бетона, а также электрокоррозионную стойкость бетона оптимального состава.

Разработаны комплексные способы защиты от электрокоррозии бетонных, железобетонных и каменных конструкций, в т. ч.: с помощью металлоинъекционной рубашки с поляризованным заземлением; с помощью сталебетонной обоймы, погруженной в дно водотока на глубину, при которой плотность тока, стекающего через нее в грунт, намного менее опасной величины 0,6 мА/дм^2; с помощью железобетонной рубашки из бетона оптимального состава. Комплексные способы защиты от электрокоррозии внедрены при капитальном ремонте сооружений Южной железной дороги.

УДК 624.046.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

С. А. САЗОН

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Республика Беларусь

Безопасность – это вероятность того, что в любой произвольный момент времени в течение срока эксплуатации состояния конструкции принадлежат к системе допустимых состояний. Исходя из этого и строится концепция надежности [2].

Вероятностная трактовка понятий надежности строительных конструкций является в настоящее время общепризнанной, однако на объяснение некоторых аспектов использования вероятностных моделей обращается недостаточное внимание, что затрудняет их осознанное использование в практике инженерных расчетов [1].

Система качества изделий из сборного железобетона, которые производятся на заводах, применяемая на предприятиях стройиндустрии и установленная в соответствии с ГОСТ 13015, предполагает контроль единичных показателей качества без увязки с принятой концепцией надежности при проектировании. Необходимость выполнения сертификационных испытаний, установленная рядом нормативно-правовых актов, предполагает испытание изделий нагружением. Такой подход, с одной стороны, не позволяет достаточно обоснованно характеризовать генеральную совокупность производимых изделий по результатам испытаний единичных образцов, а с другой стороны, является экономически затратным. Это утверждение вытекает из того, что контрольные коэффициенты, используемые для анализа результатов статических испытаний, назначены без учета изменчивости основных переменных (характеристики свойств материалов, геометрических размеров конструкции), свойственных для одного производства. Это приводит к тому, что при трактовке результатов могут быть не выявлены дефекты конструкции, сделаны ошибочные выводы или, наоборот, не выявлены избыточные запасы прочности.

Вероятностный подход обусловлен тем, что прочностные, деформационные характеристики конструкций, а также все воздействия на них представляют собой случайные величины или случайные процессы.

Вероятностные методы можно использовать при условии, что определены все базисные переменные (F_{sd} – нормально распределенные переменные для предела текучести арматуры; F_{cd} – нормально распределенные переменные для прочности бетона; H_d – нормально распределенные переменные для рабочей высоты сечения).

Тем не менее, на сегодняшний день вероятностные методы расчета надежности первого и второго уровня используются именно для установления так называемых частных коэффициентов безопасности, которые используются в детерминистических методах.

Если оценивать текущее состояние, то представляется целесообразным оперировать некоторой функцией состояния. Это функция ряда базисных переменных, которая определяет наступление или ненаступление того неблагоприятного состояния, которое мы ожидаем. Интегрируя эту функцию, мы определяем вероятность отказа для заданных значений базисных переменных. Тем не менее, это метод, который базируется на вероятностных статистических оценках.

Функция прочности конструкции в общем виде представляется, как

$$R = g(f_s, f_c, h) = f_s A_s h\left(1 - k_2 \frac{f_s A_s}{\omega_c \alpha f_c b h}\right), \tag{1}$$

где f_s – предел текучести арматуры; f_c – прочность бетона; h – высота сечения образца;

При условии, что несущая способность конструкции имеет нормальное распределение, нижняя квантиль при заданном уровне надежности рассчитывается по зависимости

*Работа выполняется под руководством Тура В. В., д. т. н., профессора БрГТУ

$$R_\beta = \mu_R - \beta_R \sigma_R, \tag{2}$$

где μ_R – математическое ожидание R; σ_R – стандартное отклонение R; $\beta_R = \beta\alpha_R$ (β – целевой индекс надежности для конструкции, α_R – весовой коэффициент для сопротивления, который принимается согласно ISO 2394 [ ] $\alpha_R = 0.8$).

Для того чтобы приблизительно оценить величины μ_R и σ_R, часто линейно аппроксимируют функцию (1) при помощи разложения функции $g(f_s, f_c, h)$ в ряд Тейлора. В результате первый и второй моменты распределения величины R рассчитываются по следующим зависимостям, приведенным в [4]:

$$\mu_R \approx g(\mu_x), \tag{3}$$

$$\sigma_R^2 \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \Bigg|_{X=\mu_X} \sigma_{X_i}^2 . \tag{4}$$

Таким способом линеаризованная функция записывается в общем виде:

$$R \cong g(\mu_X) + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial g}{\partial X_i} \Bigg|_{X=\mu_X} (X_i - \mu_{Xi}) . \tag{5}$$

В результате получаем развернутую запись формулы (2):

$$R_\beta = g(\mu_X) - \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \Bigg|_{X=\mu_X} \sigma_{X_i}^2 \right)^{1/2} , \tag{6}$$

при этом для случая трёх переменных можно записать это выражение так:

$$R_\beta(f_s, f_c, h) = d_1 f_s + d_2 f_c + d_3 h - \beta_R \cdot \sqrt{d_1^2 \sigma_{fs}^2 + d_2^2 \sigma_{fc}^2 + d_3^2 \sigma_h^2} , \tag{7}$$

где $d_1 = \frac{\partial g}{\partial f_s}\Big|_{X=\mu_X}$, $d_2 = \frac{\partial g}{\partial f_c}\Big|_{X=\mu_X}$, $d_3 = \frac{\partial g}{\partial h}\Big|_{X=\mu_X}$ – значения частных производных функции $g(f_s, f_c, h)$ при средних значениях всех переменных.

