

**Сергей Николаевич  
КОВШАР,**  
инженер НИИЛ бетона  
и строительных материалов  
Белорусского национального  
технического университета

**Михаил Сергеевич БИБИК,**  
кандидат технических наук,  
директор ОАО "Завод сборного  
железобетона № 1"

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

# СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

## SYSTEM FOR PREDICTING THE FROST RESISTANCE OF CEMENT STONE AND HEAVY CONCRETE

Предложена и теоретически обоснована система прогнозирования морозостойкости цементного камня и бетона, позволяющая учесть совместное влияние конструктивных и деструктивных процессов при циклическом замораживании и оттаивании материала.

The system for predicting the frost resistance of cement stone and concrete has been offered and theoretically proved. It allows taking into account the joint effects of constructive and destructive processes during cyclic freezing and thawing of materials.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию морозостойкости бетона посвящено множество как зарубежных, так и отечественных публикаций, например, [1–7]. В них морозостойкость представлена как функция самых разнообразных факторов: водоцементного отношения бетонной смеси, прочности бетона, его капиллярной, контракционной и интегральной пористости, льдистости, степени водонасыщения, содержания воздуха в бетонной смеси, соотношения воздуха эмульгированного и заземленного и пр. Созданы и соответствующие модели расчета стойкости бетона при циклическом замораживании и оттаивании. Вместе с тем следует констатировать тот факт, что единая, общепризнанная методика прогнозирования морозостойкости бетона, основанная на факторах, понятных и легко рассчитываемых рядовыми инженерами-технологами, пока отсутствует.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Рассмотрим траекторию движения тела, брошенного с некоторой начальной скоростью и под некоторым углом к горизонту (рис. 1). Такое движение в кинематике описывают [8] следующим образом:

$$x = v_0 \cdot \tau \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{g}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \beta} \cdot x^2, \quad (2)$$

где  $x, y$  — координаты произвольной точки в данный момент времени;

$v_0$  — начальная скорость тела, м/с;

$\tau$  — время, с;

$\beta$  — угол, под которым брошено тело, град;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

При воздействии на цементный камень циклических изменений влажности и температуры в материале протекают два взаимно противоположных процесса: созидательный (конструктивный) и разрушительный (деструктивный) [9], причем внешнее очертание результирующего процесса (парабола) полностью соответствует рассмотренному движению брошенного тела (рис. 1). Следовательно, можно попытаться адаптировать уравнения (1) и (2) к описанию изменения прочности цементного камня при циклическом воздействии внешней среды.

Обозначив в (2)  $u$  как прочность цементного камня  $f_{\text{цк}}$  и подставив (1) в (2), получим:

$$\begin{aligned} f_{\text{цк}} &= v_0 \cdot \tau \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{g}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \beta} \cdot v_0^2 \cdot \tau^2 \cdot \cos^2 \beta = \\ &= v_0 \cdot \tau \cdot \sin \beta - \frac{g\tau^2}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выразим время  $\tau$  через количество циклов замораживания и оттаивания  $n$ . Тогда изменение прочности цементного камня к любому количеству циклов  $df_{\text{цк}}/dn$  будет равно:

$$\frac{df_{\text{цк}}}{dn} = (f_{\text{цк}})' = v_0 \cdot \sin \beta - gn. \quad (4)$$

В точке перегиба на кривой изменения прочности цементного камня  $f_{\text{макс}}$  при циклических испытаниях  $df_{\text{цк}}/dn = 0$ , и тогда для соответствующих циклов испытаний  $n_0$  получим:

$$n_0 = \frac{v_0 \cdot \sin \beta}{g}. \quad (5)$$

А поскольку общее количество циклов до наступления критических деградаций цементного камня ( $n_{\text{кр}}$  определяется прочностью цементного камня  $f_{\text{кр}}$ ) будет приблизительно в 2 раза больше  $n_0$  (см. рис. 1), то с учетом допустимой потери прочности цементного камня

( $\delta$ , в % от начального значения  $f_0$ ) общее количество циклов будет определяться по уравнению:

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot v_0 \cdot \sin \beta}{g} \quad (6)$$

В уравнении (6) числитель характеризует интенсивность конструктивного процесса, а знаменатель — деструктивного. Попробуем представить влияющие факторы в уравнении (6) в удобном и понятном для технолога-бетонщика виде, что позволит использовать данное уравнение для практического расчета морозо- или коррозионной стойкости цементного камня (бетона). Анализ результатов экспериментов и литературных источников позволил провести следующие аналогии.

