

ВЛИЯНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ И СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ, ГИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТА

И.М. Иванов, Д.В. Матвеев, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Выявлены закономерности влияния водоцементного отношения (В/Ц) и суперпластификаторов на теплотыделение, фазовый состав и прочность в процессе гидратации и твердения цемента. Установлено, что повышенное В/Ц вызывает не только увеличение индукционного периода и замедление гидратации цемента, но и формирование другого состава гидратных фаз. Обнаружено, что интегральные теплотыделения как при повышенном В/Ц=0,5 так и на поздних сроках гидратации цемента не имеют прямо пропорциональной зависимости с темпами набора прочности. Обоснована нецелесообразность применения калориметрического анализа цементных систем при В/Ц=0,5 в исследовательских целях, связанных в первую очередь с получением высокофункциональных бетонов.

Ключевые слова: калориметрия, микрокалориметрия, теплотыделение, тепловой поток, тепловая энергия, кинетика гидратации и твердения, водоцементное отношение, суперпластификатор, цемент, высокофункциональный бетон.

Введение

Одним из перспективных направлений в сфере бетонных технологий является разработка высокофункциональных бетонов, широко востребованных в современном строительстве. Прочность, морозостойкость и другие свойства таких бетонов, определяющие их долговечность, зависят от используемых цементов, особенностей их гидратации и твердения, водоцементного отношения, а также от вида, химического состава применяемых добавок, их совместимости и других факторов. Для создания высокофункциональных бетонов особенно необходимы знания процессов, протекающих в цементных системах на ранних стадиях гидратации и твердения, которые можно дополнить методом калориметрии [1–3]. Ранее активно проводились исследования влияния различных добавок, в том числе ПАВ, на теплотыделение, происходящее на начальных стадиях гидратации и твердения цементов [4–8]. В результате с целью повышения эффективности цемента, обеспечения надежного и экспрессного контроля его качества в заводских условиях был создан ГОСТ 310.5-88 «Цементы. Метод определения теплотыделения». Согласно этому стандарту испытания принято проводить при В/Ц = 0.5. Однако данные калориметрии при этом В/Ц в исследовании процессов гидратации и твердения цементных систем высокофункциональных бетонов, вероятно, будут существенно отличаться от действительности.

Согласно закону Боломея – Скрамтаева, В/Ц является одним из основных факторов закона прочности и долговечности бетона, а эти характеристики формируются только при низких В/Ц. Кроме того, многие исследования подтверждают, что применение различных суперпластификаторов (СП) позволяет получать бетоны, значительно от-

личающихся теплотыделением при гидратации и твердении, фазовым составом, структурой и свойствами [9, 10]. В связи с этим возникла необходимость изучения влияния величины В/Ц и СП на процессы теплотыделения, а также формирования структуры и свойств цементного камня при гидратации и твердении.

1. Цель работы

Изучить влияние величины водоцементного отношения и суперпластификаторов разного поколения на процессы теплотыделения, гидратации и твердения цемента. Установить взаимосвязь между водоцементным отношением, структурой и свойствами цементного камня.

Обосновать нецелесообразность применения калориметрического анализа при В/Ц=0,5 для исследовательских целей, связанных в первую очередь с получением высокофункциональных бетонов.

2. Используемые материалы и методы исследования

В данном исследовании применяли следующие материалы:

- цемент ПЦ 500 Д-0, среднеалюминатный ООО «Дюккерхофф Коркино цемент» ЦЕМ I 42.5 Н ГОСТ 31108-2016с НГ 28%;
- суперпластификаторы: Glenium ACE 430 и Glenium 115 на основе поликарбоксилатных эфиров, фирма BASF (Германия);
- суперпластификатор нафталинформальдегидный СП-1, ООО «Полипласт УралСиб», г. Первоуральск.

Для оценки набора прочности при сжатии цементного камня в процессе твердения были изготовлены образцы-кубы с размером граней 2 см,

испытания проводили согласно пунктам 7.1 и 7.2 ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы цементного камня, изготовленные при В/Ц=0.3 и 0.5, без добавок и с добавками-суперпластификаторами (1 % от массы цемента) твердели до 28 суток при температуре 20 ± 5 °С и относительной влажности 95 ± 5 %.

Исследование влияния В/Ц и добавок-СП на процессы тепловыделения изучали с помощью 8-канального изотермического калориметра TAM Air при постоянной температуре внутри изотермического канала равной 20 ± 1 °С.

Для изучения влияния В/Ц и СП на фазовый состав цементного камня применяли термогравиметрический анализ, который проводили на дериватографе системы Luxx STA 409 фирмы Netsch. Пробы цементного камня, отбираемые для исследований, предварительно обрабатывали этиловым спиртом, затем высушивали при 50 °С и хранили при этой же температуре до испытаний. Это способствовало исключению дальнейшей гидратации и карбонизации цементного камня [11].

