

### 7. Выводы

1. Предложена методика неразрушающего контроля остаточной морозостойкости бетона эксплуатируемых при циклическом замораживании-оттаивании железобетонных конструкций на основе метода отрыва со скалыванием.

2. В качестве критерия оценки морозостойкости принят коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, учитывающий структуру бетона и особенности развития трещин при морозной деструкции.

3. Методика апробирована на реальных железобетонных конструкциях, эксплуатируемых при ЦЗО.

УДК 624.012.4.35

Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М.

## РАСЧЕТ СЖАТЫХ И ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

### 1. Введение.

Под воздействием мороза происходит постепенное разрушение или фрагментация на составные части бетонных поверхностей, как результат поверхностного заморзания и оттаивания. В условиях увлажнения и замораживания-оттаивания происходит уменьшение прочности бетона, и около поверхности происходит полное разложение на составные части и полная потеря материала.

Бетон разрушается на составные части в результате заморзания воды в капиллярных порах. Одной из причин разрушения является 9%-е увеличение в объеме, которое происходит при заморзании воды. Другой причиной давления, возникающего в бетоне, является рост кристаллов льда при отрицательной температуре и значительной влажности.

Сопrotивление бетона морозу является свойством материала. Сопrotивление морозу зависит от других свойств бетона, таких, как прочность, плотность, содержание воздуха и т.д. Скорость разрушения зависит, однако, не только от качества бетона, но и от воздействия окружающей среды.

Действие окружающей среды усиливается от воздействия соли, которую применяют для предотвращения обледенения. Типичным для механизма разрушения от соли и мороза является постепенное отслаивание, шелушение тонких слоев бетона.

### 2. Физическая модель послойного снижения прочности бетона при ЦЗО

Полное разрушение от мороза происходит сначала как уменьшение прочности по краям бетонной конструкции. Модель послойного снижения прочности наилучшим образом описывается формулой [1, 2]:

$$R(d) = R_0 [1 - [1 - (d/H)^n]], \quad (1)$$

где  $R(d)$  - кубиковая прочность на сжатие бетона на глубине  $d$ ,

$R_0$  - кубиковая прочность на сжатие неразрушенного бетона

$d$  - глубина от поверхности

$H$  - глубина воздействия

$n$  - индекс, относящийся к числу циклов (или время) заморзания и оттаивания.

В расчете конструкций уменьшение прочности бетона в краевых зонах можно представить либо уменьшением прочности по всей площади поперечного сечения бетона, либо уменьшением размеров поперечного сечения. Последний метод наиболее привлекателен для конструктора и реализуется введением понятия потери сечения бетона

На рисунке 1 дано графическое представление уменьшения прочности согласно уравнению в пределах глубины влия-

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 22690-88. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 25с.
- Srivastava K.N., Kumar M. A note on the problem of edge crack in a semi-circular plate // Int. J. Fract. – 1976. -12, N4. – p.645-646.
- Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Кожобеков Т.А. Новый метод определения морозостойкости бетона на основе фундаментальных положений механики разрушения // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сборник трудов VII международного научно-методического семинара. Посвящается 100-летию со дня рождения профессора В.В. Михайлова. Брест, БГТУ, 2001. – С.454-456.

ния  $H$ . Значение индекса  $n$  уменьшается от бесконечности (в момент  $t=0$ ) до 0 (для бесконечно длительного времени). Реальная потеря бетона  $x$  показана на рисунке, как расчетная. Если из ширины конструкции  $a$ , вычесть значение  $x$ , получим ширину конструкции с неразрушенным бетоном. Таким образом, учет реального разрушения бетона производится уменьшением размеров поперечного сечения конструкции. Явной потерей является глубина влияния, деленная на величину  $n+1$ , соотношенную со временем. На рисунках 6.2 и 6.3 приведены зависимости потери бетона от количества циклов замораживания-оттаивания.