Рассмотрим конструктивный процесс. Имитацией начальной скорости брошенного тела  $v_0$ , без сомнения, является прочность цементного камня  $f_0$  (к моменту воздействия замораживания и оттаивания). Величину угла  $\beta$  можно представить, как функцию, зависящую от двух параметров: объема открытых капиллярных пор, характеризующего объемным водопоглощением цементного камня  $W_0$ , и степени гидратации цемента  $\alpha$  (см. рис. 1). Таким образом, в основе расчета лежат два параметра, интегрально определяющих начальные физико-механические и структурные характеристики цементного камня. Изменение же степени гидратации цемента характеризует способность цементного камня к так называемому "самозалечиванию", то есть к устранению дефектов структуры в процессе циклического воздействия внешней среды. Анализ экспериментальных результатов показал, что в прогнозных расчетах целесообразнее использовать не абсолютную величину степени гидратации цемента к началу испытаний  $\alpha_0$ , а отношение максимальной возможной степени гидратации цемента  $\alpha_{max}$  к фактической  $\alpha_0$ :  $\alpha_{max}/\alpha_0$ .

Приведенные выше факторы достаточно просто могут быть определены экспериментально. Кроме того, значения прочности и водопоглощения цементного камня сравнительно легко (во всяком случае с достаточной для практических целей точностью) рассчитываются. Что касается расчета начальной степени гидратации цемента  $\alpha_0$ , %, то для этого можно воспользоваться математической моделью, предложенной в [10]:

$$\alpha = \xi_t \cdot \xi_{du} \cdot \xi_s \cdot \alpha_{28}^{20} \frac{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \tau K_\Phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \tau K_\Phi}}{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot 28 K_\Phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot 28 K_\Phi}} \quad (7)$$

где  $\xi_t$  — коэффициент, зависящий от температуры твердения бетона;  
 $\xi_{du}$  — коэффициент, зависящий от вида и количества введенных добавок ускорителей твердения;  
 $\xi_s$  — коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента и содержания в нем гипса;

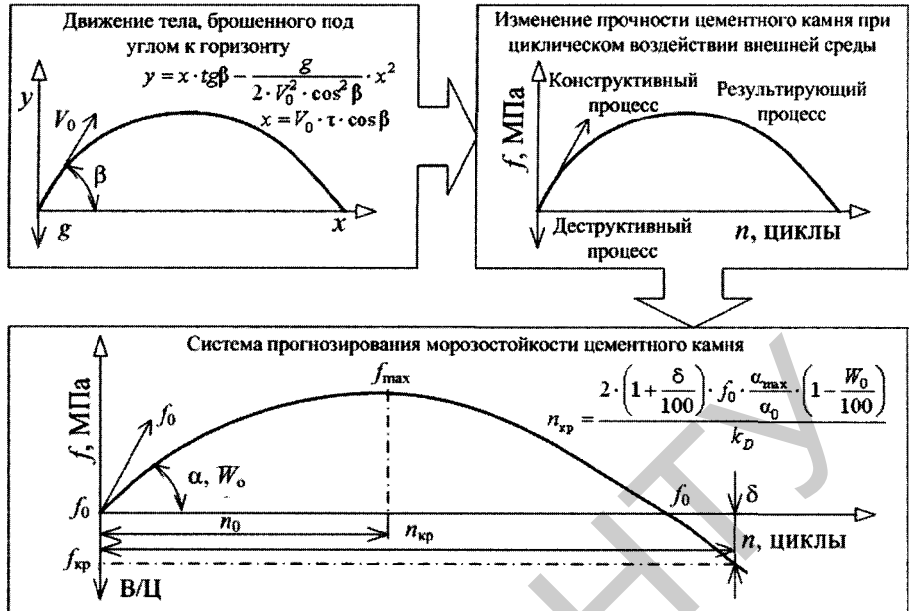


Рис. 1. Последовательность разработки системы прогнозирования морозостойкости цементного камня

