

модели изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$ для различных условий эксплуатации.

Для возможности определения минимальных классов бетона по прочности в ЖБЭ и ЖБК, обеспечивающих их требуемую долговечность при эксплуатации в различных атмосферных условиях, исследовали совместно регрессионные зависимости изменения по сечению показателей щелочности поровой жидкости и степени карбонизации бетона для различных сроков и условий эксплуатации [1, 2].

В качестве граничных значений были приняты $pH = 11,8$ (значение щелочности, при котором, по термодинамическим исследованиям В. И. Бабушкина, бетон теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре) и $pH = 11,2$ (поскольку, в соответствии с авторскими исследованиями [1], при $pH \approx 11,0$ устойчиво наблюдается начало развития коррозии стальной арматуры в соответствующих условиях). Получили значения степеней карбонизации, соответственно $СК \approx 17$ и 27% .

Анализировали возраст бетона толщин защитного слоя 20 и 25 мм (для различных условий эксплуатации), при котором степень его карбонизации достигает граничных значений, и по результатам анализа определили минимальные классы бетона по прочности, которые возможно рекомендовать при проектировании ЖБЭ и ЖБК для различных условий эксплуатации с обеспечением межремонтного периода 25 и 50 лет без применения специальных мер по предотвращению коррозии стальной арматуры.

Результаты исследований приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Условия сельскохозяйственных помещений

Параметр	Степень карбонизации, %			
	17 (pH = 11,8)		27 (pH = 11,2)	
	Прогнозируемый возраст, лет			
Толщина защитного слоя, мм:	25	50	25	50
20	$>C^{30}/_{37}$	$>>C^{30}/_{37}$	$C^{18}/_{22,5}$	$C^{22}/_{27,5}$
25	$C^{25}/_{30}$	$C^{30}/_{37}$	$C^{16}/_{20}$	$C^{16}/_{20}$

Таблица 2 – Условия открытой атмосферы

Параметр	Степень карбонизации, %			
	17 (pH = 11,8)		27 (pH = 11,2)	
	Прогнозируемый возраст, лет			
Толщина защитного слоя, мм:	25	50	25	50
20	$C^{30}/_{37}$	$>C^{30}/_{37}$	$C^{16}/_{20}$	$C^{20}/_{25}$
25	$C^{20}/_{25}$	$C^{28}/_{35}$	$C^{12}/_{15}$	$C^{16}/_{20}$

Таблица 3 – Условия общественных помещений и промышленных зданий с неагрессивной средой

Параметр	Степень карбонизации, %			
	17 (pH = 11,8)		27 (pH = 11,2)	
	Прогнозируемый возраст, лет			
Толщина защитного слоя, мм:	25	50	25	50
20	$C^{30}/_{37}$	$>C^{30}/_{37}$	$C^{16}/_{20}$	$C^{18}/_{22,5}$
25	$C^{22}/_{27,5}$	$C^{25}/_{30}$	$C^{12}/_{15}$	$C^{16}/_{20}$

Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СЭНДВИЧ-ОБОЛОЧКИ ПРИ ЕЕ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ СЛОЕВ

С. А. ВОРОБЬЕВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Представлена постановка задачи о динамическом нагружении круговой цилиндрической оболочки, выполненной из изотропных материалов в виде трехслойного пакета. Пакет несимметричен

по высоте относительно срединной поверхности жесткого несжимаемого в поперечном направлении заполнителя. На первом этапе постановки задачи материалы слоев считаются линейно упругими. Применив вариационный принцип Гамильтона – Остроградского, используя кинематические гипотезы С. П. Тимошенко для каждого слоя и условия непрерывности перемещений на границах контакта слоев, получены уравнения движения оболочки в перемещениях для малых деформаций.

Демпфирующие свойства материалов слоев трехслойной оболочки учитываются на основе концепции комплексного модуля упругости $E_k^* = E_k(a_k + ib_k)$, $G_k^* = G_k(a_k + ib_k)$, где E_k , G_k – модули упругости материала, $a_k = (4 - \gamma_k^2)/(4 + \gamma_k^2)$, $b_k = 4\gamma_k^2/(4 + \gamma_k^2)$, γ_k – коэффициент внутреннего трения материала k -го слоя ($k = 1, 2, 3$), i – мнимая единица. Уравнения движения оболочки в этом случае получаются заменой в уравнениях идеально упругой конструкции модулей упругости E_k , G_k на соответствующие операторы E_k^* , G_k^* :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [\tilde{L}]\{U\} = \{F\},$$

где $[M]$ – матрица масс; $\{U\}^T = \{u, v, w, \psi_1^{(k)}, \psi_2^{(k)}\}$ – искомая вектор-функция перемещений; $u(x_1, x_2, t)$, $v(x_1, x_2, t)$ – тангенциальные перемещения точек срединной поверхности заполнителя в направлении координатных осей (линий главных кривизн оболочки) x_1 и x_2 соответственно; $w(x_1, x_2, t)$ – прогиб; $\psi_1^{(k)}(x_1, x_2, t)$ и $\psi_2^{(k)}(x_1, x_2, t)$ – полные углы поворота прямолинейного элемента k -го слоя в координатных плоскостях x_1Oz и x_2Oz ; $[\tilde{L}] = [\tilde{l}_{ij}]$ ($i, j = 1, \dots, 9$) – матрица, элементами которой являются линейные дифференциальные операторы по переменным x_1 и x_2 с постоянными комплексными коэффициентами; $\{F\}$ – вектор нагрузок.

Рассмотрены следующие модельные задачи: воздействие ударного импульса: $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(t)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$; воздействие сосредоточенной силы $F_0 \exp(-i\varphi t^2/2)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$ на верхний несущий слой оболочки; стационарные вынужденные колебания оболочки от вибрационной нагрузки $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})e^{i\varphi t}$. Здесь F_0 – амплитуда возмущающей силы, φ – скорость изменения частоты, $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, x_{1p} и x_{2p} – координаты точки воздействия нагрузки. Решение сформулированных начально-краевых задач построено на основе методов Фурье и преобразования Лапласа по времени. Стационарные вынужденные колебания исследовались на основе метода комплексных амплитуд. Специальный выбор координатных функций у компонентов вектора перемещений $\{U\}$ в следующем виде:

$$u = \sum_{m,n} \tilde{U}_{mn}(t) \cos(m\varphi) \sin(\tilde{n}x), \quad v = \sum_{m,n} \tilde{V}_{mn}(t) \sin(m\varphi) \cos(\tilde{n}x),$$

$$w = \sum_{m,n} \tilde{W}_{mn}(t) \sin(m\varphi) \sin(\tilde{n}x), \quad \psi_1^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{1mn}^{(k)}(t) \cos(m\varphi) \sin(\tilde{n}x),$$

$$\psi_2^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{2mn}^{(k)}(t) \sin(m\varphi) \cos(\tilde{n}x), \quad \tilde{n} = n\pi/L \quad (k = 1, 2, 3)$$

обеспечивает автоматическое удовлетворение однородных граничных условий свободного опирания кромок на жесткие неподвижные опоры, которые можно представить в перемещениях: $u_1 = v_2 = w = \psi_1^{(k)}|_{x_1=0} = \psi_2^{(k)}|_{x_2=0} = 0 \quad (k = 1, 2, 3)$.

УДК 666.972

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЕ ЦЕМЕНТА

С. В. ГУЩИН, А. А. ДРОЗД, В. В. БАБИЦКИЙ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Современная практика строительства предполагает широкое использование разнообразных химических добавок в бетоне (пластификаторы, ускорители твердения и пр.), способных кардинально