

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

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

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

SETTLEMENT-EXPERIMENTAL TECHNIQUE OF OPTIMIZATION OF THE MODE OF THERMAL PROCESSING OF CONCRETE

Предложена методика расчета режима тепловлажностной обработки бетона с учетом экспериментально устанавливаемых параметров тепловыделения цемента.

The design procedure of a mode of thermal processing of concrete taking into account experimentally established parameters of a thermal emission of cement is offered.

ВВЕДЕНИЕ

Основной технологический способ ускорения процессов твердения бетона — его тепловлажностная обработка [1, 2]. Но, несмотря на достаточно продолжительный срок использования этого приема, режим тепловлажностной обработки либо назначается в соответствии с рекомендациями нормативных документов по бетону, например [3, 4], либо подбирается путем многочисленных проб.

В Республике Беларусь ведутся работы, позволяющие инженерам-технологам не назначать (или подбирать) режимы, а рассчитывать их [5–7]. Для этого разработаны математическая модель, описывающая кинетику твердения бетона при повышенных температурах, и соответствующий программный продукт. Это несомненный шаг вперед в развитии технологии сборного бетона и железобетона. Однако если критически рассмотреть проделанную в этом направлении работу, то можно констатировать наличие существенного недостатка: математическая модель не дополняется конкретными характеристиками используемых цементов и добавок.

Вместе с тем в ОАО "Завод СЖБ № 1" разработана методика, включая и упрощенную установку, позволяющая интегрально, причем оперативно и достаточно точно, оценить кинетику структурообразования цементного теста, приготовленного с различными добавками [8]. А это открывает возможность включить в уже отработанную математическую модель результаты экспериментов и тем самым существенно повысить точность оптимизации режимов тепловлажностной обработки бетона.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Методика основывается на экспериментальном определении кинетики тепловыделения цементного теста с химическими добавками (или без них), на установке, разработанной в ОАО "Завод СЖБ № 1" [8]. Она предполагает экспериментальное определение тепловыделения цемента, причем с учетом водоцементного отношения бетонной смеси в изделиях, наличия разнообразных химических и минеральных добавок.

Приготавливают цементное тесто с водоцементным отношением $(В/Ц)_т$, соответствующим водоцементному отношению теста в бетонной смеси $(В/Ц)_б$

$$(В/Ц)_т = 0,98 \cdot (В/Ц)_б - 0,0094. \quad (1)$$

В случае применения химических добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих, ускорителей или замедлителей твердения и пр.) при приготовлении цементного теста вводят требуемое количество добавок.

Цементное тесто помещают в пластмассовые цилиндрические формы с толщиной стенок 1,0–1,5 мм, диаметром $(d_ф)$ и высотой $(h_ф)$ 70 мм, объемом $(V_ф)$ около 270 см³ (рис. 1). Для сохранения теплоты все внешние поверхности форм покрыты слоем самоклеящейся алюминиевой фольги, а внутренние предварительно смазывают консистентным антиадгезионным составом (вазелин, солидол и пр.). Цементное тесто в зависимости от начальной консистенции уплотняют по методике, аналогичной применяемой при определении нормальной плотности цементного теста. Объем цементного теста должен быть таким, чтобы его верхняя грань (зазор) не доходила до верха формы на 8–10 мм $(h_з)$. По разности массы формы с цементным тестом и пустой рассчитывают массу цементного теста $(m_т)$, а затем массу вяжущего $Ц$, г, по формуле

$$Ц = \frac{V_ф \cdot (1 - h_з / h_ф)}{\frac{1}{\rho_ц} + \frac{(В/Ц)_т}{\rho_в}} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где $\rho_ц$, $\rho_в$ — плотность цемента и воды соответственно, кг/м³.

