

соотношение между моментом полного разрушения образцов и моментом накопления критического уровня повреждений.

Статья подготовлена в рамках работы W / II B / I / 06/.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Fagerlund G. Trwalosc konstrukcji betonowych. Arkady, 1987.
2. Jasiczak J., Kucz M. Aspekt mrozoodpornosci w betonach drenazowych. Mat. Konf. «Krynica 2007», T.3. S. 77-86.
3. Lelusz M. Identyfikacja zjawisk zachodzacych w strukturze porowatosci betonow cementowych w procesie ich cyklicznego zamrazania i rozmrazania. Zeszyty Naukowe Politechniki Bialostockiej, seria Budownictwo Z. 23, 2003 s. 145-155.
4. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние состава формовочной смеси и режимов тепловой обработки на морозостойкость стеновой керамики // Вестник БГТУ. – 2004. – № 1 (25): Строительство и архитектура. – С. 153-157.
5. Зеликин С.И., Землянский В.Н., Цивилев Р.П. Исследование кинетики разрушения материалов рентгенографическим методом // Стекло и керамика. – № 6. – 1979. – С.23-24.
6. Хлевчук В.Р., Артыкпаев Е.Т. Теплотехнические и звукоизоляционные качества ограждений домов повышенной этажности. – М.: Стройиздат, 1979.
7. Ясин Ю.Д., Ясин В.Ю., Ли А.В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций. – Строительные материалы – № 5 – 2002. – с. 33-35.

8. Kosior-Kazberuk M. Modyfikacja betonu pizeznacronego do konstrukcji mostowych rozttworem asfaltu w wysokowrzacym rozpuszczalniku organicznym. Rozprawa doktorska. Politechnika Bialostocka, 2002.
9. Jozwiak J., Podgorski J. Statystyka od podstaw. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa 2001. – 549 s.
10. Коренюк А.Г., Думанова Л.С. Отличительная особенность морозосолевой коррозии // Изв. Вузов. Строительство. – № 4. – 1992. – с. 57-60.
11. Valenza J.J. and Scherer G.W., Mechanism for Salt Scaling, Jornal Am. Cerem. Soc. 89 (4), 1161-1179, 2006.
12. Copuroyulu O. and Schlanden E., Experimental and Numerical Study of Frost Salf Scaling of Concrete, Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 8", Warsaw, 2006, 387-397.
13. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
14. Карташов Г.Д. Предварительные исследования в теории форсированных испытаний // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий. – М., 1980. – с. 62-104.
15. Lazniewska B. Teoretyczna i praktyczna wartose parametrow struktury porowatosci mrozoodpornego SCC. Mat. Konf. "Krynica 2007", T. 3. S. 111-118.

Материал поступил в редакцию 08.10.08

**NIKITIN V.I., BACKIEL-BIZOZOWSKA B. Evaluation of Concrete Frost Resistance on the Basis of Critical Level of Cumulated Damages**

Frost resistance of building materials is considered as the main indicator of their durability. The analysis of degradation process of building materials subjected to cyclic freezing and thawing showed that the damages development in time runs according to two stages. The first stage is characterized by slower damages cumulation process and longer duration in comporison with the second stage. It was shown the time of passage the material degradation process from the first stage to the second one assigns the critical level of damages cumulation, which can be assumed for evaluation of material frost resistance. The methods of this criterion determination were proposed.

УДК 691.328:620.191.3

**Чернякевич О.Ю., Леонович С.Н.**

**УРАВНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕПАССИВАЦИИ АРМАТУРЫ С ЧАСТНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ**

**Введение.** На сегодняшний день широкое распространение получили вероятностные методы расчетов. При обследовании существующих конструкций вероятностные методы расчетов открывают обширные возможности для инженеров благодаря гибкости расчетных методик, способных учитывать изменения условий эксплуатации конструкций или предъявляемых к ним требований [1].

Метод частных коэффициентов для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, представленный в этой статье, основывается на полном вероятностном методе коррозии карбонизации. Метод частных коэффициентов разделяет влияние погрешностей и изменчивостей, возникающих по различным причинам, посредством установления расчетных величин для базисных переменных [параграф 9 п.9.1 в [2].