3. Результаты исследований и их анализ

3.1. Калориметрический анализ

Тепловыделения в начальные сроки гидратации и твердения цемента позволяют выделить несколько периодов: преиндукционный, индукционный и постиндукционный.

Преиндукционный период. Первая стадия гидратации цемента, начинающаяся сразу после затворения его водой и сопровождающаяся интенсивным тепловыделением (рис. 1), согласно исследованиям Бутта Ю.М., Сычева М.М., Тимашева В.В., Тейлора Х. и др. [12, 13] связана с процессами смачивания поверхности частиц цемента, адсорбцией на них молекул воды и ПАВ и возникновением хемосорбционных связей с формированием первичных гидратов, состоящих из гидросиликатного геля. Этот гель, образуя оболочку, затрудняет дальнейшую реакцию воды с минералами клинкера, в результате чего наступает вторая стадия гидратации – индукционный период. Справедливо предположить, что интенсивность тепловыделений в преиндукционный период косвенно отражает количественную характеристику образования первичного гидросиликатного геля.

В преиндукционный период составы с СП при В/Ц = 0,3 отличаются более интенсивными выделениями тепла по сравнению с бездобавочным. Этот эффект можно объяснить дополнительно протекающими под действием ПАВ дезагрегацией и диспергацией цементных агрегатов, за счет электростатического и стерического эффектов СП, и далее активным процессом адсорбции и хемосорбции воды на дополнительно образовавшихся поверхностях цемента. Дополнительное увеличение реакционноактивной поверхности цемента сопровождается повышением количества первичного гидросиликатного геля, что приводит к более интенсивным тепловыделениям (рис. 1).

При В/Ц = 0,5 процесс хемосорбции и образования первичного гидрата на поверхности зёрен происходит несколько иначе. В этих условиях, даже без добавки-СП, за счет повышенного количества воды, также происходит частичная дезагрегация цемента, что и увеличивает его реакционноактивную поверхность и соответственно тепловыделение по сравнению с бездобавочным составом при В/Ц=0,3. Вместе с этим, составы с СП при В/Ц=0,5 имеют пониженные тепловыделения в сравнении с составами при В/Ц=0,3. Вероятно, это вызвано тем, что при повышенном количестве воды концентрация суперпластификаторов в жидкой фазе ниже, что уменьшает их эффективность.

Таким образом, все рассматриваемые суперпластификаторы, за счёт лучшей дезагрегации и диспергации цемента, способствуют образованию повышенного количества первичного гидросили-

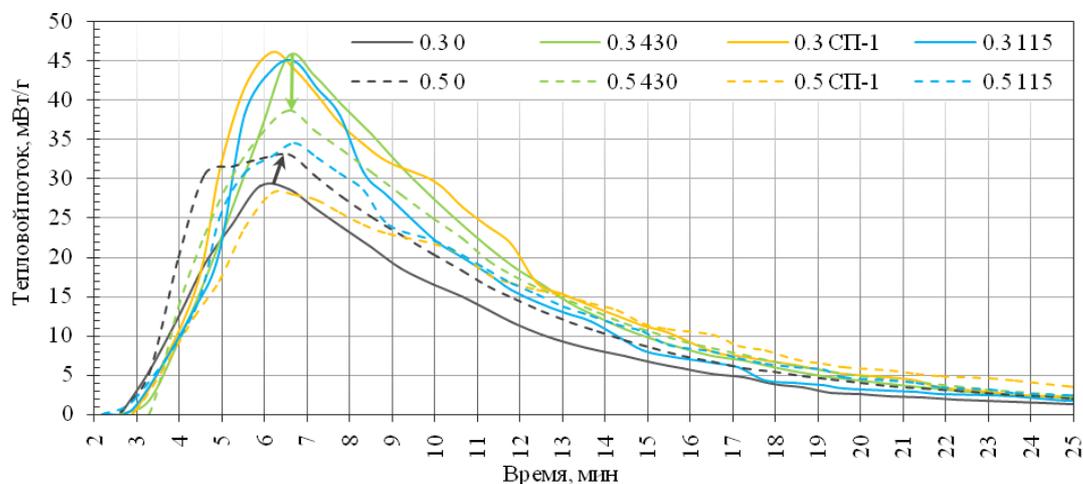


Рис. 1. Тепловой поток за период формирования первичных гидратов в зависимости от В/Ц и вводимых добавок-суперпластификаторов

катного геля. При этом интенсивность тепловыделений в преиндукционный период в составах с разными СП при пониженном В/Ц примерно одинакова (рис. 1), но величина индукционного периода для них различна и зависит от конкретного СП (рис. 2). Исходя из этого, можно сделать вывод, что причиной увеличенного индукционного периода в составах с СП является не столько повышенное образование первичного гидрата, сколько особенности адсорбированного на нём суперпластификатора, которые в различной степени изолируют поверхность цемента от воды.