Поверх уплотненного цементного теста укладывают жесткий диск, выполненный из пластмассы толщиной 1,0–1,5 мм, нижняя поверхность которого покрыта консистентным антиадгезионным составом. На верхнюю поверхность диска устанавливают датчик (предварительно уложенный в резиновый чехол во избежание возможного контакта с цементным тестом или водой) для непрерывной регистрации времени испытания и температуры цементного теста (беспроводные электронные измерители-регистраторы

DS 1921 системы температурного мониторинга "Термохрон"). Каждую форму накрывают крышкой и устанавливают в отдельное гнездо основания установки. Испытания проводят в течение 24 ч, поддерживая температуру в помещении в пределах $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Продолжительность испытаний может быть увеличена до 48 ч (и более), например, при использовании добавок, замедляющих процессы твердения цемента. В этом случае расчеты предельных характеристик относятся к соответствующему сроку.

По окончании испытаний с основания установки снимают крышку, цилиндрические образцы цементного камня извлекают из форм. Верхнюю (а при необходимости и нижнюю) часть цилиндров выравнивают обработкой напильником или абразивным камнем, а затем образцы испытывают на сжатие.

По пределу прочности на сжатие образцов цементного камня рассчитывают степень гидратации α_{24} , %, в возрасте 24 ч

$$\alpha_{24} = \frac{k_u \cdot (B/C)_t}{\frac{f_u}{f_{цк}} \cdot (B/C)_t^n + 1} \quad (3)$$

- где k_u — коэффициент, учитывающий влияние вида цемента (может быть принят равным 435);
- n — показатель степени, учитывающий влияние вида цемента (может быть принят равным 1,67);
- f_u — активность цемента, МПа;
- $f_{цк}$ — прочность образцов цементного камня, МПа.

При проведении исследовательских работ степень гидратации цемента может быть установлена экспериментально. Для этого разрушенные образцы дробят на куски размером до 5 мм, взвешивают и высушивают при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ до постоянной массы. Затем навески прокаливают в течение 4 ч при температуре $(600 \pm 50)^\circ\text{C}$. По разности масс каждой навески после высушивания и последующего прокаливания, отнесенной к массе после высушивания, рассчитывают количество воды, химически связанной цементом при твердении, и соответственно степень гидратации цемента.

После расшифровки показаний датчиков строят график в системе координат "время τ , ч — температура цементного теста относительно начальной t , $^\circ\text{C}$ (рис. 2).

Затем разбивают всю продолжительность твердения (24 ч) на m равных периодов примерно по 1 ч ($\Delta\tau$) и для каждого i -го периода рассчитывают градусо-часы gh_i , $^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$, как произведение средней температуры $t_{срi}$ на продолжительность периода

$$gh_i = \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \cdot \Delta\tau = t_{срi} \cdot \Delta\tau \quad (4)$$

Далее рассчитывают интегральную температурную характеристику цементного теста ψ , $^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$, как сумму градусо-часов для данного и предыдущих периодов

$$\psi_i = gh_0 + gh_1 + \dots + gh_{i-1} + gh_i \quad (5)$$

После чего строят соответствующий график (рис. 3).

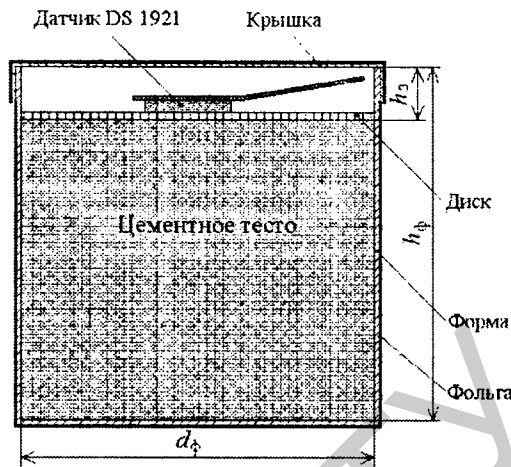


Рис. 1. Схема формы для исследования кинетики изменения температуры цементного теста

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

По полученным данным рассчитывают основные периоды тепловлажностной обработки бетона.

