

Михаил Сергеевич БИБИК,
кандидат технических наук,
директор ОАО "Завод ЖБИ № 1"

Вячеслав Вацлавович БАБИЦКИЙ,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Технология бетона
и строительные материалы"
Белорусского национального
технического университета

ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ "ТЕРМОХРОН"

EVALUATION OF THE HARDENING KINETICS OF CEMENT STONE USING THE THERMOCHRON SENSORS

Предложена методика изучения процесса твердения цементного камня, основывающаяся на кинетике изменения его температуры. Результаты исследований могут быть полезными при корректировке режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий.

The technique, which is based on the kinetics of the temperature-induced changes, has been offered for studying the hardening process of the cement stone. The research results can be useful to adjust the conditions of heat curing of concrete and reinforced concrete products.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из основных направлений экономии ресурсов в технологии бетона — применение так называемых энергосберегающих термосных режимов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий, включающих разогрев бетона до определенной температуры с полным или частичным отказом от периода изотермической выдержки. Эффективность этого технологического приема определяется способностью теплового агрегата сохранять накопленную теплоту (то есть теплофизическими характеристиками камеры) и количеством выделенного в результате гидратации цемента теплоты.

В ТКП 45-5.03-13 [1] даются рекомендации по назначению таких режимов, основная цель которых — получение заданной (распалубочной) прочности бетона в зависимости от ряда факторов: теплофизических свойств теплового агрегата, характеризующихся показателем длительности остывания камеры, класса бетона по прочности на сжатие, группы активности цемента при пропаривании, оборачиваемости камеры. Как видно, гамма влияющих факторов не слишком обширна, что снижает точность конечного результата. Сложности возникают и при использовании разнообразных химических добавок, активно изменяющих кинетику структурообразования цементного камня.

К сожалению, инженеры-технологи не обладают достаточной информацией о поведении цементного камня в различных условиях. Для объективного назначения режима тепловой обработки необходимо знать процесс тепловыделения и конечные величины прочности цементного камня, а также степени гидратации цемента. Однако для этого нет надлежащих инструментов.

Целью данной статьи явилась разработка простейшей (можно даже сказать примитивной) методики для получения достаточной информации о кинетике твердения цементного камня, включая и воздействие химических добавок. Такая методика должна использоваться во

всех строительных организациях, связанных с производством бетонных и железобетонных изделий как в сборном, так и в монолитном вариантах.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Получившая в последнее время интенсивное развитие наука калориметрия позволяет получать разнообразную информацию о твердеющем цементном камне или бетоне. Одно из направлений калориметрии — термокинетика, которая, используя данные о тепловыделении цемента, позволяет изучать как кинетику гидратации цемента, так и учитывать экзотермию вяжущего в технологических процессах [2]. Для проведения опытов используют различные методы и установки, достаточно подробно описанные, например, в [3]. Часть из них реализована в соответствующих нормативных документах: в частности, в [4] использован изотермический калориметр, а в [5] — адиабатический. Проанализировав представленные методики, можно достаточно уверенно констатировать, что описанные установки вряд ли могут быть использованы на рядовых предприятиях по производству бетонных и железобетонных изделий. Они сложны и дороги и поэтому (по мнению авторов) доступны лишь для специализированных лабораторий с квалифицированным персоналом. Кроме того, число проводимых параллельных опытов ограничено, а это сужает широту охвата влияющих факторов.

В конечном итоге проведенные эксперименты позволяют определить удельное тепловыделение бетона (в кДж или в ккал на 1 кг вяжущего). Представим, что рядовая заводская лаборатория имеет в составе оборудования калориметр какого-либо типа. На завод поступил цемент, и в результате проведения опытов получена какая-то определенная величина тепловыделения — например, 292 кДж/кг. Что эта цифра дает инженеру-технологу? Ответим вполне объективно — практически ничего! К сожалению, технолог не располагает инструментом для оперативной корректировки технологического

процесса, в первую очередь режима тепловой обработки изделий, в зависимости от тепловыделения цемента.

Вместе с тем, разработанное в БНТУ программное обеспечение "Технолог" [6–10], позволяет не назначать, а рассчитывать режимы тепловлажностной обработки бетона, как производное множества факторов, в том числе и тепловыделения цемента. При этом величина тепловыделения в свою очередь рассчитывается в зависимости от последовательно прогнозируемой степени гидратации цемента [11].