Индукционный и постиндукционный периоды. После формирования первичных гидратов на поверхности цементных зерен в системе наступает индукционный период. В это время вода из жидкой фазы через оболочку поступает в цементное зерно и вызывает гидролиз трёхкальциевого силиката (C_3S). В результате этого выделившиеся из C_3S ионы Ca^{+2} мигрируют в жидкую фазу цементного теста, а кремнезем, присоединяя воду, образует под оболочкой активный гель кремнезема. Этот процесс продолжается до тех пор, пока рН в жидкой фазе достигнет 12 и наступит пересыщение среды относительно Ca^{+2} . В этих условиях заканчивается индукционный период и начинается третья стадия – ускоренная гидратация. В этот же период в цементном тесте одновременно с ГСК формируются алюминатные и алюмоферритные гидратные фазы, но так как основную часть (65...70 %) цемента составляет алит, значительная часть интенсифицированного тепловыделения связана с формированием высокоосновных ГСК [12, 13].

Анализ тепловыделений в постиндукционный период (рис. 2), на этапе активной гидратации позволяет выявить следующие закономерности.

Все суперпластификаторы значительно увели-

чивают индукционный период и замедляют гидратацию цемента, каждый из них в различной степени. Это происходит из-за адсорбированных на поверхности зёрен цемента суперпластификаторов, образующих дополнительные оболочки, которые в зависимости от вида СП и их устойчивости к воздействию окружающей среды имеют различную пропускную способность ионов Ca^{+2} и жидкой фазы.

Составы при В/Ц=0,5 в период активной гидратации характеризуются пониженным тепловыделением, что связано с увеличением жидкой фазы и уменьшением в исследуемом объеме доли материала, выделяющего тепло.

При повышенном В/Ц индукционный период увеличивается, активная гидратация цемента замедляется. Это объясняется тем, что при увеличенном В/Ц для достижения пересыщения ($pH \approx 12$) требуется больше ионов Ca^{+2} , а значит и больше времени на процесс их накопления в жидкой фазе. При достижении пересыщения начинается активный процесс кристаллизации $Ca(OH)_2$ и гидросиликатов кальция. Количество $Ca(OH)_2$ в составах определяли методом термогравиметрического анализа, результаты которого представлены на рис. 3. Дополнительно отметим, что чем сильнее суперпластификатор замедляет гидратацию цемента при В/Ц=0,3, тем сильнее этот эффект проявляется при повышенном В/Ц, что, вероятно, связано с эффектом суммирования вышеуказанных замедляющих факторов: оболочки суперпластификатора и повышенного В/Ц.

Также чётко прослеживается зависимость между величиной индукционного периода и максимальным тепловыделением: чем больше индукционный период, тем меньше максимальное тепловыделение, что характерно для всех составов (рис. 2). Это можно объяснить тем, что с увеличением индукционного периода увеличивается количество цемента диф-

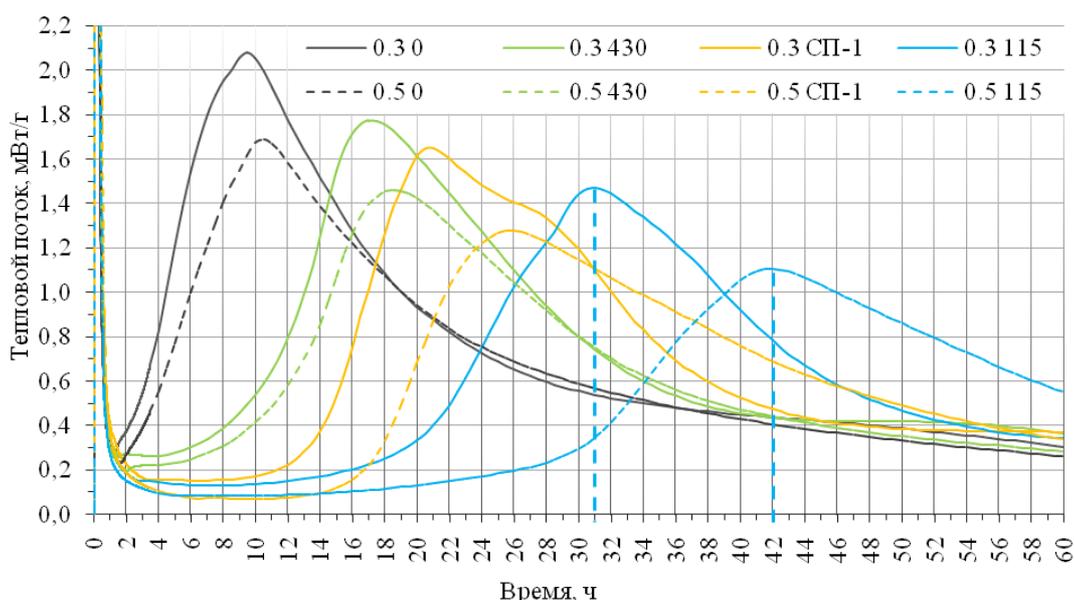


Рис. 2. Тепловой поток за индукционный и ускоренный периоды гидратации цемента в зависимости от В/Ц и вводимых добавок-СП