- $\tau$  — время твердения, сут;
- $C_3S$  — содержание алита в цементе, %;
- $\beta_1$  — уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента;
- $\beta_2$  — уравнивающий коэффициент, зависящий от содержания минерала  $C_3A$  в цементе.

Абсолютное значение степени гидратации цемента в возрасте 28 сут применительно к нормальным условиям твердения  $\alpha_{28}^{20}$ , %, в формуле (7) определяют в зависимости от относительного водосодержания цементного теста  $X$  по следующим уравнениям [10]:

$$\text{при } X \leq 1,65 \quad \alpha_{28}^{20} = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2} \cdot e^{165X}, \quad (8)$$

$$\text{при } X > 1,65 \quad \alpha_{28}^{20} = 70 + 5 \cdot (X - 1,65). \quad (9)$$

Значение  $K_\Phi$  в (7) представляет собой произведение коэффициентов, учитывающих влияние разнообразных факторов на степень гидратации цемента 10:

$$K_\Phi = k_t \cdot k_w \cdot k_M \cdot k_S \cdot k_{SO_3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}, \quad (10)$$

- где  $k_t$  — коэффициент, зависящий от температуры 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;
- $k_{SO_3}$  — 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.

Для определения значения максимально возможной степени гидратации вяжущего  $\alpha_{max}$  можно воспользоваться классическими представлениями Т. Пауэрса [11, 12] о том, что только при водоцементных отношениях,



Рис. 2. Зависимость степени гидратации цемента от относительного водосодержания цементного теста

равных 0,38–0,42 и выше, при длительном твердении цемент может прогидратироваться полностью, но при меньших значениях В/Ц максимально возможная степень гидратации линейно уменьшается. Это положение достаточно просто трансформировать в более удобную для расчетов форму "относительное водосодержание цементного теста — степень гидратации цемента" (рис. 2).

Вернувшись к уравнению (6), рассмотрим деструктивный процесс. Величина  $g$  в (6) характеризует его интенсивность и может быть интерпретирована функцией, зависящей, как получено авторами статьи, от относительного водосодержания цементного теста:

$$\text{при } X \leq 1,4 \quad k_D = 0,07 + 0,22 \cdot (X - 0,5), \quad (11)$$

$$\text{при } X > 1,4 \quad k_D = 0,27 + 4 \cdot (X - 1,4)^{2 \cdot (X - 1,4)}. \quad (12)$$

Таким образом, окончательное уравнение для расчета морозостойкости цементного камня выглядит так:

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \left(\frac{\alpha_{max}}{\alpha_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{k_D}, \quad (13)$$

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Попытаемся осуществить переход от морозостойкости цементного камня к морозостойкости бетона. По мнению авторов, это удобно сделать через систему коэффициентов, учитывающих разнообразные, характерные для бетона, влияющие факторы, которые получены как в результате собственных экспериментальных исследований авторов, так и анализа литературных источников.

Бесспорно влияние суммарного содержания пылевидных и глинистых частиц в мелком и крупном заполнителях на морозостойкость бетона. В [13] при расчете состава тяжелого бетона эта зависимость принята линейной. Для уточнения зависимости была исследована морозостойкость бетона как на чистых заполнителях, так и на искусственно загрязненных добавлением в песок и щебень примесей в количестве, обеспечивающем суммарное содержание пылевидных и глинистых частиц от 0 % до 7 % (рис. 3).

