затвердения. Комплексная добавка, введенная в смесь (составы № 9–12), оказывает (за

счет пластификатора) стабилизирующее действие: подвижность снижается медленнее, несмотря на уменьшение начального водосодержания смеси и водоцементного отношения бетона. Эффект стабилизации сохраняется до 75...60 мин для пластичных смесей и до 30...45 мин для литой смеси, а затем снижение формуемости прогрессирует и особенно с ростом температуры до 25...30 °С.

В табл. 6 приведены данные, отражающие зависимость изменения подвижности бетонных смесей от свойств цемента различных заводов Беларуси при хранении приготовленной смеси до момента испытаний в неподвижном (статическом) состоянии.

Результаты экспериментов подтверждают взаимосвязь жизнеспособности бетонной смеси (способности сохранять формуемость во времени) с минералогическим и вещественным составом цемента. Например, цементы БЦЗ марок М400 и М500 характеризуются суммарным содержанием клинкерных минералов $C_3S + C_2A$, примерно равным 62 и 67 % соответственно (те же марки вяжущего Красносельцементента ≈ 56 и 60 % (см. табл. 1)). Именно эти минералы портландцементного клинкера предопределяют активность вяжущего и наиболее быстро гидратируются, связывая воду затвердения. Как следствие, смеси на цементе БЦЗ обладают при прочих равных условиях меньшей жизнеспособностью, т. е. их подвижность снижается во времени с большей скоростью. Следует отметить, что эта тенденция усиливается с повышением начального расхода цемента (повышением класса бетона), т. к. при этом снижается водоцементное отношение бетона и относительное водосодержание цементного теста в нем.

Выявлено (см. табл. 6), что комплексная добавка СП + СН оказывает стабилизирующее действие на бетонную смесь, хранящуюся в статическом состоянии, независимо от изменения

свойств использованных цемента. Кроме того, очевидно, что вяжущее Кричевцементношифера, характеризующееся более продолжительными сроками схватывания (см. табл. 1), обеспечи-

вает соответственно более значительный период сохраняемости формовочных свойств смеси – до 60 мин, включая смеси с добавкой СН.

Табл. 6. Влияние свойств цемента на формуемость бетонной смеси, хранившейся в статическом состоянии ($t_{\text{ок}} \sim 18^\circ\text{C}$; $t_{\text{тп}} \sim 20 \dots 22^\circ\text{C}$)

| Характеристика цемента (завод-изготовитель, марка, класс бетона) (см. табл. 1) | Номер состава бетона (см. табл. 5) | Наличие и вид примененной добавки | Изменение осадки конуса, см. за период от момента приготовления, мин | | | | | |
|---|---|---|---|------|------|-----|-----|-----|
| | | | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
| № 1, БЦ3, М500, бетон С32/40 | 4 | – | 14 | 11,5 | 9,5 | 6 | 3,5 | ≈1 |
| | 8 | СН | 13... 14 | 11 | 8,5 | 5 | 2 | - |
| | 12 | К | 14 | 12 | 10,5 | 6,5 | 4 | ≈1 |
| № 2, БЦ3, М400, бетон С12/15 | 2 | – | 13 | 11 | ≈10 | 7,5 | 5 | 2 |
| | 6 | СН | 14 | 11 | 9 | 6,5 | 3 | ≈1 |
| | 10 | К | 14 | 12 | 10 | 8 | 5,5 | 3 |
| № 3, Кричевцементно- ношифер, М500, бетон С32/40 | 4 | – | 14 | 13 | 11,5 | 9,5 | 6,5 | 4,5 |
| | 8 | СН | 13... 14 | 12,5 | 10,5 | 8 | 5,5 | 3,5 |
| | 12 | К | 14 | 13 | 12 | 10 | 7 | 5 |
| № 4, Кричевцементно- ношифер, М400, бетон С12/15 | 2 | – | 13 | 12 | 11,5 | 10 | 7,5 | 6 |
| | 6 | СН | 14 | 12 | 11 | ≈1 | 6,5 | 4,5 |
| | 10 | К | 14 | 13 | 12 | 10 | 7,5 | 6,5 |
| № 5, Красносельск- цемент, М500, бетон С32/40 | 4 | – | 14 | 12,5 | 10,5 | 7,5 | ≈5 | 2 |
| | 8 | СН | 13... 14 | 12 | 9,5 | 6 | 3 | 1 |
| | 12 | К | 14 | 12,5 | 11 | 8 | 6,5 | 2 |
| № 6, Красносельск- цемент, М400, бетон С12/15 | 2 | – | 13 | 11,5 | 10,5 | 7,5 | 6 | 3,5 |
| | 6 | СН | 14 | 11 | 10 | 6,5 | 4,5 | ≈2 |
| | 10 | К | 14 | 12 | 11 | 9,5 | 7 | 4 |