фузионно прогидратированного в этот период, оставляя для ускоренной гидратации меньшую часть. К моменту завершения стадии ускоренного периода гидратации, что соответствует максимуму тепловыделения, суммарные тепловыделения между составами примерно равны (см. рис. 2 и 5), что подтверждает данное предположение.

После стадии ускоренной гидратации наступает четвёртая, последняя – стадия со сниженным тепловыделением, связанная с медленной гидратацией белита, кристаллизацией C-S-H фаз и перекристаллизацией метастабильных гидратов. Далее для оценки корреляции данных калориметрических темпами набора прочности представлены зависимости суммарной тепловой энергии от времени (рис. 5), полученные интегрированием теплового потока (рис. 2).

3.2. Термогравиметрический анализ

Для установления влияния В/Ц и СП на особенности фазового состава цементного камня использовали данные дериватографии. На рис. 3 и 4

соответственно представлено содержание портландита и химически связанной воды в других гидратах в зависимости от В/Ц, сроков твердения и вводимых добавок-суперпластификаторов.

Из полученных данных (рис. 3) видно, что повышенное В/Ц приводит к увеличенному содержанию портландита в цементном камне во все сроки гидратации и твердения цемента. Это доказывает, что повышенное В/Ц требует большего количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для создания рН среды ≈ 12 , необходимого для гидратации цемента и стабильного существования всех гидратных фаз. В свою очередь, повышенное количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ требует больше времени на накопление ионов кальция, это подтверждает увеличенный индукционный период и усиленное замедление активной стадии гидратации цемента при повышенном В/Ц (рис. 2).

Данные потерь химически связанной воды прогидратированного цемента за вычетом химически связанной воды в $\text{Ca}(\text{OH})_2$, полученные методом термогравиметрического анализа (рис. 4), отражают сравнительную оценку количества всех

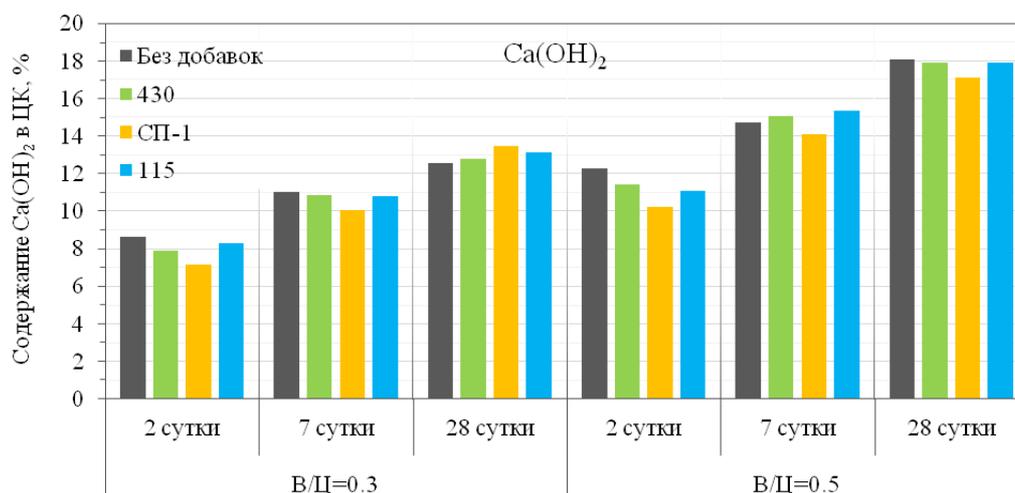


Рис. 3. Содержание портландита в цементном камне в зависимости от В/Ц, сроков гидратации и добавок-суперпластификаторов