Промышленная апробация программного обеспечения дала вполне удовлетворительные результаты. Однако для повышения точности расчетной модели в нее следует интегрировать оперативно получаемые экспериментальные данные, в частности кинетику тепловыделения цемента на ранней стадии твердения. При этом нужна не столько абсолютная величина тепловыделения, а ее скорость. То есть, для расчета необходимо получить не абсолютную информацию, а относительную — например, данный цемент на такой-то стадии твердеет менее интенсивно, чем иной. Или то, что данная химическая добавка снижает темп твердения бетона, а другая — повышает.

Поэтому, с учетом изложенного выше, была разработана установка — своеобразный примитивный калориметр, отличный от классических калориметров (рис. 1). Принцип проведения испытаний примерно аналогичен определению теплоты гидратации цемента термосным методом. Однако от классической установки остается только один принцип — измерение кинетики изменения температуры, вначале обычно возрастающей, а затем плавно снижающейся. Цементное тесто помещается в пластмассовые стаканчики, которые устанавливаются в специальные гнезда в основании установки (термокассеты). Само основание и крышка выполнены из пенопласта низкой плотности. Это обеспечивает малые тепловые потери в окружающую среду и получение по этой причине ярко выраженного эффекта саморазогрева твердеющего цементного теста, определяемого количеством теплоты, выделенной при экзотермических реакциях в замкнутом объеме. Число гнезд для испытаний может быть любым. Созданная на ОАО "Завод ЖБИ № 1" термокассета насчитывает 10 гнезд для параллельного испытания соответствующего числа составов. Для фиксации изменяющейся температуры использовались малогабаритные беспроводные датчики DS 1921 системы "Термохрон", показавшие свою эффективность при исследовании тепловых процессов [10, 12].

Для определения мест установки датчиков были проведены специальные опыты (рис. 2). Конечно, самый сложный (длительный и ненадежный) вариант, когда датчик (№ 5) помещается в медный пенал, заполненный трансформаторным маслом, с последующей установкой пенала в центр сосуда с цементным тестом. В связи с этим были рассмотрены и иные варианты. Изготавливалось цементное тесто с использованием цемента Костюковичского завода. Водоцементное отношение составляло 0,27. После 24 часов твердения датчики извлекались из гнезд, и строились графики изменения температуры (рис. 3).

Как видно из хода кривых (см. рис. 3), место установки датчика влияет на изменение максимума температуры. Но сам характер кривых для разных датчиков однотипен, не наблюдается и горизонтальное смещение

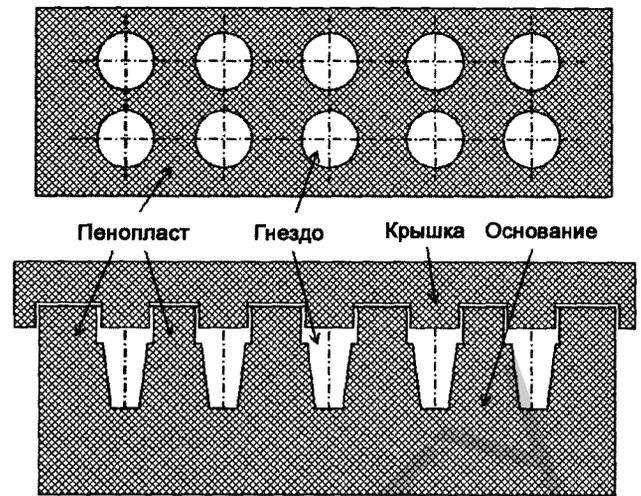


Рис. 1. Схема установки для определения кинетики изменения температуры цементного теста