Влияние минералогического состава цемента (особенно содержание алюмината кальция) на морозостойкость бетона подчеркивалось уже давно [1–3]. Для количественной оценки этого влияния авторы воспользовались данными, приведенными в [1–6]. Цементы были сгруппированы в выборки по содержанию алюмината кальция в пределах около 2 %, (2–5) %, (6–8) % и более 10 %. Морозостойкость бетона, приготовленного на цементах первой выборки, была принята за единицу, соответственно были получены коэффициенты влияния для других выборок (см. рис. 3).

Для оценки влияния эмульгированного воздуха, вовлеченного в бетонную смесь при применении воздухововлекающих и иных подобных добавок, авторы воспользовались обширными исследованиями в данной области, приведенными в [6]. По мнению авторов статьи, вряд ли необходима постановка дополнительных экспериментов для подтверждения (или опровержения) приведенных на рис. 3 результатов, поскольку авторы монографии [6] известны как ученые, внесшие существенный вклад в разработку теории морозостойкости бетона и соответствующих нормативных документов.

В последнее время в Республике Беларусь начинает интенсивно развиваться технология утилизации лома бетонных и железобетонных

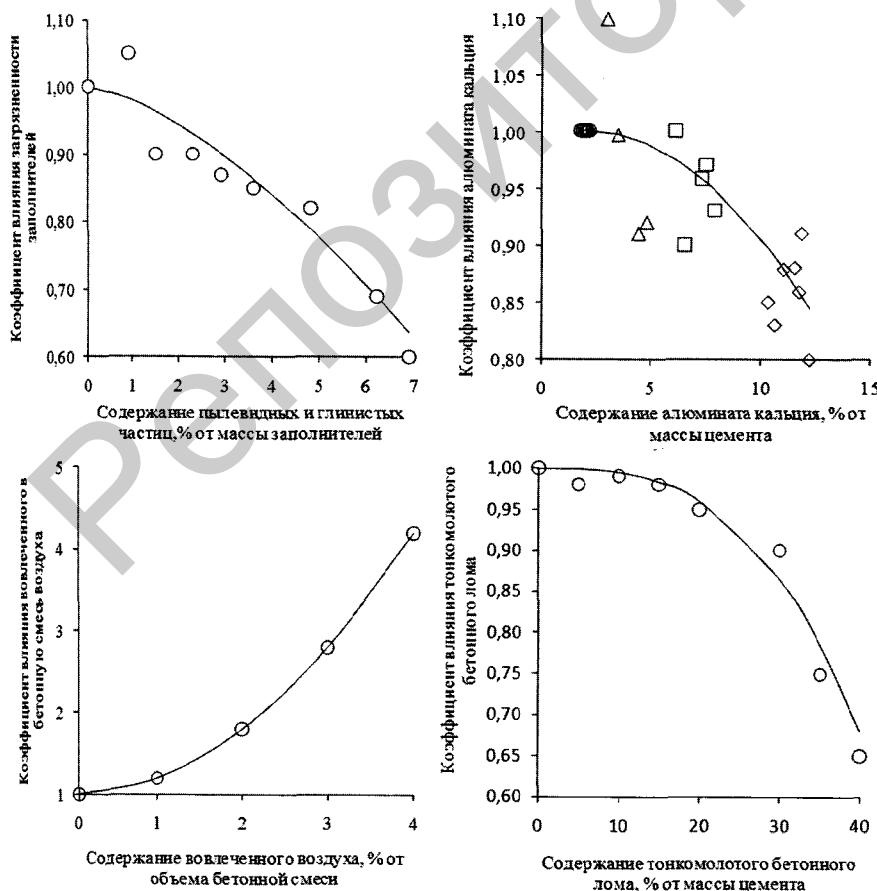


Рис. 3. Учет факторов, влияющих на морозостойкость бетона

конструкций не только для использования продуктов дробления взамен (частичного или полного) крупного и мелкого заполнителей, но и их измельчения, соизмеримого с тонкостью помола цемента [14]. Идея заключается во вторичном использовании цемента, до конца не прогидратировавшегося в утилизируемых конструкциях. Первоначальные прикладные эксперименты позволили выявить тенденции влияния тонкомолотого лома на морозостойкость бетона (см. рис. 3).