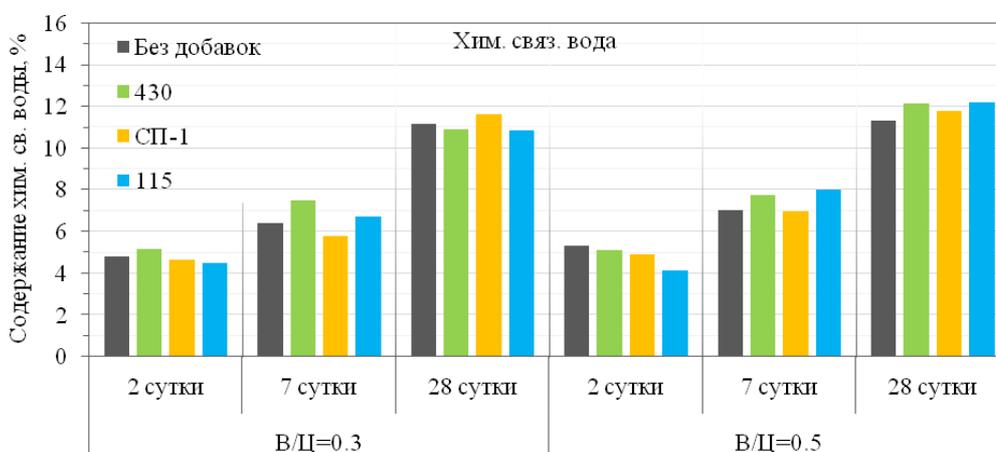


Рис. 4. Содержание химически связанной воды в цементном камне в зависимости от В/Ц, сроков гидратации и добавок-СП

остальных гидратных фаз, по большей части гидросиликатов кальция. Многочисленными исследованиями установлено, что количество химически связанной воды напрямую связано со степенью гидратации цемента [12, 14, 15]. Исходя из этого следует, что в разные сроки гидратации и твердения цемента ни В/Ц, ни добавки-СП не оказывают существенного влияния на его степень гидратации и количество образующихся гидросиликатных фаз (рис. 4). Однако портландита при повышенном В/Ц образуется значительно больше (рис. 3).

Всё это может свидетельствовать о том, что при повышенном В/Ц гидросиликаты кальция имеют несколько пониженную основность, по сравнению с гидросиликатами, формирующимися при низком В/Ц. При повышенном В/Ц для пересыщения жидкой фазы и образования $\text{Ca}(\text{OH})_2$ требуется больше ионов кальция, в результате чего гидросиликаты кальция формируются с пониженным отношением CaO/SiO_2 .

3.3. Взаимосвязь интегральных тепловыделений и прочности

Изменения тепловых потоков во времени, представленные на рис. 1 и 2, наглядно и точно отражают кинетику гидратации цементных систем в начальные периоды. Дальнейшая гидратация и твердение всех составов сопровождается затухающим тепловым потоком. На рис. 5 представлены зависимости суммарной тепловой энергии от времени, полученные интегрированием теплового потока методом трапеций.

Согласно многочисленным исследованиям, между темпом роста прочности и интегральным тепловыделением при гидратации цемента существует прямо пропорциональная зависимость [13, 16, 17]. В данных исследованиях это подтверждается увеличением со временем суммарных тепловыделений (рис. 5) и прочности (рис. 6). Однако в присутствии различных добавок-суперпластификаторов, которые являются одновременно и за-

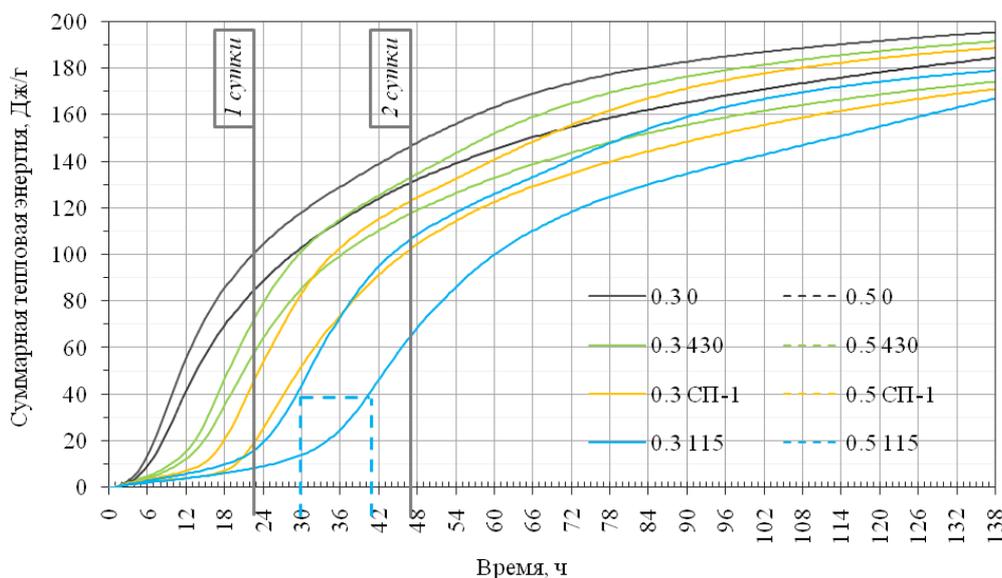


Рис. 5. Интегральные тепловыделения при гидратации цемента в зависимости от времени, В/Ц и вводимых добавок-суперпластификаторов