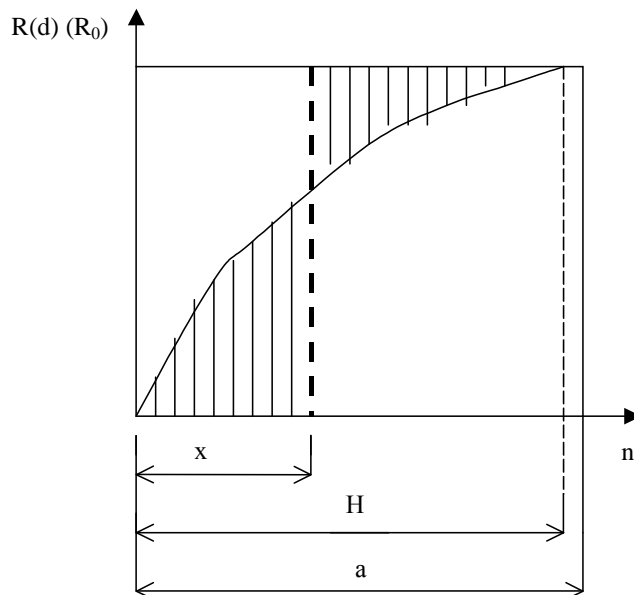


Рис.1. Схема потери сечения бетона.

### 3. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик обычного, модифицированного и напрягающего бетона при ЦЗО.

Исследования проводили на шести составах бетона. Первые три состава (серия 1, 2 и 3) были изготовлены на обычном портландцементе, а остальные – на напрягающем цементе (серия 4, 5 и 6).

Таблица 1. Составы бетонных смесей, применяемых для проведения исследований

Номер серии	Расход составляющих, кг на 1 м <sup>3</sup> бет. Смеси					
	Ц	П	Щ	В	С-3	СНВ
Серия 1	480	680	1100	180	–	–
Серия 2	465	655	1160	165	3,72	–
Серия 3	528	620	1100	195	–	0,3
Серия 4*	455	680	1120	180	–	–
Серия 5*	440	695	1130	175	–	–
Серия 6*	490	670	1110	175	4,0	–

\* – составы бетона на напрягающем цементе НЦ-20 и НЦ-40.

Образцы изготавливались из обычного тяжелого и напрягающего бетона класса по прочности на сжатие В 30. Характеристики применяемых материалов приведены в работах [5, 6].

Составы бетона подбирались таким образом, чтобы получить различные структурные характеристики материалов при близких прочностных показателях. На характер поровой структуры цементного камня влияли путем ее модификации пластифицирующей добавкой С-3 и воздухововлекающей СНВ. Бетонные смеси уплотняли вибрированием на лабораторной виброплощадке. Твердение образцов происходило в нормально-влажностных условиях при температуре 20°C и относительной влажности 95 %. Возраст образцов к моменту испытаний составлял не менее 28 сут. Составы бетонов приведены в таблице 1. Методика климатических и силовых испытаний описана в работах [7, 8, 9].

#### 4. Анализ результатов экспериментальных исследований.

На основании выполненных экспериментальных исследований подобраны зависимости изменения прочностных ( $R$ ,  $R_{bt}$ ) и деформационных характеристик ( $E_b$ ) от количества стандартных циклов замораживания-оттаивания:

а) для обычного бетона на портландцементе (серия 1)

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -1 \cdot 10^{-5} n^2 + 0,0012n + 1,0143; \quad (2)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{E_{b(0)}} = -9 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0016n + 0,9774; \quad (3)$$

б) для бетона, модифицированного суперпластификатором С-3 (серия 2)

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -1 \cdot 10^{-5} n^2 + 0,0012n + 1,0143; \quad (4)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{E_{b(0)}} = -9 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0016n + 0,9774; \quad (5)$$

в) для бетона, модифицированного воздухововлекающей добавкой СНВ (серия 3)

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -1 \cdot 10^{-5} n^2 + 0,0028n + 1,0052; \quad (6)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{E_{b(0)}} = -4 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0015n + 1,0232; \quad (7)$$

г) для напрягающих бетонов серии 4 (зависимости 8, 9 и 10), серии 5 (11, 12 и 13), серии 6 (14, 15 и 16).

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -9 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0003n + 1,0047; \quad (8)$$

$$\frac{R_{bt(n)}}{R_{bt(0)}} = -2 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0003n + 0,9752; \quad (9)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{E_{b(0)}} = -7 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0002n + 0,9906; \quad (10)$$

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -1 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0005n + 1,0156; \quad (11)$$

$$\frac{R_{bt(n)}}{R_{bt(0)}} = -7 \cdot 10^{-8} n^2 + 0,0008n + 1,0068; \quad (12)$$

$$\frac{R_{(n)}}{R_{(0)}} = -2 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0005n + 1,0245; \quad (14)$$

$$\frac{R_{bt(n)}}{R_{bt(0)}} = -6 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0004n + 0,9796; \quad (15)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{E_{b(0)}} = -4 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,00002n + 1,0103; \quad (16)$$

где  $R_0$ ,  $R_{bt(0)}$ ,  $E_{b(0)}$  – соответственно, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе и модуль упругости бетона контрольных образцов.