Правила метода частного коэффициента приведены в [3].

Метод частного коэффициента используется для расчета долговечности при коррозии карбонизации в бетоне без трещин.

Чтобы определить частный коэффициент надежности по СТЕ ISO 2394-2007, должны быть определены базисные переменные. Влияние базисных переменных на расчет надежности для коррозии карбонизации учитывается соответствующим значением  $\alpha_j$  для значений, рассчитанных по предельному состоянию депассивации из-за карбонизации.

Элемент конструкции отвечает требованиям долговечности для коррозии карбонизации, если выполняется следующее уравнение по предельному состоянию (1), подробно описанному в [4]:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0, \tag{1}$$

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})}, \tag{2}$$

где  $x_{c,d}(t_{SL})$  – расчетное значение глубины карбонизации за время  $t_{SL}$  (мм);

$k_{e,d}$  – расчетное значение функции окружающей среды (-).

$t_{SL}$  – проектный срок эксплуатации (год).

$$a_d = \text{nom } a - \Delta a = \text{nom } c - \Delta a, \tag{3}$$

где  $a_d$  – расчетное значение защитного слоя бетона (мм);

$\Delta a$  – запас защитного слоя,  $\Delta a = 10$  мм.

В уравнении (4) полного вероятностного метода для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, подробно описанному в [5], присутствуют три регулирующих параметра:  $RH_{real}(k_e)$ ,  $a$ ,  $R_{ACC,0}^{-1}$ .

$$g(a, x_{c_i}(t)) = a - x_{c_i}(t) =$$

$$= a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_1 \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_1) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}. \tag{4}$$

Для этих трех параметров введены частные коэффициенты безопасности для воздействия  $\gamma_{RH}$ ,  $\gamma_R$  и отклонение защитного слоя  $\Delta a$  [3]. Частные коэффициенты безопасности не имеют постоянного значения, они зависят от срока службы и показателя надежности  $\beta$  в данном случае  $t_{SL} = 50$  лет,  $\beta = 1,3$ .

**Чернякевич О.Ю.**, преподаватель строительных дисциплин Брестского государственного технического колледжа.

**Леонович С.Н.**, доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

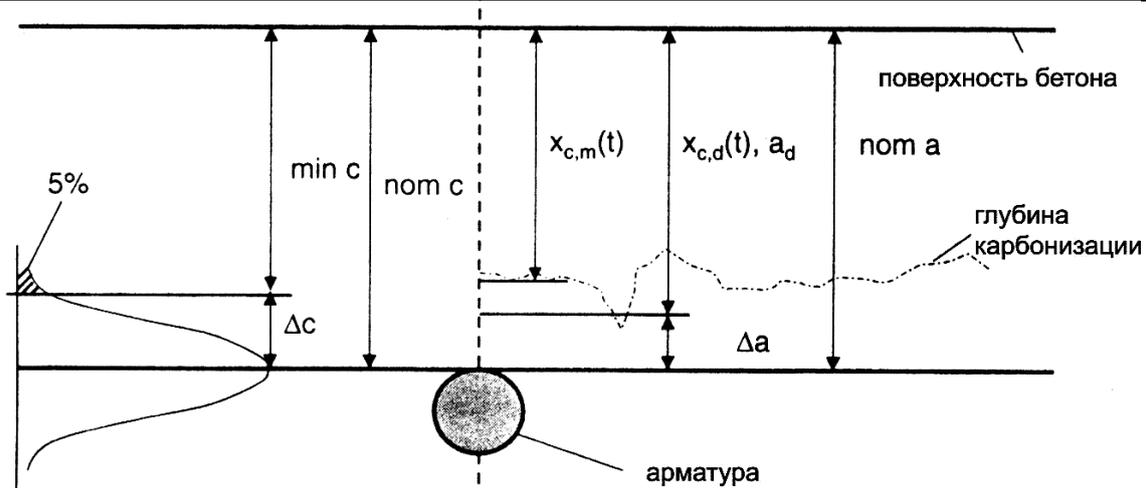


Рис. 1. Обозначения используемые в практике (с левой стороны) и обозначения используемые в методе частных коэффициентов (с правой стороны),