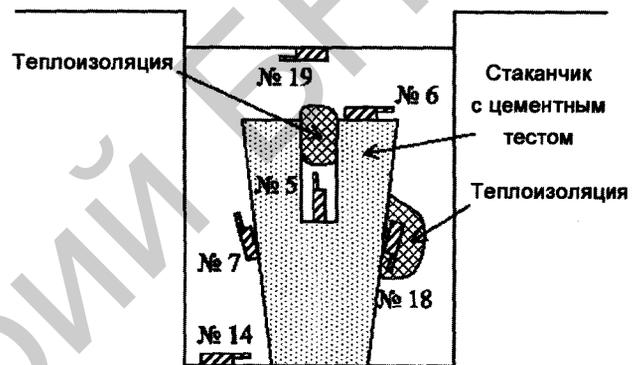


Рис. 2. Схема расстановки датчиков

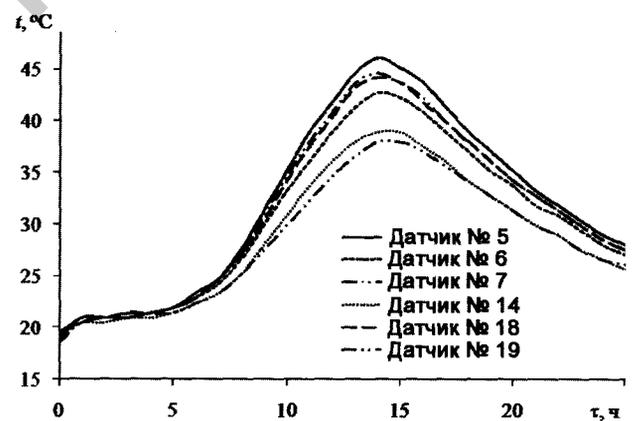


Рис. 3. Кинетика изменения температуры, фиксируемая различными датчиками

экстремума. Анализ результатов опыта показывает рациональность простой примотки датчика к боковой стенке формы (вариант № 7). При этом повышается живучесть самого датчика, скорость проведения эксперимента без существенного снижения точности результатов — температура (в сравнении с помещением датчика в центр образца) ниже всего на 2 °С. Кроме того, не нарушается целостность образца цементного камня. Такой вариант в последующем был выбран как основной: датчики приматываются посредством скотча к боковой поверхности стаканчиков с цементным тестом, а программируются на частоту замеров температуры — одно измерение в час (или полчаса при сравнительно быстром процессе гидратации).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для отработки методики исследований был проведен ряд опытов, частичные результаты которых представлены ниже. В экспериментах использовали цементы Костюковичского завода (ПЦ 500Д20 с нормальной плотностью 28 %, активностью при пропаривании 29,4 МПа) и Кричевского завода (ПЦ 500Д20 с нормальной плотностью 27 %, активностью при пропаривании 27,3 МПа).

Водоцементное отношение цементного теста варьировали от 0,28 до 0,50. Часть образцов изготавливали с добавкой суперпластификатора С-3 при снижении водоцементного отношения до 0,22. Образцы цементного теста помещали в гнезда термокассеты, где они твердели в течение 1 суток. Температура воздуха в помещении была достаточно стабильной и изменялась в течение суток в пределах 16,5 °С–18,0 °С. По истечении заданного времени термокассеты раскрывали, образцы распалубливали и испытывали на прочность. Затем куски цементного камня дробили, высушивали и после прокалывания производили определение химически связанной воды (опыты проводила инженер РУП "Институт БелНИИС" Н. В. Суходоева) с последующей оценкой степени гидратации цемента.

Полученные данные по кинетике изменения температуры цементного камня (прирост температуры в сравнении с начальной) представлены на рис. 4 и 5.

Интегральную температурную характеристику твердеющего цементного теста ψ , °С·ч (по мнению авторов, она более объективно оценивает получаемые результаты) рассчитывали по формуле

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \cdot \Delta\tau,$$

где t_i, t_{i-1} — температура цементного теста в конце i -го и $i-1$ -го интервалов, °С;
 $\Delta\tau$ — интервал времени, ч.

Полученные результаты представлены на рис. 6 и 7.

Анализируя полученные результаты, легко убедиться в действительности этой, казалось бы, примитивной методики. Можно отметить, что на кинетику изменения температуры существенное влияние оказывают как вид цемента, так водоцементное отношение, а ведь при назначении режима тепловлажностной обработки этот момент прошел бы мимо внимания инженера-технолога.