Таким образом, переход от морозостойкости цементного камня к морозостойкости бетона ( $n_6$ , циклы), достаточно просто реализуется через систему коэффициентов с учетом содержания пылевидных, глинистых и илистых частиц в заполнителе ( $G_{зап}$ , в % от массы песка и щебня), трехкальциевого алюмината в цементе ( $C_3A$ , в % от массы цемента), воздуха в бетонной смеси ( $V_B$ , в % от объема бетонной смеси) и тонкомолотого бетонного лома ( $D_{моб}$ , в % от цемента):

$$n_6 = n_{кр} \cdot k_{зап} \cdot k_B \cdot k_{C_3A} \cdot k_{моб}, \quad (14)$$

$$\text{где } k_{зап} = 1 - 0,02 \cdot \sqrt{G_{зап}^3};$$

$$k_{C_3A} = 1 - 0,0015 \cdot (C_3A - 2)^2;$$

$$k_B = e^{0,35V_B};$$

$$k_{моб} = 1 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot D_{моб}^2.$$

#### ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЕТОВ

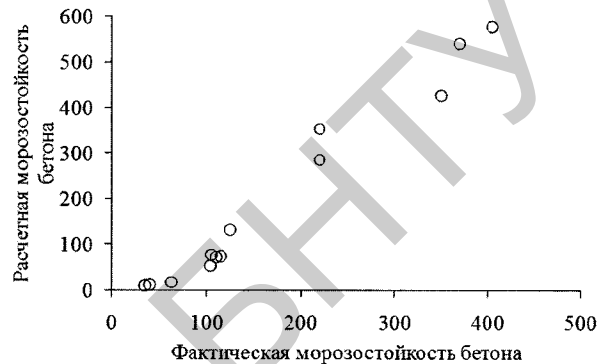
Сопоставление рассчитываемых по предложенным уравнениям значений морозостойкости бетона с экспериментально полученными авторами статьи результатами показало достаточно высокую сходимость, что и неудивительно, поскольку предлагаемая модель прогнозирования как раз и основывается на собственных данных. В связи с этим рассмотрим некоторые литературные источники, представленные в которых данные могут быть использованы для оценки работоспособности системы прогноза.

Основной фактор, определяющий морозостойкость бетона — водоцементное отношение. Например, в [15] даны минимально возможные значения водоцементного отношения, обеспечивающие требуемые марки бетона по морозостойкости. Видоизменим таблицу 5в [15], включив в нее прогнозируемые значения морозостойкости бетона (таблица 1).

В другом достаточно авторитетном источнике [16], в недавнем прошлом бывшем чуть ли не настольной книгой инженера-технолога, приводятся расходы цемента, обеспечивающие получение требуемой морозостойкости бетона, причем с учетом марки бетонной смеси по удобоукладываемости. Включим в таблицу 20 [16] и результаты расчетов расхода цемента марки М500 для

**Таблица 1. Взаимосвязь водоцементного отношения бетонной смеси и морозостойкости бетона**

Водоцементное отношение бетонной смеси (не более)	Морозостойкость бетона $n_6$ , циклы	
	По данным [15]	По расчету
0,60	100	125
0,55	200	214
0,50	300	313
0,45	400	384
0,40	500	521



**Рис. 4.** Сопоставление рассчитываемых значений морозостойкости бетона по предложенной методике с фактическими, приведенными в [6]

циклов замораживания и оттаивания, указанных в скобках (таблица 2).

И, наконец, на рис. 4 приведено сопоставление рассчитываемых значений морозостойкости с фактическими результатами для бетонов с расходами цемента — от 200 до 500 кг/м<sup>3</sup> и воды — от 160 до 200 кг/м<sup>3</sup> на чистоклинкерном цементе марки М500 с содержанием  $C_3A$  6 %–8 %, взятыми из [6].