- где *min с* - минимальный защитный слой (мм);  
*пот с* - номинальный защитный слой (мм);  
*Δс* - запас между номинальной и минимальной толщиной защитного слоя (мм);  
*x<sub>c,m</sub>(t)* - среднее значение глубины карбонизации за время *t* (мм);  
*x<sub>c,d</sub>(t)* - расчетное значение глубины карбонизации за время *t* (мм);  
*a<sub>d</sub>* - расчетное значение защитного слоя (мм);  
*Δа* - запас защитного слоя (мм);  
*пот а* - номинальный защитный слой бетона (мм).

Таблица 1. Классификация проектных сроков эксплуатации *t<sub>SL</sub>* по [3]

Класс проектного срока эксплуатации	Проектный срок эксплуатации, <i>t<sub>SL</sub></i> (годы)	Примеры
1	10	Для временных конструкций
2	10-25	Для заменяемых участков несущей конструкции, например подкрановые балки, опоры
3	15-30	Для несущих конструкций, применяемых в сельском хозяйстве и аналогичных им
4	50	Для конструкции зданий и других обычных несущих конструкций
5	100	Для монументальных зданий и других инженерных конструкций, крупных мостов

а) Несущие конструкции или части несущей конструкции, демонтируемые с целью повторного использования, не должны рассматриваться как несущие конструкции с ограниченным временем эксплуатации.

Коэффициент, зависящий от окружающей среды, рассчитывается по уравнению (5) [6, 7].

$$k_{e,d} = \frac{1 - \left( \frac{RH_{real,k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left( \frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \cdot g_e \quad (5)$$

где *RH<sub>real,k</sub>* – значение относительной влажности карбонизированного слоя (%);

*RH<sub>ref</sub>* – эталонная относительная влажность (%);

*γ<sub>RH</sub>* – это частный коэффициент безопасности для относительной влажности *RH<sub>real</sub>*, *γ<sub>RH</sub>*=1.3;

*k<sub>c,d</sub>* – расчетное значение коэффициента перемещения.

Относительную влажность *RH<sub>real</sub>* можно рассчитать по данным метеорологической станции. Определить относительную влажность можно, рассчитав среднесуточное значение влажности атмосферного воздуха, окружающего конструкцию по данным метеорологической станции.

Рекомендуемая относительная влажность *RH<sub>ref</sub>* выбирается в соответствии с условиями испытаний, определяющими сопротивление карбонизации в бетоне. *RH<sub>ref</sub>* постоянный параметр, равный 65 %.

Коэффициенты *g<sub>e</sub>* и *f<sub>e</sub>* определяются методом аппроксимации кривой, полученной по данным эксплуатационных измерений. Рекомендуется применять результаты коэффициентов: *f<sub>e</sub>*=5,0, *g<sub>e</sub>*=2,5 [6, 8].

На коэффициент перемещения *k<sub>c</sub>* оказывает влияние эффективное сопротивление карбонизации, которое зависит от условий твердения бетона. Статистическое определение *k<sub>c</sub>* проводится по линейной регрессии Байеса [6, 7].

$$k_c = \left( \frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (6)$$

где *t<sub>c</sub>* - постоянный параметр времени твердения, (в днях);

*b<sub>c</sub>* = -0,567 ( стандартное отклонение *s*=0,024);

*k<sub>t,d</sub>* - среднее значение *k<sub>t,d</sub>*=1,25; (*s*=0,35);

*R<sub>ACC,0,k</sub>*<sup>-1</sup> – значение, характеризующее обратное эффективное сопротивление карбонизации бетона ((мм<sup>2</sup>/год)/(кг/м<sup>3</sup>));