На рис. 2 фиксируют точку перегиба графика, свидетельствующую об окончании индукционного периода твердения цементного теста ($\tau_{инд}$) и начале интенсивного структурообразования цементного камня — принимают как время от начала саморазогрева цементного теста до момента увеличения его температуры на $5^\circ\text{C} - 7^\circ\text{C}$ в сравнении с начальной. Время от начала приготовления цементного теста до окончания индукционного периода соответствует оптимальной продолжительности длительности предварительной выдержки бетона перед тепловлажностной обработкой бетона $\tau_{пв}$, ч, которая равна

$$\tau_{пв} = k_{пв} \cdot \tau_{инд} \quad (6)$$

Как было установлено, величина коэффициента $k_{пв}$ для цементов разных производителей изменяется от 0,4 до 0,7 и, например, для цемента ОАО "Красносельскстройматериалы" составляет около 0,5 д. ед.

К полученной кривой на стадии прямо пропорционального нарастания интегральной температурной характеристики цементного теста проводят касательную

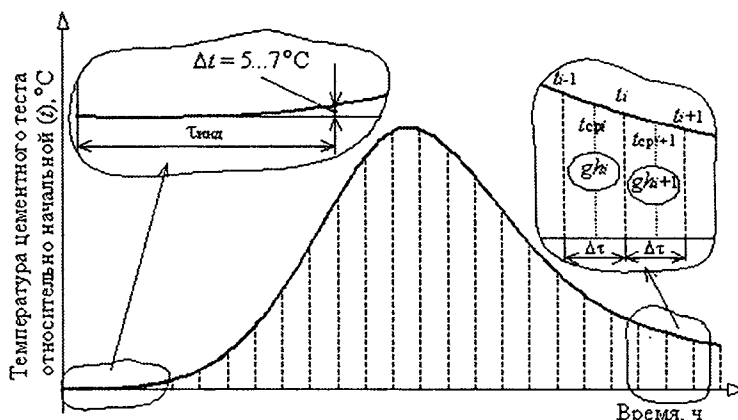


Рис. 2. Принцип определения продолжительности предварительной выдержки бетона перед тепловой обработкой

до пересечения с осью "Время" (см. рис. 3). Получаемый угол между осью абсцисс и касательной β определяет скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона. Фиксируют продолжительность пропорционального нарастания интегральной температурной характеристики цементного теста ψ_{np} как разность времени окончания (точка замедления процесса) и начала (точка пересечения касательной с осью абсцисс). По этой величине и значению ψ_{np} в конце данного периода рассчитывают скорость подъема температуры $v_{нт}$, °С/ч

$$v_{нт} = k_{нт} \cdot \frac{\psi_{np}}{\tau_{np}} \quad (7)$$

Величина коэффициента $k_{нт}$ определяется видом используемого цемента и для цемента ОАО "Красносельскстройматериалы" составляет около $1,0 \text{ ч}^{-1}$.

На этом же графике (см. рис. 3) фиксируют величину интегральной температурной характеристики цементного теста (ψ_{τ}) в конце всего периода исследования тепловыделения (τ_{τ}) и рассчитывают удельное тепловыделение цемента q_{24} , кДж/кг

$$q_{24} = \frac{3300}{\zeta} \cdot f_u \cdot \sqrt{(B/\zeta)_{\tau}} \cdot (1 - e^{-k_d \cdot k_q \cdot \psi_{\tau}}), \quad (8)$$

где k_d — коэффициент, зависящий от активности вводимой химической добавки (для бетона без добавок может быть принят равным 0,0035);

k_q — коэффициент, зависящий от вида цемента (для портландцемента ОАО "Красносельскстройматериалы" может быть принят равным 1,0 д. ед.).