Проанализировав данные в таблицах 1 и 2, а также на рис. 4, в целом можно констатировать, что предложенная система прогнозирования морозостойкости бетона позволяет получать результаты, сопоставимые с традиционными, то есть вполне работоспособна.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Разработана модель прогнозирования морозостойкости цементного камня, основывающаяся на аналогии движения тела, брошенного под углом к горизонту, и изменения прочности материала в процессе циклического замораживания и оттаивания.
- 2 Посредством системы коэффициентов, учитывающих загрязненность смеси заполнителей, минералогический состав цемента, содержание воздуха

**Таблица 2. Расход цемента, обеспечивающий требуемую морозостойкость бетона**

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости	Расход цемента, кг, для обеспечения морозостойкости бетона					
	По данным [16]			По расчету		
	F100–F150	F200	F300 и более	F100 (расчет для 125 циклов)	F200 (расчет для 280 циклов)	F300 (расчет для 340 циклов)
П1	320	400	440	323	392	446
П2	300	375	410	303	370	409
Ж1	280	350	380	285	348	386
Ж2	260	325	360	269	330	367

в бетонной смеси и тонкомолотых продуктов переработки бетонного лома, реализован переход от морозостойкости цементного камня к морозостойкости тяжелого бетона.

3 Полученная система прогнозирования морозостойкости цементного камня и бетона может быть встроена в методику проектирования состава бетона с обеспечением требуемой долговечности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горчаков, Г. И. О выборе морозостойких цементов и бетонов для гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков // Труды Государственного всесоюзного научно-исследовательского института цементной промышленности "НИИЦемент". — М.: Промстройиздат, 1954. — Вып. 8. — С. 50–114.
2. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. — М.: Стройиздат, 1965. — 284 с.
3. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона / С. В. Шестоперов. — М.: Научно-техническое издательство автотранспортной литературы, 1955. — 480 с.
4. Добролюбов, Г. В. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. В. Добролюбов, В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг; под общ. ред. Г. В. Добролюбова. — М.: Стройиздат, 1983. — 212 с.
5. Шейкин, А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц. — Л.: Стройиздат, 1989. — 128 с.
6. Большаков, В. И. Основы теории и методологии многопараметрического проектирования составов бетона / В. И. Большаков, Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин: монография. — Днепрпетровск: ПГАСА, 2006. — 360 с.
7. Блещик, Н. П. Структура, температурные деформации и методика ускоренного определения морозостойкости бетона / Н. П. Блещик, О. В. Лазаренко // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. тр.; под ред. Д. Н. Лазовского. — Минск: Технопринт, 2001. — С. 30–35.
8. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем.; под ред. Е. М. Лейкина. — М.: Мир, 1985. — 520 с.
9. Ковшар, С. Н. Влияние циклического замораживания и оттаивания на изменение степени гидратации цемента и структурно-механические характеристики цементного камня / С. Н. Ковшар, В. В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовки инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVI Междунар. науч.-метод. семинара; под общ. ред. П. С. Пойты, В. В. Тура. — Брест: БрГТУ, 2009. — Ч. 2. — С. 147–151.
10. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / В. В. Бабицкий. — Минск, 2004. — 370 л.
11. Пауэрс, Т. К. Физическая структура портландцементного теста / Т. К. Пауэрс // Химия цемента; под ред. Х. Ф. У. Тейлора, пер. с англ. — М.: Стройиздат, 1969. — С. 300–819.
12. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // В кн.: Четвертый Международный конгресс по химии цемента. — М.: Стройиздат, 1964. — С. 402–438.
13. Рекомендации по проектированию составов тяжелого бетона расчетно-графическим методом. — Минск: Белавтодор, 2005. — С. 50.
14. Бибик, М. С. Основные направления ресурсосбережения в производственной деятельности ОАО "Завод СЖБ № 1" / М. С. Бибик // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовки инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV Междунар. науч.-методич. семинара; под общ. ред. Д. Н. Лазовского, А. А. Бакатовича. — Новополоцк: ПГУ, 2008. — Т. II — С. 151–155.
15. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1979. — 103 с.
16. Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций: СНиП 5.01.23-83. — М.: Стройиздат, 1985. — 44 с.

Статья поступила в редакцию 04.11.2009.