В табл. 7 приведены данные об изменении подвижности низкопластичной бетонной смеси (составы № 1, 5 и 9) и пластичной (№ 2, 6, 10) для бетона класса С12/15, которые перемешивали (в лабораторном бетоносмесителе) в течение 2, 15 и 30 мин, имитируя вариант ее транспортирования с постоянным (или периодическим, но продолжительным) побуждением в пути следования. Учитывая, что частота вращения лопастей вала лабораторного бетоносмесителя принудительного действия в 6 раз

и более превышает скорость вращения барабана автобетоносмесителя, интенсивность воздействия на смесь примерно сопоставима с вероятным воздействием на нее в процессе продолжительного транспортирования автобетоносмесителем. Температура бетонной смеси и окружающей среды при этом $18 \dots 22^\circ\text{C}$.

Выявлено, что продолжительное перемешивание бетонной смеси обеспечивает поддержание ее формовочных свойств. В сравнении с традиционным

временем перемешивания смеси на стадии приготовления (в экспериментах – 2 мин) увеличение его до 15 мин способствует незначительному росту подвижности (осадки конуса), определенной сразу после выгрузки смеси из бетономесителя. Очевидно, это связано с более равномерным распределением жидкости и цементного теста в объеме

смеси, т. е. с повышением ее гомогенности (однородности). Увеличение времени перемешивания до 30 мин не вносит существенных изменений в показатель формуемости смеси, определенный сразу после выгрузки. Однако появляется тенденция незначительного снижения формуемости смеси, что, на наш взгляд, связано со следующим.

Табл. 7. Влияние продолжительного перемешивания на сохраняемость формовочных свойств бетонных смесей ($t_{cv} \sim 18^{\circ}\text{C}$; $t_{cp} \sim 20 \dots 22^{\circ}\text{C}$)

| Номер состава бетона (см. табл. 5) | Наличие и вид примененной добавки | Время перемешивания смеси, мин | Изменение осадки конуса, см, за период от момента приготовления, мин | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|------|------|-----|------|
| | | | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 |
| 1 | – | 2 | 4 | 3 | 2,5 | 2 | ≈2 |
| 5 | СН | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1,5 |
| 9 | К | 2 | 5 | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 |
| 2 | – | 2 | 15 | 15 | 12 | 11 | 9,5 |
| 6 | СН | 2 | 15 | 13 | 12 | 10 | 8 |
| 10 | К | 2 | 14 | 14 | 13 | 12 | 10,5 |
| 1 | – | 15 | 5 | 3 | 1,5 | 0,5 | – |
| 5 | СН | 15 | 5 | 2 | 1 | – | – |
| 10 | К | 15 | 6 | 3,5 | 2,5 | 0,5 | – |
| 2 | – | 15 | 16 | 12 | 9,5 | 6 | 3,5 |
| 6 | СН | 15 | 16 | 11 | 7 | 3 | 0,5 |
| 10 | К | 15 | 17 | 13 | 10 | ≈7 | 3 |
| 1 | – | 30 | 3,5 | 2 | ≈1 | 0,5 | – |
| 5 | СН | 30 | 4 | 1,5 | ≈0,5 | – | – |
| 9 | К | 30 | 4,5 | 2,5 | ≈2 | 0,5 | – |
| 2 | – | 30 | 14 | 11,5 | 6 | 3 | 0,5 |
| 6 | СН | 30 | 14 | 11 | 5 | 1 | – |
| 10 | К | 30 | 15 | 11,5 | ≈6 | 2,5 | – |