Взяв величину тепловыделения цемента в возрасте τ (q_{24}) и отнеся ее к степени гидратации цемента в том же возрасте, полученную по (3), легко рассчитать значение тепловыделения, приходящееся на 1 % степени гидратации q_a , кДж/(кг·%)

$$q_a = \frac{q_{24}}{\alpha_{24}} \quad (9)$$

Тогда в любой период изотермической выдержки удельное тепловыделение цемента q_{τ} , кДж/кг, рассчитывается по формуле

$$q_{\tau} = q_a \cdot \alpha_{\tau} \quad (10)$$

Для расчета относительной степени гидратации $\alpha_{отн}$ (в долях единицы) можно воспользоваться моделью, предложенной в [9]

$$\alpha_{отн} = \frac{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot \tau \cdot k_1 \cdot k_p \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{so3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot \tau \cdot k_1 \cdot k_p \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{so3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}}}{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot 28 \cdot k_1 \cdot k_p \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{so3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot 28 \cdot k_1 \cdot k_p \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{so3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}}}, \quad (11)$$

где τ — время твердения;

β_1 — уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента;

β_2 — коэффициент, зависящий от содержания минерала C_3A в цементе;

k_1 — коэффициент, зависящий от температуры твердения цементного камня (бетона);

k_p — коэффициент, зависящий от влажностных условий твердения цементного камня (бетона);

k_w — коэффициент, зависящий от начального водосодержания цементного теста;

k_m — коэффициент, зависящий от активности применяемого цемента;

k_s — коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента;

k_{so3} — коэффициент, зависящий от содержания гипса в цементе;

k_{du} — коэффициент, зависящий от вида и количества добавки-ускорителя;

k_{dp} — коэффициент, зависящий от вида и количества пластифицирующей добавки.

Это может служить основой для расчета длительности изотермической выдержки, соответствующей времени достижения прочностью бетона отпускной

$$f_6 = \frac{k_3 \cdot f_u}{(B/\zeta)_6^n \cdot \left[\frac{k_u \cdot (B/\zeta)_6}{\alpha_{\tau}} - 1 \right]} \geq f_{отн}, \quad (12)$$

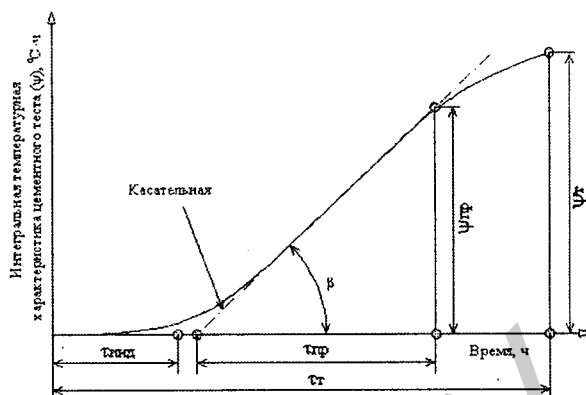


Рис. 3. Принцип определения скорости подъема температуры при тепловой обработке бетона

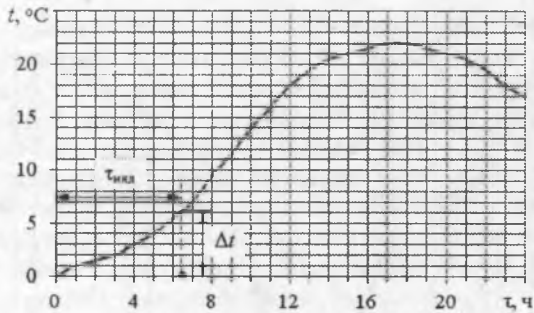


Рис. 4. Кинетика изменения относительной температуры цементного теста

где f_6 — текущая прочность бетона, МПа;
 $f_{отп}$ — отпускная прочность бетона, МПа;
 $k_з$ — коэффициент, зависящий от свойств заполнителей;
 $k_ц$ — коэффициент, учитывающий влияние вида цемента;
 α_t — текущая степень гидратации цемента, доли ед.