Исключительно интересные данные получены по влиянию добавки суперпластификатора на кинетику изменения температуры твердеющего материала (авторы оставляют полученный факт без объяснений). При этом следует иметь в виду, что авторы сознательно ввели добавку в столь значительном количестве. Ведь цель состояла не в изучении добавки С-3, а в констатации ее воздействия на гидратационные процессы.

Представленные на рис. 8 данные показывают (несмотря на достаточно большой разброс), что между интегральной температурной характеристикой и такими параметрами, как степень гидратации цемента и прочность цементного камня, имеется явная взаимосвязь. И это требует в последующем осмысления и встраивания в существующую математическую модель, описывающую процесс твердения цементного камня и бетона.

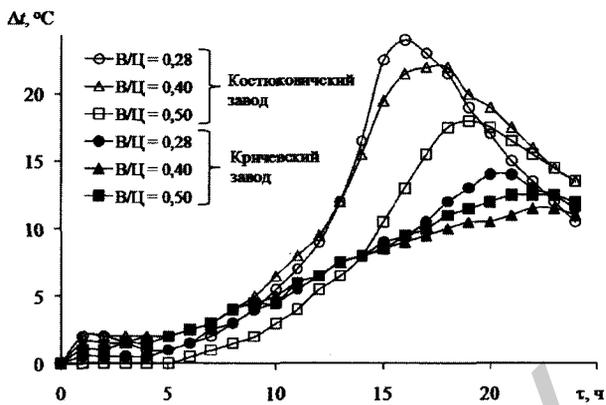


Рис. 4. Прирост температуры цементного теста без добавки

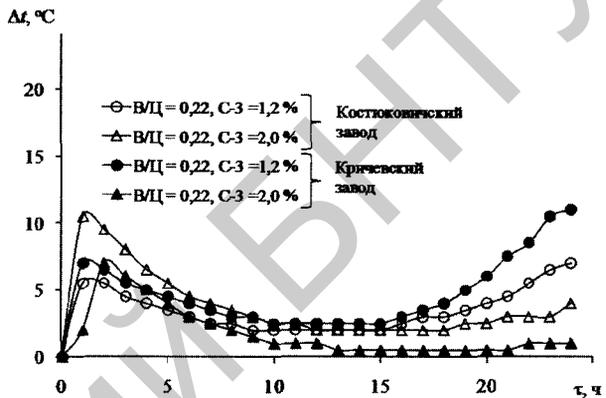


Рис. 5. Прирост температуры цементного теста с пластифицирующей добавкой

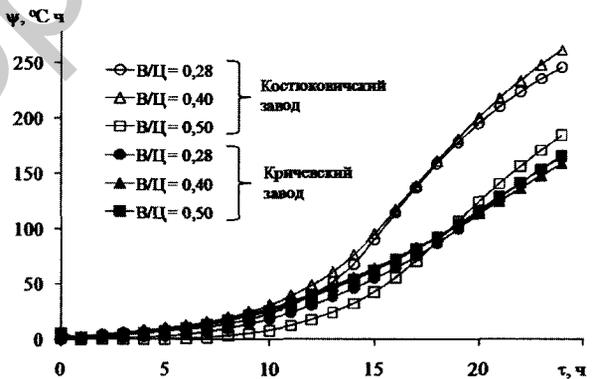


Рис. 6. Интегральная температурная характеристика цементного теста без добавки

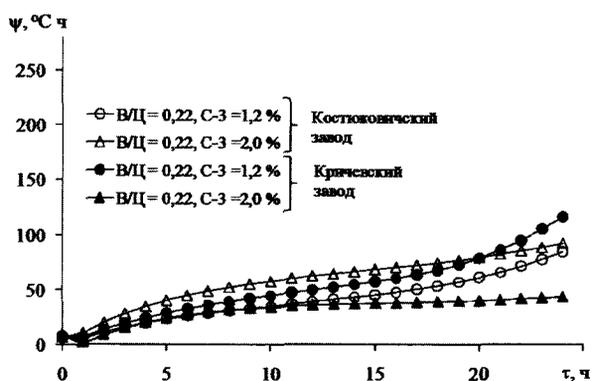


Рис. 7. Интегральная температурная характеристика цементного теста с пластифицирующей добавкой