$R_n$ ,  $R_{bt(n)}$ ,  $E_{b(n)}$  – соответственно, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе и модуль упругости бетона после  $n$  циклов замораживания-оттаивания.

#### 5. Расчет железобетонных элементов при ЦЗО

Используя полученные в эксперименте зависимости (2-16) и формулу (1) произведен расчет потери сечения образцов обычного, модифицированного и напрягающего бетона при ЦЗО. Графическое изображение потери сечения образцов в зависимости от стандартных циклов замораживания-оттаивания представлено на рисунках 2 и 3.

В таблицах 2 и 3 приведены примеры расчета железобетонной колонны (бетон 1 серии) и железобетонной балки (бетон 4 серии).

Выполненные расчеты позволяют прогнозировать прочность сечений железобетонных элементов, подвергающихся климатическим воздействиям в условиях Республики Беларусь, соответствующим  $n$  стандартных циклов замораживания-оттаивания (рисунок 4, 5) при экспериментально подтвержденном характере морозной деструкции используемых бетонов.

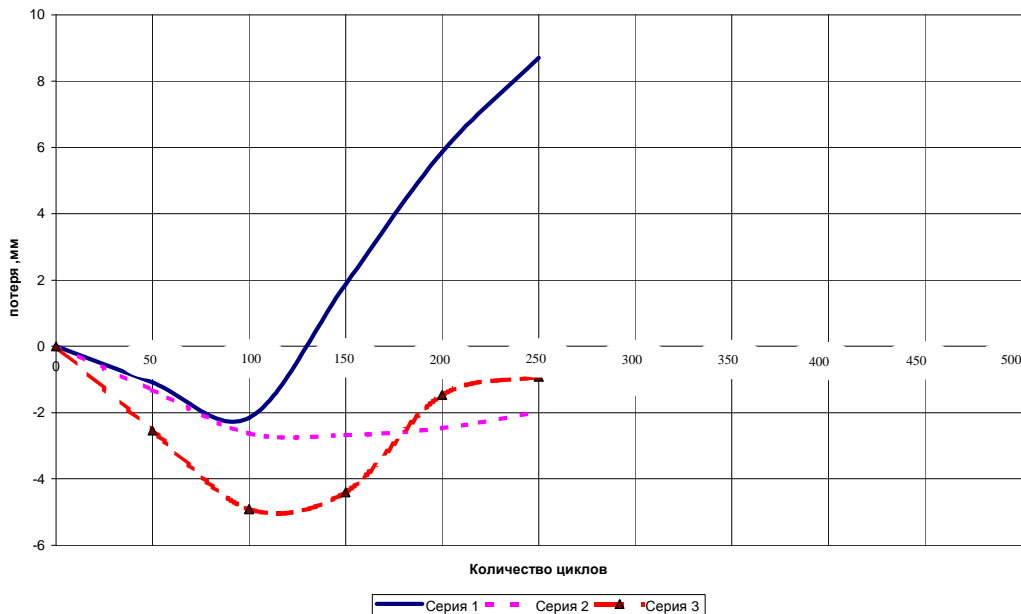


Рис. 2. Потеря сечения образцов на обычном цементе.