С увеличением времени перемешивания бетонной смеси одновременно нарастает и эффект увеличения площади поверхности твердой фазы, способной адсорбировать (связывать физически) воду, во-первых, за счет возрастающего во времени процесса дезагрегации (распадения) цементных флокулов и вступления в контакт (и реакцию) с

водой дополнительных реакционно-способных поверхностей вяжущего, во-вторых, за счет перехода пылевидных частиц, удерживаемых поверхностью заполнителей, в объем цементного теста (это приводит к дополнительному перераспределению жидкости и ее связыванию поверхностью дисперсных частиц пылевидных фракций), в-третьих, за

счет возникающих в процессе перемешивания полидисперсной массы, насыщенной зернами твердой фазы, сил трения, активизирующих поверхностные силы частиц вяжущего, что способствует ускорению процессов гидролиза и гидратации цемента. Отмеченные эффекты дополняются постоянными нарушениями стабильности в формировании вокруг цементных зерен «реакционных» оболочек из продуктов гидратации, которые в статическом состоянии системы «цемент–вода» достаточно быстро формируются, уплотняются и начинают сдерживать развитие гидратационного процесса.

Изложенное подтверждается *ускоренным последующим снижением подвижности бетонной смеси во времени с увеличением продолжительности перемешивания*. Так, смесь без добавки (состав № 1) сохраняет подвижность в пределах марки П1 (4...1 см) при 2 мин перемешивания до 90 мин (см. рис. 1 и 2), при его увеличении до 15 мин – до 30...45 мин и при 30 мин перемешивания – до 30 мин; для марки П3 (15...10 см) это время соответствует 60, 30 и 15...20 мин (см. табл. 7).

Заключение

1. Влияние добавки-ускорителя твердения бетона СН в наиболее рациональной для энергосберегающих технологий дозировке в 1 % от МЦ на формовочные свойства бетонных смесей проявляется в ускоренном в сравнении со смесями без добавки снижении подвижности. Сокращение периода сохранения формовочных свойств смеси с добавкой 1 % СН по отношению к исходным (без добавки) может быть оценено поправочным коэффициентом 0,75, 0,85 и 0,95 для цементов 1...3-й групп эффективности при пропаривании. К последней группе следует относить и шлакопортландцемент.

2. Влияние комплексной добавки в наиболее рациональной для энергосберегающих технологий дозировке

0,5 % СП + 0,5 % СН проявляется в незначительной стабилизации формуемости бетонной смеси при корректировке ее состава для получения равнопрочного и равноподвижного бетона – при снижении расхода цемента, начального водосодержания и водоцементного отношения. Этот эффект в данном случае незначителен, не требует введения поправочного коэффициента и корректировок периода сохранения формовочных свойств смеси марок П1...П3 и более подвижных смесей, полученных без снижения расчетного количества воды затверения.

3. Снижение относительного водосодержания цементного теста (отражает снижение $(В/Ц)_6$ с ростом класса по прочности) сопровождается ускоренной потерей подвижности бетонной смеси, что и наблюдается при сравнении сохраняемости подвижности смесями марок П1, П3, П5. Очевидно, что с повышением начальной формуемости смеси период сохранения ее в пределах марки сокращается. Из этого следует, что подвижность бетонных смесей марок П4 и П5 целесообразно обеспечивать введением добавок на объекте непосредственно перед подачей смеси в опалубку.