*γ<sub>R</sub>* - коэффициент безопасности для обратного эффективного сопротивления карбонизации бетона *R<sub>ACC,0,k</sub>*<sup>-1</sup>, *γ<sub>R</sub>*=1,5;

*ε<sub>t,d</sub>* – расчетное значение вектора ошибок, *ε<sub>t,d</sub>*=315,5;

*C<sub>S,d</sub>* - расчетная величина концентрации CO<sub>2</sub>, среднее значение *C<sub>S,d</sub>*=0,00082 кг/м<sup>3</sup>[9];

*W(t)* – погодная функция, рассчитываемая по уравнению (7) [8]:

$$W(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot T_0 W)^{p_{w,d}}}{2}} \quad (7)$$

*t<sub>0</sub>* – эталонное время (годы), *t<sub>0</sub>* = 0,0767;

*p<sub>SR</sub>* - вероятность проливных дождей (-).

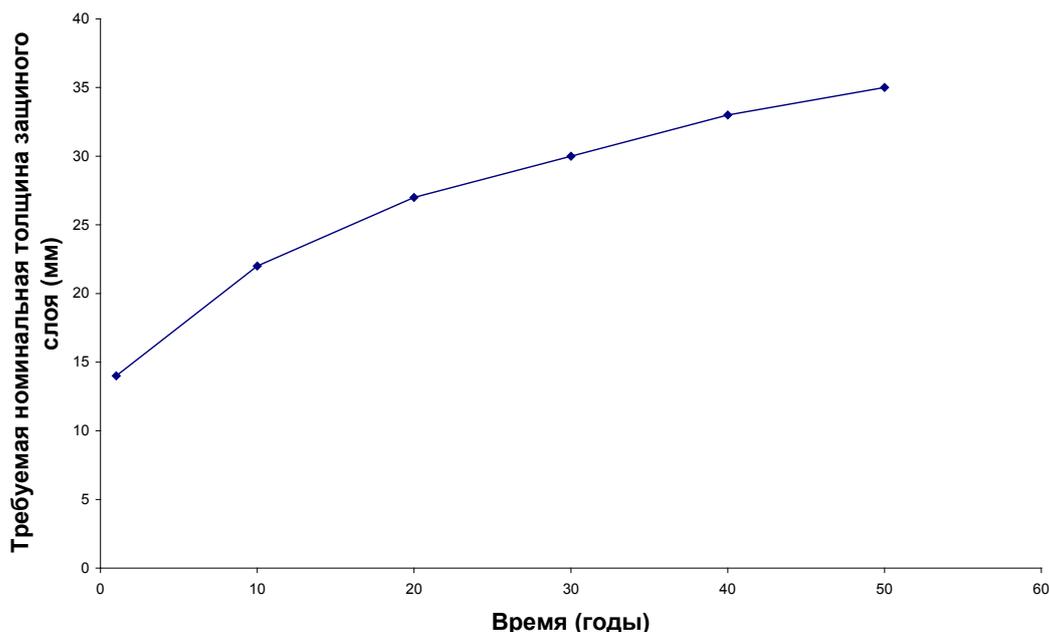
*T<sub>0W</sub>* – время увлажнения, рассчитывается по уравнению (8)

**Таблица 2.** Используемые коэффициенты перемещения  $k_{c,d}$  для различных периодов продолжительности выдерживания бетона  $t_c$  [6]

Продолжительность выдерживания бетона $t_c$ (днях)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$k_{c,d}$	3,0	2,03	1,61	1,37	1,2	1,09	1,0	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,7	0,67

**Таблица 3.** Определение  $R_{ACC,0}^{-1}$

$R_{ACC,0}^{-1}$ [ $10^{-11}(\text{м}^2/\text{сек})/(\text{кг}/\text{м}^3)$ ]	$W/C_{eqv}^{-1}$					
(тип цемента)	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
Цем. I 42.5R	Н.о <sup>2</sup>	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
Цем. I 42.5R+зола унос ( $k=0,5$ )	Н.о <sup>2</sup>	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
Цем. I 42.5R+ микрокремн. ( $k=2,0$ )	3,5	5,5	Н.о <sup>2</sup>	Н.о <sup>2</sup>	16,5	Н.о <sup>2</sup>
Цем. III / В 42.5	Н.о <sup>2</sup>	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0