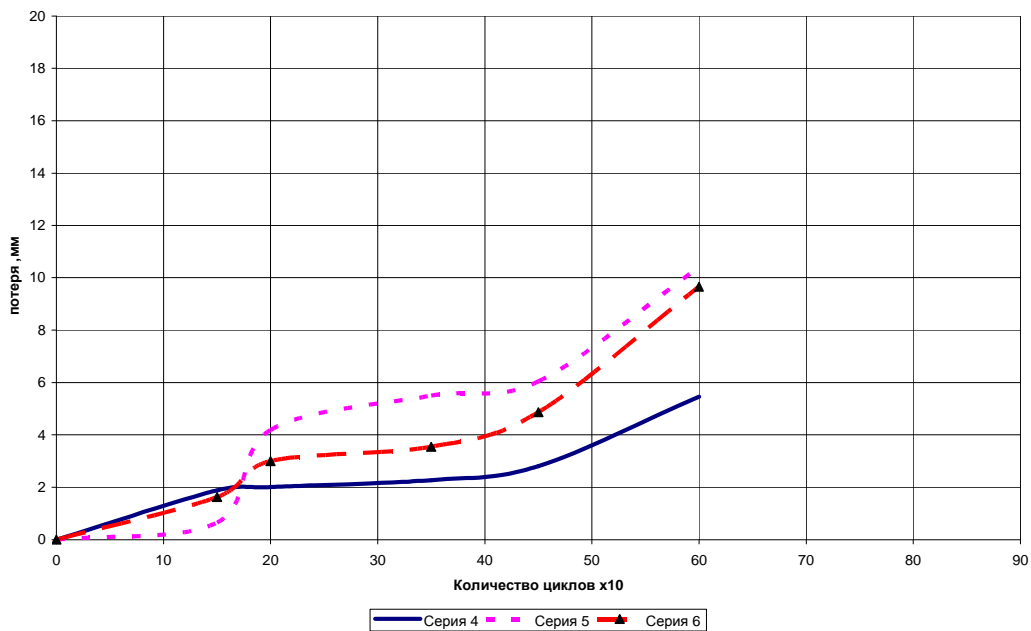


Рис. 3. Потеря сечения образцов на напрягающем цементе.

Таблица 2. Пример расчета железобетонной колонны (серия 1) после 100 циклов ЦЗО

Схема сечения	Пример расчета при $n = 300$ циклов
	$b = 1,04318 \cdot b = 1,04318 \cdot 500 = 521,9104 \text{ мм}$ $a = 0,52159 \cdot b - 0,5 \cdot c = 0,52159 \cdot 500 - 0,5 \cdot 380 = 70,795 \text{ мм}$ Принимаю бетон с34/44 для которого $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 34 / 1,5 = 22,6667 \text{ МПа,}$ $\alpha = 0,85$ $N_{sd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_c = 0,85 \cdot 22,6667 \cdot 521,9104 \times 521,9104 = 5241514,735 \text{ Н} = 5241,6 \text{ кН}$

Таблица 3. Пример расчета железобетонной балки (серия 4) после 200 циклов ЦЗО

Схема сечения	Пример расчета при $n = 300$ циклов
	<p><math>b = 1,00 \cdot b = 1,00 \cdot 500 = 500</math> мм</p> <p><math>a = 0,5 \cdot b - 0,5 \cdot c = 0,5 \cdot 500 - 0,5 \cdot 380 = 60</math> мм</p> <p>Принимаю бетон с27,6/32,6 для которого</p> <p><math>f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 27,6 / 1,5 = 18,4</math> МПа, <math>\alpha = 0,85</math></p> <p>Принимаю арматуру S400 для которой</p> <p><math>f_{yd} = f_{ck} / \gamma_s = 400 / 1,1 = 365</math> МПа, 3d36 S400 с AS1 = 30,54 см<sup>2</sup> ;</p> <p>Балка <math>L = 4500</math> мм .</p> <p>Расчет :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>x = (f_{yd} \cdot AS1) / (\alpha \cdot f_{cd} \cdot b) = (365 \cdot 3054) / (0,85 \cdot 18,4 \cdot 500) = 142,546</math> мм ;</li> <li><math>z_{lim} = 0,55619</math> ;</li> <li><math>z = x / d = 142,546 / 440 = 0,32399 &lt; z_{lim} = 0,55619</math></li> <li><math>N = 3 \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot (d - x / 2) / L = 3 \cdot 0,85 \cdot 18,4 \cdot 500 \cdot 142,546 \cdot (440 - 142,546 / 2) / 4500 = 274015,77</math> Н = 274 кН</li> </ol>