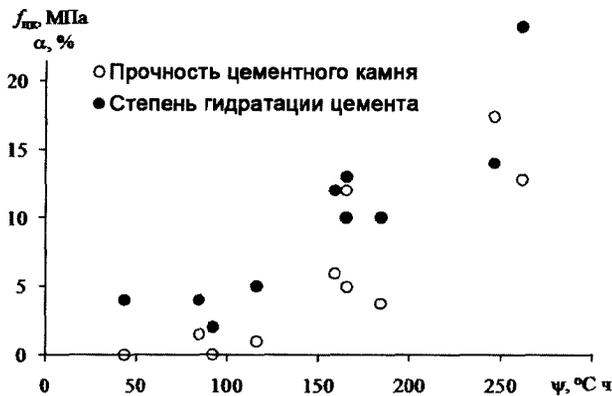


Рис. 8. Взаимосвязь интегральной температурной характеристики цементного теста ψ с прочностью цементного камня $f_{\text{цк}}$ и степенью гидратации цемента α .

В целом можно констатировать, что использование установки типа описанной термокассеты позволяет инженерам-технологам оперативно получать весьма важную информацию, необходимую для расчета или корректировки режимов тепловлажностной обработки бетона.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Практическая реализация предложенной методики оценки кинетики твердения цементного камня может быть осуществлена следующим образом. При поступлении на предприятие цемента или химической добавки инженер-технолог приготавливает необходимые варианты композиций (варьируются водоцементное отно-

шение цементного теста и количество химической или минеральной добавки) и помещает составы в термокассету. В течение 1 суток фиксируется кинетика изменения температуры образцов, а по окончании испытаний определяется прочность цементного камня. При наличии потребного оборудования определяется количество химически связанной воды.

После расшифровки в Excel показаний датчиков DS 1921 полученные результаты по изменению температуры и прочности цементного камня (а при возможности — и степени гидратации цемента) переносятся в базу данных программного продукта "Технолог". Далее инженер-технолог рассчитывает оптимальный режим тепловлажностной обработки бетона.

Такая система расчетов режимов термообработки бетонных и железобетонных изделий, сочетающая имеющуюся теоретическую модель твердения бетона с эмпирическими поправками, повышающими точность конечных результатов, начала апробироваться на ОАО "Завод ЖБИ № 1". Получены достаточно обнадеживающие первоначальные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика комплексного исследования кинетики твердения цементного камня, основывающаяся на непрерывной фиксации температуры саморазогрева образцов, помещенных в термоизолированную кассету. Показана взаимосвязь интегральной характеристики тепловыделения, выраженной в градусо-часах, со степенью гидратации цемента и прочностью цементного камня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки: ТКП 45-5.03-13-2005. — Минск: Стройтехнорм, 2006. — 59 с.
2. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. — М.: Стройиздат, 1984. — 224 с.
3. Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. Учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. — М.: Высшая школа, 1973. — 504 с.
4. Цементы. Методы определения тепловыделения: ГОСТ 310.5-88.
5. Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении: ГОСТ 24316-80.
6. Бабицкий, В. В. Прогнозирование кинетики твердения бетона при термосном выдерживании конструкций / В. В. Бабицкий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2005. — № 4. — С. 66, 67.
7. Бабицкий, В. В. Элементы проектирования режима тепловлажностной обработки бетона / В. В. Бабицкий, Н. В. Суходоева // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. трудов XV Междунар. науч.-методич. семинара. — Новополоцк, 2008. — С. 139–143.
8. Бирик, М. С. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах / М. С. Бирик, Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. — 2009. — № 2. — С. 58–63.
9. Бирик, М. С. Расчет энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М. С. Бирик, В. В. Бабицкий // Керамика: наука и жизнь. — 2009. — № 3. — С. 11–20.
10. Бирик, М. С. Общие принципы проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах / М. С. Бирик, В. В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы. — Гродно: ГРГУ, 2010. — С. 292–296.
11. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. — 2005. — № 1. — С. 76–79.
12. Бирик, М. С. Исследование и оценка режимов термообработки в ямных пропарочных камерах полгонного типа с применением измерителей-регистраторов системы температурного мониторинга "Термохрон" / М. С. Бирик // Строительная наука и техника. — 2009. — № 1. — С. 59–65.

Статья поступила в редакцию 08.07.2010.