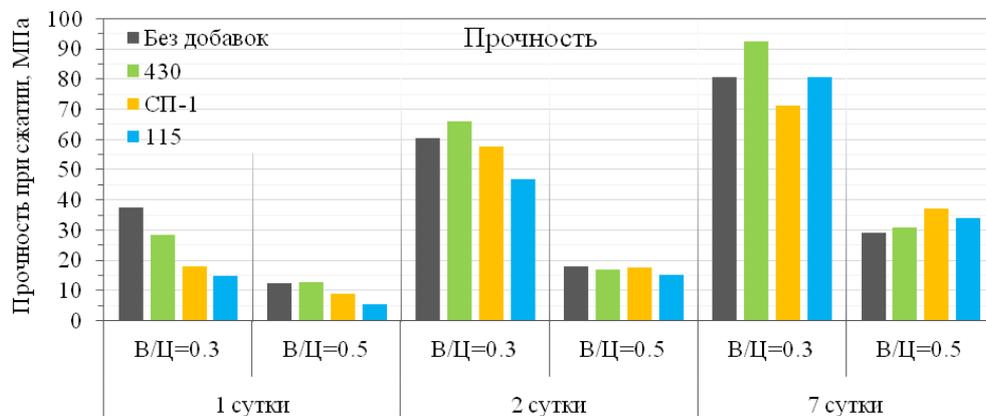


Рис. 6. Прочность цементного камня при сжатии в зависимости от сроков твердения, В/Ц и вводимых добавок-суперпластификаторов

медлителями периода ускоренной гидратации, такая пропорциональность тепловыделений и прочности нарушается. С другой стороны, исследованиями Адамцевича А.О. и др. [18] доказано, что цементные системы с ускорителями гидратации и твердения показывают прямо пропорциональную зависимость между динамикой роста прочности и интегральной кривой тепловыделения, что может служить экспрессным методом оценки эффективности ускорителей твердения. Всё это свидетельствует о том, что калориметрический анализ позволяет исследовать кинетику гидратации и твердения цементных систем достаточно точно лишь на ранних сроках, где проявляются самые интенсивные тепловыделения, связанные в основном с гидратацией минералов C_3S и C_2A . Кроме цементных систем с ускорителями гидратации и твердения, калориметрию вполне можно применять и для исследования высокофункциональных бетонов, которые получают при максимально низком В/Ц с помощью суперпластификаторов. Низкое В/Ц, как было показано выше, оказывает существенный вклад в ускорение процессов гидратации за счёт того, что насыщение жидкой фазы до требуемого рН происходит значительно быстрее.

Согласно характеристикам прочности и данным суммарной тепловой энергии все рассматриваемые СПв первые сутки оказывают сильный эффект замедления гидратации и твердения цемента. Кроме того, при В/Ц = 0,3 в первые сутки твердения между составами проявляется прямо пропорциональная зависимость интегральных тепловыделений и прочности, но в более поздние сроки такой корреляции нет, как и при В/Ц=0,5 на всех сроках твердения. Следует отметить, что интенсивность интегральных тепловыделений с разным В/Ц близка, но прочностные показатели при В/Ц=0,5 гораздо ниже, что связано с высокой пористостью цементного камня и повышенным содержанием портландита, который, как известно, имеет прочность существенно ниже, чем прочность других гидратных фаз.

Таким образом, чем быстрее и интенсивнее протекает гидратация цемента, тем достовернее будут результаты калориметрии по отношению к прочности в ранние сроки твердения. Это даёт основание предполагать, что калориметрический анализ при низком В/Ц в первые сутки может дать более точную косвенную оценку активности цемента и количественного содержания главного минерала цементного клинкера – алита C_3S . При низком В/Ц гидратация протекает не только быстрее, но и с более интенсивным тепловыделением: все данные калориметрии для составов на В/Ц=0,3 подтверждают это (рис. 2, 5). При повышенном В/Ц, а также в поздние сроки гидратации интегральные тепловыделения не имеют прямо пропорциональную зависимость с темпами набора прочности.

Заключение

В ходе проведённых исследований определено, что все суперпластификаторы способствуют:

- дезагрегации и диспергации цемента;
 - образованию дополнительной оболочки на первичных гидратах, в результате чего значительно увеличивается индукционный период и замедляется активная стадия гидратации цемента;
 - формированию цементного камня без существенного изменения его фазового состава.
- Установлено, что при повышенном В/Ц=0,5:
- значительно увеличивается индукционный период, замедляется стадия активной гидратации цемента и уменьшается интенсивность теплового потока, особенно с применением добавок-суперпластификаторов;
 - суммарная тепловая энергия гидратации и твердения цементных систем вовсе сроки не имеет прямо пропорциональной зависимости с темпами набора прочности;
 - гидратация и твердение сопровождается формированием иных гидратных фаз – с пониженной основностью, вследствие большего количества закристаллизованного $Ca(OH)_2$.