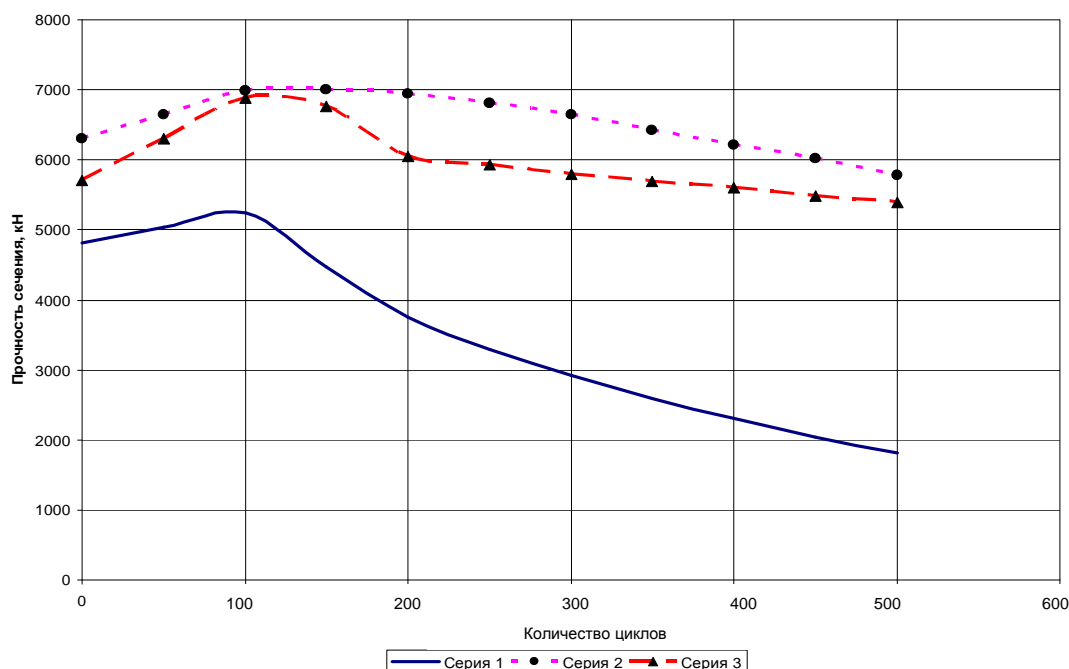


Рис. 4. Изменение прочности сечения железобетонной колонны, рассчитанное для бетона серий 1, 2 и 3.

**6. Выводы.**

На основе результатов экспериментальных исследований изменения прочностных и деформационных характеристик обычного, модифицированного и напрягающего бетонов при ЦЗО проверена применимость физической модели послойного снижения прочности в климатических условиях Республики Беларусь. Подтверждена возможность расчета сечений железобетонных конструкций при воздействиях, соответствующих  $n$  стандартных циклов замораживания-оттаивания при экспериментально подтвержденном характере морозной деструкции используемых бетонов.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- Vesikari E. (1994) Durability design of concrete structures with respect to frost attack. Prot. of the symposium Assoc. of Finnish Civil Engineers RIL, 2pp.
- Vesikari E. (1995) Service life design of concrete structures/ Assoc. of Finnish Civil Engineers RIL, Helsinki. 120 pp.

- Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М., Полейко Н.Л., Ковшар С.Н., Гуров И.Н. Особенности морозной деструкции бетонов различной структуры // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Минск, 17-20 октября 2000. – С. 330-334.
- Leonovich S.N., All-Fakih O.A.M. Performance criteria of concrete structures under action of freezingthaw wing // Durability design and fracture mechanics of concrete structures. Proceedings of the International conference “ Construction and Architecture”. Minsk, 4-7 february 2003. – P. 195-204.
- Тур В.В., Кардумян Г.С., Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М. Деформации напрягающего бетона при циклическом замораживании и оттаивании // Напрягающие цементы. Бетоны и самоупражные конструкции. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Брест, 18-20 декабря 2000. – С. 14-26.