ПРИМЕР РАСЧЕТОВ

Предположим, на предприятие по производству сборного бетона и железобетона поступил цемент М500-Д20 производства ОАО "Красносельскстройматериалы". Нормальная густота — 26,5 %, ориентировочная плотность — 3100 кг/м³.

Класс бетона по прочности на сжатие С20/25, отпускная прочность бетона — 70 % (22,5 МПа). Марка бетонной смеси по удобоукладываемости П1. Применение химических добавок не предполагается. Необходимо спроектировать состав бетона и режим его тепловлажностной обработки.

Рассчитываем состав бетона (по компьютерной программе, реализующей многофакторный метод [10]): расход цемента — 324, песка — 724, щебня — 1179 и воды — 177 кг/м³ при водоцементном отношении 0,546.

Водоцементное отношение цементного теста, рассчитанное по (1), равно

$$(B/C) = 0,98 \cdot 0,546 - 0,0094 = 0,526.$$

В соответствии с разработанной методикой приготавливаем цементное тесто с водоцементным отношением, равным 0,526, и укладываем в форму с зазором 10 мм.

Расход цемента в форме составляет

$$C = \frac{270 \cdot \left(1 - \frac{10}{70}\right)}{1 + \frac{0,526}{3100 + 1000}} \cdot 10^3 = 273 \text{ г.}$$

После проведения исследования кинетики тепловыделения цемента прочность образцов цементного камня составила 14,8 МПа.

Степень гидратации цемента равна

$$\alpha_{24} = \frac{435 - 0,526}{50} = 21 \text{ \%}$$

$$14,8 \cdot 0,526^{1,07} + 1$$

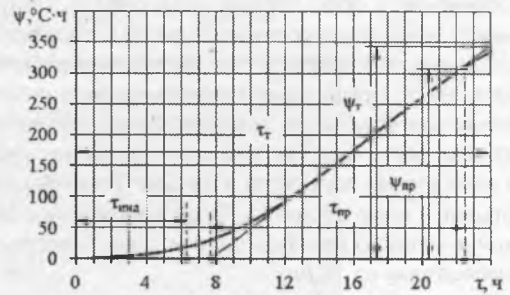


Рис. 5. Кинетика изменения интегральной температурной характеристики цементного теста

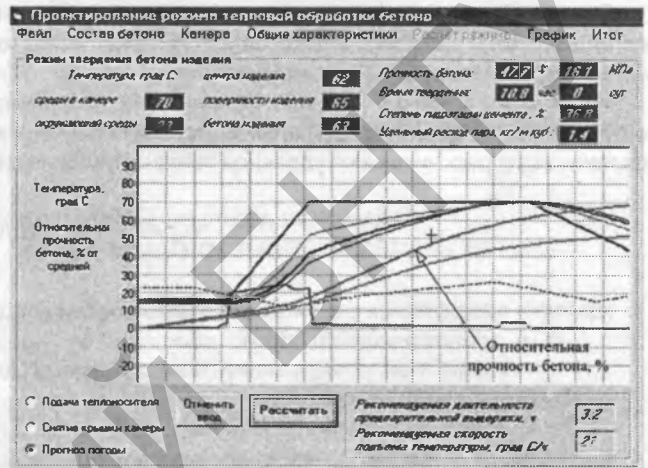


Рис. 6. Окно расчета режима тепловлажностной обработки бетона

На рис. 4 и 5 приведены полученные графики изменения относительной температуры и интегральной температурной характеристики исследованного цементного теста, построенные в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Производим необходимые вычисления.

На оси абсцисс рис. 4 откладываем точку, соответствующую окончанию индукционного периода $t_{инд}$ — 6,4 ч. Рекомендуемое время предварительной выдержки $t_{пв}$ равно $t_{пв} = 0,5 \cdot 6,4 = 3,24$.