Всё вышеперечисленное указывает на то, что использовать калориметрический анализ для исследований цементных систем высокофункциональных бетонов по ГОСТ 310.5-88 «Цементы. Метод определения тепловыделения» при В/Ц=0,5 нецелесообразно. Достоверную информацию о процессах, протекающих в цементных системах высокофункциональных бетонов, можно получить только при низком В/Ц, на котором они создаются.

Литература

1. Мчедлов-Петросян, О.П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетона / О.П. Мчедлов-Петросян, А.В. Ушеров-Маршак, А.М. Урженко. – М.: Стройиздат, 1984. – 224 с.
2. Ушеров-Маршак, А.В. Общие закономерности процессов твердения неорганических вяжущих веществ / А.В. Ушеров-Маршак // Докл. АН СССР, 1984. – Т. 256. – № 2. – С. 417–420.
3. Ушеров-Маршак, А.В. Математические модели термокинетического анализа гидратации вяжущих / А.В. Ушеров-Маршак, А.И. Коробов // Цемент. – 1987. – № 11. – С. 12–15.
4. Эффективность стабилизации технологических характеристик цемента / А.Н. Плугин, А.В. Ушеров-Маршак, И.А. Сибирякова, и др. // Цемент. – 1977. – № 10. – С. 14–15.
5. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрический анализ взаимодействия в дисперсных системах на примере вяжущих веществ / А.В. Ушеров-Маршак, В.П. Сонов // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 249–253.
6. Вовк, А.И. Физико-химические особенности гидратации вяжущих веществ низкой водопотребно-

сти / А.И. Вовк, А.В. Ушеров-Маршак // Неорганические материалы. – 1993. – Т. 29. – № 5. – С. 708–710.

7. Wilding, C. Classification of Inorganic and Organic Admixtures by Condition Calorimetry / C. Wilding, A. Walter, D. Dauble // Cement and Concrete Research. – 1984. – V. 14. – P. 185–194.

8. Ушеров-Маршак, А.В. Селективность действия химических добавок на процессы твердения цемента / А.В. Ушеров-Маршак // Неорганические материалы. – 1999. – Т. 35. – № 12. – С. 1531–1534.

9. Гуревич, В.М. Метод калориметрического исследования гидратации цемента / В.М. Гуревич, А.И. Марков // Цемент, 1987. – №12. – С. 20–21.

10. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance / K. Shuldyakov, L. Kramar, B. Trofimov, I. Ivanov // Advanced materials in technology and construction (AMTC-2015). – AIP Publishing, 2016. – P. 070011-1 0150–070011-6.

11. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.

12. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычёв, В.В. Тимашев. – М., 1980. – 472 с.

13. Тейлор, Х. Химия цемента: пер. с англ. / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

14. Пат. 1474548 СССР. МПКG01N 33/38. Способ определения степени гидратации цемента. / Л.А. Алимов, В.В. Воронин, Н.Н. Астахов, Ю.М. Баженов. – Заявлено 20.03.1987; Опубл. 23.04.1989; Бюл. № 15. – 2 с.

15. Кондо, Р. Кинетика и механизм гидратации цемента (основной доклад) / Р. Кондо, Ш. Уэда (Япония) // Пятый международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, – 1973. – С. 185–204.

16. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Баженов. – 4-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.

17. Актуальные аспекты практического применения методов калориметрии при изучении кинетики гидратации вяжущих в строительном материаловедении / А.О. Адамцевич и др. // Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании. – М.: МГСУ, 2012. – С. 354–360.

18. Адамцевич, А.О. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения / А.О. Адамцевич, С.А. Пашкевич, А.П. Пустовгар // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 3. – С. 36–42.

Иванов Илья Михайлович, магистрант кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ila575-2011@mail.ru

Матвеев Денис Валерьевич, магистрант кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), matveev_7777@mail.ru

Орлов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kosheen_s@mail.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramar-l@mail.ru

Поступила в редакцию 12 марта 2017 г.

DOI: 10.14529/build170206

INFLUENCE OF WATER-CEMENT RATIO AND SUPERPLASTICIZERS ON THE HEAT RELEASE, CEMENT HYDRATION AND HARDENING PROCESSES

I.M. Ivanov, ila575-2011@mail.ru

D.V. Matveev, matveev_7777@mail.ru

A.A. Orlov, kosheen_s@mail.ru

L.Ia. Kramar, kramar-l@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The regularities of influence of water-cement ratio (W/C) and superplasticizers on heat release, phase composition and strength in the process of cement hydration and hardening are revealed in the paper. It has been established that an increased W/C ratio causes not only an increase in the induction period and a slowdown in the hydration of cement, but also the formation of a different composition

of the hydrate phases. It has been found that the integral heat emissions, both at increased W/C = 0.5 and late cement hydration, do not have a directly proportional dependence on the strength generation rate. The inexpediency of using calorimetric analysis of cement systems at W/C = 0.5 for research purposes, connected primarily with the production of highly functional concretes, has been justified.