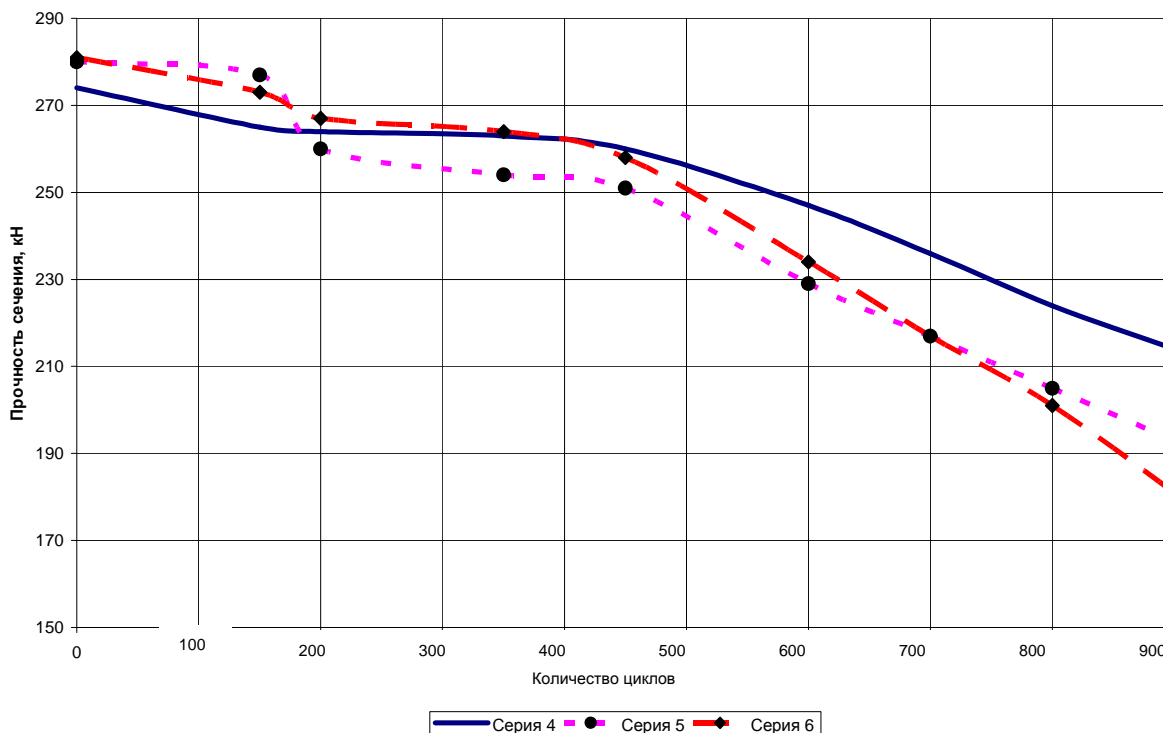


Рис. 5. Изменение прочности сечения железобетонной балки, рассчитанное для бетона серий 4, 5 и 6.

6. Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М., Ковшар С.Н., Полейко Н.Л. Экспериментально-теоретические исследования термовлажностойкости бетона в терминах коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге // Совершенствование железобетонных конструкций, оценка их состояния и усиление. Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции. Минск, 2001. С. – 114-117.
7. Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М. Методика определения коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге // Материалы Международной научно-технической конференции «Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения», посвященной 80-летию Белорусской государственной политехнической академии, (54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА). В 10-ти частях, часть 7. Минск, 2000. – С.25.
8. Аль-Факих О.А.М., И.Н.Гуров, С.Н.Леонович Технология морозостойкого тяжелого бетона // Проблемы совершенствования технологии, организации, экономики и управления в строительстве. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Минск, 18-19 октября 2002. – С. 313-317.
9. Аль-Факих О.А.М., И.Н.Гуров, С.Н. Леонович Технология морозостойкого напрягающего бетона // Проблемы совершенствования технологии, организации, экономики и управления в строительстве. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Минск, 18-19 октября 2002. – С. 318-322.

УДК 614.841.33:624.014

Касперов Г.И., Полевода И.И.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ ПРИ ПОЖАРЕ

Общепринятым подходом к оценке возможности хрупкого разрушения, как в отечественной, так и зарубежной практике, является анализ влажности бетона. Если массовая эксплуатационная влажность бетона ( $W_c$ ) меньше критической влажности бетона ( $W_{cr}$ ), то бетон не будет хрупко разрушаться [1,2]

$$W_c \leq W_{cr} \quad (1)$$

Значение критической влажности ( $W_{cr}$ ) для тяжелых бетонов с гранитным заполнителем принято в российских нормах - 3.5% [2], в европейских строительных нормах [1] как и в "Рекомендациях по защите...", разработанных в 1979 году, – 3% [3]. Для более точной оценки существует аналитический метод определения критической влажности бетона [3]:

*Касперов Георгий Иванович, к.т.н., доцент, начальник каф. пожарной профилактики и предупреждения чрезвычайных ситуаций Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь.*

*Полевода Иван Иванович, ст. преподаватель каф. пожарной профилактики и предупреждения чрезвычайных ситуаций Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь.*

*Беларусь, Командно – инженерный институт МЧС Республики Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25.*