**Рис. 2.** Необходимая номинальная толщина защитного слоя (пот а) в течение времени воздействия карбонизации, попеременного увлажнения-высыхания, проливных дождей (на вертикально армированный бетонный элемент) для бетона с  $W/C=0,6$

$$T_0W = \frac{\text{кол} - \text{во дней с осадками } h_{Nd} \geq 2,5\text{мм в год}}{365} \quad (8)$$

Если невозможно получить данные обратного сопротивления карбонизации экспериментально, то можно использовать литературные данные, приведенные в таблице 3 [8].

Вероятность проливного дождя можно вычислить, зная направление ветра во время дождя (по данным ближайшей метеостанции). Определить величину  $p_{SR}$  можно следующим образом:

$p_{SR}$  для вертикальных элементов, вычисляется из данных метеостанции;

$p_{SR}$  для горизонтальных элементов  $p_{SR} = 1$ ;

$p_{SR}$  для внутренних элементов конструкции  $p_{SR} = 0$ ;

$b_{w,d}$  – расчетное значение экспонента регрессии, среднее значение  $b_w = b_{w,d} = 0,446$ .

Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_{RH}$ ,  $\gamma_R$ , и отклонение от защитного слоя  $\Delta a$  были рассчитаны для значения надежности  $\beta = 1,3$  [по СТБ ISO 2394-2007, таблица E2] с учетом предельного состояния депассивации арматуры вследствие карбонизации. Если необходима более высокая надежность, коэффициенты безопасно-

сти по предельному состоянию изменятся соответственно.

**Пример расчета.** Исходные данные, характеризующие окружающую среду, диффузию бетона и твердение бетона представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Исходные данные для метода частных коэффициентов

Параметр	Единица измерения	Исходные данные
$RH_{real,k}$	% относ. влажность	80
$\gamma_{RH}$	-	1,3
$k_{c,d}$	-	1,61
$R_{ACC,0,k}^{-1}$	$[(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)]$	4500
$\gamma_R$	-	1,5
$C_{s,d}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
$t_{SL}$	годы	1-50
$p_{SR}$	-	0,1
$T_0W$	-	0,27
$\Delta a$	мм	10

Подставим исходные данные в уравнение 2, получим:

$$x_{c,d(t_{SL})} = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{1 - \left( \frac{80}{1,3 \cdot 100} \right)^5}{1 - \left( \frac{65}{100} \right)^5} \right) \cdot 1,61 \cdot (1,25 \cdot 1,5 \cdot 4500 + 315,5) \cdot 8,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot \left( \frac{0,0767}{t_{SL}} \right)^{\frac{(0,1 \cdot 0,27)^{0,446}}{2}}}$$

В зависимости от времени (в данном случае  $t_{SL}$  от 1 до 50 лет), рассчитываем глубину карбонизации  $X_{c, \sigma}(t_{SL})$  и определяем необходимый номинальный защитный слой бетона по рисунку (2).

**Выводы.** Метод частного коэффициента включает в себя упрощенный полный вероятностный метод. Поэтому использование полного вероятностного метода может привести к более экономичным решениям, но он требует значительно больших затрат для определения исходных параметров и значительно больших затрат для самого расчета.

Метод частного коэффициента дает возможность рассчитать глубину карбонизации бетона железобетонных конструкций. Зная время эксплуатации конструкции, рассчитав глубину карбонизации, мы можем уже на стадии проектирования принять такую толщину защитного слоя железобетонной конструкции, которая будет предохранять арматуру от коррозии карбонизации.

Использование метода частного коэффициента дает возможность проверить заданную надежность для конструкций, не выдержавших соответствующие предельные состояния в течение проектного срока службы.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур, В.В. Многоуровневая система оценки надежности железобетонных конструкций эксплуатируемых и реконструируемых зданий и сооружений / В.В. Тур, Т.М. Пецольд, В.В. Малыха, Д.М. Марковский // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4(13). – С. 4–19.