К графику на рис. 5 проводим касательную до пересечения с осью абсцисс. Находим время начала (7,8 ч) и окончания (22,5 ч) периода пропорционального нарастания интегральной температурной характеристики цементного теста. Величина $\psi_{пр}$ в конце этого периода равна 305 °С/ч, а скорость подъема температуры

$$v_{нт} = 1 \cdot \frac{305}{22,5 - 7,8} = 21 \text{ °С/ч.}$$

По графику на рис. 5 находим интегральную температурную характеристику цементного теста в конце эксперимента ($\psi_t = 345 \text{ °С/ч}$) и рассчитываем удельное тепловыделение цемента

$$q_t = \frac{3300}{273} \cdot 50 \cdot \sqrt{0,526} \cdot (1 - e^{-10,0035 \cdot 345}) = 307 \text{ кДж/кг.}$$

Дальнейшие вычисления проводим с помощью предлагаемой компьютерной программы. Необходимо отметить, что указанные выше вычисления рекомендуемых величин предварительной выдержки, скорости подъема температуры и удельного тепловыделения цемента производятся автоматически. Инженеру-технологу лишь достаточно ввести резуль-

тат эксперимента: "время — температура цементного теста". Затем оператор определяет характеристики теплового агрегата (габариты, конструкцию стенок, крышки, днища и пр.), технологические особенности пропариваемого изделия (размеры, количество, объем бетона и пр.). Далее инженер-технолог вводит температуру и продолжительность изотермического периода и время открытия крышки камеры. После подачи команды "Рассчитать" появляется графическая интерпретация процесса твердения бетона в данном тепловом агрегате, представленная в одном из окон компьютерной программы (рис. 6).

На рис. 6 приведены следующие графики, предоставляющие инженеру-технологу необходимую информацию для последующего внесения коррективов в режим тепловлажностной обработки:

- температура внешней среды;
- температура среды в пропарочной камере;
- температура поверхности изделия;
- температура центра изделия;
- усредненная температура бетона;

- степень гидратации цемента;
- относительная прочность бетона;
- удельный расход теплоносителя.

Если спроектированный режим тепловлажностной обработки бетона не удовлетворяет инженера-технолога, производящего расчеты, например, по стоимости или продолжительности, то перед ним открываются достаточно широкие возможности для его оперативной корректировки, изменяя влияющие теплотехнические или технологические факторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика проектирования режима тепловлажностной обработки, сочетающая математическую модель твердения бетона при повышенных температурах с результатами экспериментального изучения кинетики тепловыделения цемента. Представлена соответствующая компьютерная программа, позволяющая оперативно оптимизировать режим тепловлажностной обработки бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов [и др.]. — М.: Стройиздат, 1973. — 96 с.
2. Малинина, Л. А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона / Л. А. Малинина. — М.: Стройиздат, 1977. — 160 с.
3. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий. — М.: Стройиздат, 1989. — 50 с.
4. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки: ТКП 45-5.03-13-2005. — Минск: Минстройархитектуры, 2006. — 59 с.
5. Проектирование состава бетона и режима тепловой обработки железобетонных конструкций / Н. П. Блещик [и др.] // Строительная наука и техника. — 2006. — № 3. — С. 37–42.
6. 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. тр. XV Междунар. научн.-метод. семинара, Новополоцк, 2008. — С. 139–143.
7. Бибик, М. С. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах / М. С. Бибик, Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. — 2009. — № 2. — С. 58–63.
8. Бибик, М. С. Влияние химических добавок на тепловыделение цемента / М. С. Бибик // Строительная наука и техника. — 2011. — № 6. — С. 4–8.
9. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. — 2005. — № 1. — С. 76–79.
10. Бабицкий, В. В. Многофакторное проектирование состава бетона / В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев // Материалы, технологии, инструменты. — 2005. — № 1. — С. 67–71.

Статья поступила в редакцию 16.05.2012.