Keywords: calorimetry, microcalorimetry, heat release, heat flow, heat energy, kinetics of hydration and hardening, water-cement ratio, superplasticizer, cement, highly functional concrete.

References

1. Mchedlov-Petrosyan O.P., Ushero-Marshak A.V., Urzhenko A.M. *Teplovydelenie pri tverdenii vyazhushchikh veshchestv i betona* [Heat Emission during Solidification of Binders and Concrete]. Moscow, StroyizdatPubl., 1984. 224 p.
2. Ushero-Marshak A.V. [General Regularities of the Solidification of Inorganic Binders]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1984, vol. 256, no. 2, pp. 417–420 (in Russ.).
3. Ushero-Marshak A.V., Korobov A.I. Mathematical Models of Thermokinetic Analysis of Hydration of Binders]. *Tsement* [Cement], 1987, no. 11, pp. 12–15 (in Russ.).
4. Plugin A.N., Ushero-Marshak A.V., Sibiryakova I.A., Mchedlov-Petrosyan O.P. [Efficiency of Stabilization of Technological Characteristics of Cement]. *Tsement* [Cement], 1977, no. 10, pp. 14–15 (in Russ.).
5. Ushero-Marshak A.V., Sopov V.P. [Calorimetric Analysis of the Interaction in Dispersed Systems Using the Example of Binders]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 1996, vol. 32, no. 2, pp. 249–253 (in Russ.).
6. Vovk A.I., Ushero-Marshak A.V. [Physicochemical Features of Hydration of Binders with Low Water Consumption]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 1993, vol. 29, no. 5, pp. 708–710 (in Russ.).
7. Wilding C., Walter A., Dauble D. [Classification of Inorganic and Organic Admixtures by Condition Calorimetry]. *Cement and Concrete Research*, 1984, vol. 14, pp. 185–194.
8. Ushero-Marshak A.V. [Selectivity of the Action of Chemical Additives on Cement Solidification Processes]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 1999, vol. 35, no. 12, pp. 1531–1534 (in Russ.).
9. Gurevich V.M., Markov A.I. [Method Calorimetric Studies of Cement Hydration]. *Tsement* [Cement], 1987, no. 12, pp. 20–21 (in Russ.).
10. Shuldyakov K., Kramar L., Trofimov B., Ivanov I. [Superplasticizer Effect on Cement Paste Structure and Concrete Freeze-thaw Resistance]. *Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015)*, AIP Publishing, 2016. 1698, pp. 070011-1- 070011-6.
11. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of Physico-Chemical Analysis of Binders]. Moscow, High school Publ., 1981. 335 p.
12. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical Technology of Binders]. Moscow, 1980. 472 p.
13. Teylor Kh. *Khimiya tsementa* [Chemistry of Cement.]. Moscow, Mir Publ., 1996. 560 p.
14. Alimov L.A., Voronin V.V., Astakhov N.N., Bazhenov Yu.M. *Sposob opredeleniya stepeni gidratatsii tsementa* [Method for Determining the Degree of Cement Hydration]. Patent USSR, no. 1474548, 1989.
15. Kondo R., Ueda Sh. [Kinetics and Mechanism of Cement Hydration]. *Pyatyy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa* [Fifth International Congress on Chemistry of Cement]. Moscow, Stroyizdat Publ, 1973, pp. 185–204 (in Russ.).
16. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Concrete Technology: A Textbook for Universities]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.
17. Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P., Solov'ev V.G., Pashkevich S.A. [Actual Aspects of the Practical Application of Calorimetry Methods in the Study of Kinetics of Hydration of Binders in Building Materials]. *Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii* [Integration, Partnership and Innovation in Building Science and Education]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2012, pp. 354–360 (in Russ.).
18. Adamtsevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. [Use of Calorimetry to Predict the Growth in the Strength of Cement Systems of Accelerated Solidification]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and construction magazine], 2013, no. 3, pp. 36–42 (in Russ.).

Received 12 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента / И.М. Иванов, Д.В. Матвеев, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 42–49. DOI: 10.14529/build170206

FOR CITATION

Ivanov I.M., Matveev D.V., Orlov A.A., Kramar L.Ia. Influence of Water-Cement Ratio and Superplasticizers on the Heat Release, Cement Hydration and Hardening Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 2, pp. 42–49 (in Russ.). DOI: 10.14529/build170206