4. Влияние температуры окружающей среды и собственно смеси проявляется в закономерном ухудшении формуемости смеси с ростом температуры до 25...30 °С. Потери формуемости нарастают с повышением температуры свыше 20...22 °С, особенно это проявляется с ростом начальной формуемости смеси, при снижении водоцементного отношения бетона и при введении в смесь добавки – ускорителя твердения.

5. Увеличение времени перемешивания бетонной смеси способствует поддержанию ее формовочных свойств (например, с побуждением (постоянным или периодическим) в пути следования) на начальном уровне к моменту выгрузки. Однако в последующем смесь ускоренно теряет пластические

свойства, при этом темп ухудшения формуемости смеси возрастает с ростом ее начальной подвижности, что следует учитывать во взаимосвязи с конкретными условиями ведения работ: дальностью транспортирования и типом используемых средств, температурой смеси и среды, вариантами подачи смеси в опалубку и уплотнения бе-

тона, а также прочими факторами.

Полученные результаты составляют основу для выработки рекомендаций по правилам ведения бетонных работ с применением добавок СН и СП + СН на стадии приготовления, доставки, приемки и подачи бетонной смеси в опалубку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Батяновский, Э. И.** Энергосберегающие технологии цементного бетона / Э. И. Батяновский // Сб. науч. тр. БНТУ. – Минск : БНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 35–48.
2. **Батяновский, Э. И.** Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. А. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 7–17.
3. **Батяновский, Э. И.** Монолитный бетон сухого формования / Э. И. Батяновский, В. Ю. Мирончик. – Минск : Стрияко, 2003. – 175 с.
4. **П1-99 к СНиП 3.09.01-85.** Применение химических добавок в бетоне. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2000. – 33 с.
5. **Каталог – Кхд1 – 2007.** Химические добавки для бетонов и растворов / Н. П. Блещик [и др.]. – Минск : Белстройцемент, 2007. – 57 с.
6. **СНиП 3.03.01-87.** Несущие и ограждающие конструкции. – М. : АПП ЦИТП, 1991. – 192 с.
7. **Ахвердов, И. Н.** Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 106 с.
8. **Ахвердов, И. Н.** Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
9. **Ратинков, В. Б.** Добавки в бетон / В. Б. Ратинков, Т. И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 186 с.
10. **Батраков, В. Г.** Модифицированные бетоны / В. Г. Батраков. – М. : Стройиздат, 1990. – 400 с.
11. **Тейлор, К.** Химия цемента : пер. с англ. / К. Тейлор. – М. : МИР, 1996. – 560 с.
12. **ГОСТ 310.0-5-81.** Цементы. Методы испытаний нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М. : Госстрой СССР, 1976. – 9 с.
13. **ГОСТ 10178-85.** Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М. : Госстрой СССР, 1985. – 7 с.
14. **СТБ 1035-96.** Смеси бетонные. Технические условия. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 1997. – 12 с.
15. **СТБ 1545-2005.** Смеси бетонные. Методы испытаний. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2005. – 20 с.
16. **СТБ 1112-98.** Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 1997. – 23 с.

Статья сдана в редакцию 13 марта 2012 года

Ольга Юрьевна Шейда, аспирант, Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-0291-14-28-69. E-mail: sheyda@mail.ru.

Елена Евгеньевна Корбут, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0297-49-91-28. E-mail: korbutee@mail.ru.

Эдуард Иванович Батяновский, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-0296-43-87-91. E-mail: Batyanovskiy@mail.ru.

Olga Yuryevna Sheyda, PhD student, Belarusian National Technical University. Tel.: 8-0291-14-28-69. E-mail: sheyda@mail.ru.

Yelena Yevgenyevna Korbut, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0297-49-91-28. E-mail: korbutee@mail.ru.

Eduard Ivanovich Batyanovskiy, DSc, Professor, Belarusian National Technical University. Tel.: 8-0296-43-87-91. E-mail: Batyanovskiy@mail.ru.