2. Надежность строительных конструкций. Общие принципы.: СТБ ISO 2394 – 2007. – Введ. 29.12.2007. – Минск, 2007. – 69 с.
3. Eurocode 0. Basis of structural design: EN 1990:2001. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001.
4. DuraCrete - Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report No.: BE 95-1347, pp. 62-63, 2000.
5. Чернякевич, О.Ю., Леонович, С.Н. Долговечность железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации в бетоне без трещин / Проблемы современного бетона и железобетона // Сборник 2. Технология бетона. — Мн.: НП ООО «Стринко», 2007. — С. 316-326.
6. DARTS. Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling, European Commission // Growths -2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrDI-25633 - 2004.
7. Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Heft 433 der Schriftenreihe des DAfStb, Beuth Verlag, 1992, Dissertasion.
8. DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures: Data, European Commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
9. Ehrenberg, A.; Geiseler, J. Okologische Eigenschaften von Hochofenzement / Lebenswegphase Produktion: Energiebedarf, CO<sub>2</sub> - Emission und Treibhauseffekt.// In: Beton-Informationen 37 - 1997 - Nr. 4 - S. 51-63 (in German).

Материал поступил в редакцию 16.02.09

#### CHERNIAKEVICH O.Y., LEONOVICH S.N. Limit state equation of the reinforcement depassivation with quotient factors

The required thickness of the protective layer of a reinforced concrete construction is defined by the quotient factor method for carbonation corrosion in concrete without cracks which is based on the probabilistic method of carbonation corrosion.

УДК [69.008.6:692.426]:534.1

**Мигель А.В., Драган В.И.**

## СТРОИТЕЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО СООРУЖЕНИЯ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В Г. ВИТЕБСКЕ

**Введение.** Изменение собственной частоты колебания элемента конструкции, в зависимости от внутреннего осевого усилия, положено в основу проведения комплексных мероприятий по мониторингу технического состояния Летнего амфитеатра в г. Витебске, применительно к структурной системе УО БрГТУ. В ходе проведенного этапа мониторинга было проанализировано свыше 150 элементов нижней поясной сетки и раскосов в опорных частях сооружения.

Любая конструкция может быть представлена в виде системы пружин, масс и демпферов. Демпферы поглощают энергию, а массы и пружины - нет. Масса и пружина образуют систему, которая имеет резонанс на характерной для нее собственной частоте. Если подобной системе сообщить энергию (например, ударить по ней), то она начнет колебаться с собственной частотой, а амплитуда вибрации будет зависеть от мощности источника энергии и от поглощения этой энергии, т.е. демпфирования, присущего самой системе. Собственная частота идеальной системы масса-пружина без демпфирования дается соотношением:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где  $k$  - коэффициент упругости (жесткость) пружины;

$m$  - масса.

Для призматических тел конечной жесткости, к которым относят-

ся стержни строительной конструкции, собственная частота колебаний приводится соотношением:

$$\omega = \frac{i^2 \cdot \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot F}},$$

где  $l$  - длина элемента;

$EI$  - жесткость элемента;

$\rho$  - плотность материала элемента;

$F$  - площадь поперечного сечения;

$i=1, 2, 3, \dots$  - номер формы колебания.

Из зависимости видны следующие аналогии:  $EI$  - жесткость элемента, а  $\rho F$  - масса элемента на 1 м длины.

Отсюда следует, что с увеличением жесткости увеличивается и собственная частота, а с увеличением массы собственная частота падает. Если система обладает демпфированием, а это так для всех реальных физических систем, то собственная частота будет несколько ниже рассчитанного по приведенной выше формуле значения и будет зависеть от величины демпфирования.

Из теории колебаний [1] известно о взаимосвязи собственной частоты колебаний от приложенного продольного усилия (сжимающего или растягивающего). Эта зависимость имеет следующий вид:

- для растянутых элементов

**Мигель Александр Владимирович**, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

**Драган Вячеслав Игнатьевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.