Контролировать в процессе производства единичные показатели качества следует таким образом, чтобы расчетное значение несущей способности R_β по (7) при фактических статистических параметрах было не ниже расчетного значения R_β при статистических параметрах переменных, **заложенных при проектировании**, т. е. должно выполняться условие

$$R(F_{sd}, F_{cd}, H_d) \le R(F_{sa}, F_{ca}, H_a), \tag{8}$$

где F_{sd}, F_{sa} – нормально распределенные переменные для предела текучести арматуры с соответственно проектными и фактическими (актуальными) параметрами: среднее значение f_{sd}, f_{sa}, стандартное отклонение σ_{fsd}, σ_{fsa}; F_{cd}, F_{ca} – нормально распределенные переменные для прочности бетона с соответственно проектными и фактическими (актуальными) параметрами: среднее значение f_{cd}, f_{ca}, стандартное отклонение σ_{fcd}, σ_{fca}; H_d, H_a – нормально распределенные переменные для рабочей высоты сечения с соответственно проектными и фактическими (актуальными) параметрами: среднее значение f_{cd}, f_{ca}, стандартное отклонение σ_{fcd}, σ_{fca}.

В развернутой форме неравенство (8) представляется так:

$$\begin{aligned} & d_1 f_{sd} + d_2 f_{cd} + d_3 h_d - \beta_R \sqrt{d_1^2 \sigma_{fsd}^2 + d_2^2 \sigma_{fcd}^2 + d_3^2 \sigma_{hd}^2} \le \\ & \le d_1 f_{sa} + d_2 f_{ca} + d_3 h_a - \beta_R \sqrt{d_1^2 \sigma_{fsa}^2 + d_2^2 \sigma_{fca}^2 + d_3^2 \sigma_{ha}^2} . \end{aligned} \tag{9}$$

Приведенное неравенство является исходным в задачах нормирования отклонений базисных переменных. Для контроля абсолютного значения параметра, например f_{ca}, применяется зависимость вида

$$\begin{aligned} & f_{ca} \ge \frac{d_1}{d_2}(f_{sd} - f_{sa}) + f_{cd} + \frac{d_3}{d_2}(h_d - h_a) + \\ & + \frac{\beta_R}{d_2}\left(\sqrt{d_1^2 \sigma_{fsa}^2 + d_2^2 \sigma_{fca}^2 + d_3^2 \sigma_{ha}^2} - \sqrt{d_1^2 \sigma_{fsd}^2 + d_2^2 \sigma_{fcd}^2 + d_3^2 \sigma_{hd}^2} \right). \end{aligned} \tag{10}$$

При использовании выражения (9) можно контролировать также и относительное значение любой из переменных, входящих в расчетную модель предельного усилия по (1). Например, введя обозначение $k_c = f_{ca} / f_{cd}$, приходим к зависимости вида

$$k_c \geq 1 + \frac{d_1}{d_2}\frac{f_{sd}}{f_{cd}}(1-k_s) + \frac{d_3}{d_2}\frac{h_d}{f_{cd}}(1-k_h) +$$
$$+\beta_R \left(\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\frac{f_{sd}}{f_{cd}}\right)^2 V_{fsa}^2 \cdot k_s^2 + V_{fca}^2 \cdot k_c^2 + \left(\frac{d_3}{d_2}\frac{h_d}{f_{cd}}\right)^2 V_{ha}^2 \cdot k_h^2} - \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\frac{f_{sd}}{f_{cd}}\right)^2 V_{fsd}^2 + V_{fcd}^2 + \left(\frac{d_3}{d_2}\frac{h_d}{f_{cd}}\right)^2 V_{hd}^2} \right). \qquad (11)\ [3]$$

В рамках работы предполагается разработать метод статистических оценок, базирующийся на фактической изменчивости единичных показателей качества для отдельно взятого предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Перельмутер, А. В.** Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А. В. Перельмутер. – М.: Изд-во строительных вузов, 2007. – 256 с.

2 **Шпете, Г.** Надежность несущих строительных конструкций/ пер. с нем. О. О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.: с ил.

3 **Тур, В. В.** О сертификационных испытаниях изделий из сборного железобетона / В. В. Тур, Д. М. Марковский // Республиканская строительная газета. – 2007. – № 34 (247)14 сентября. – С. 4.

4 **Сидоренко, М. В.** Комплексный контроль несущей способности конструкций по единичным показателям качества / М. В. Сидоренко. – К.,1990. – С. 37–42.

УДК 624.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ХЛОРА, МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А. В. СТЕПАНОВА, В. В. ТАЛЕЦКИЙ, Д. Н. ШЕВЧЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Одной из распространенных моделей предельного состояния железобетонных конструкций (ввиду инициирования коррозии арматуры из-за воздействия хлора) является DuraCrete-модель. Она позволяет учитывать толщину защитного слоя бетона, коэффициент диффузии хлора, критическую концентрацию и поверхностное содержание хлора, время воздействия. Каждый из воздействующих факторов может быть еще более детализирован (например, коэффициент диффузии хлора в каждый момент времени определяется условиями изготовления, условиями окружающей среды, начальным коэффициентом диффузии хлора, временем измерения начального коэффициента диффузии, возрастом бетона).

Многие учитываемые факторы DuraCrete-модели являются стохастическими: в простейшем стационарном случае – случайными величинами с заданными законами распределения. При этом аналитическое решение прямой задачи определения вероятности ресурсного отказа и обратной задачи определения гамма-процентного ресурса железобетонных конструкций затруднено тем, что законы распределения воздействующих факторов подчиняются произвольным распределениям, а функции их влияния, как правило, нелинейные. Возможным способом решения поставленных задач является метод Монте-Карло. Основной проблемой этого метода является компьютерная реализация. Целью данного исследования является разработка специализированных программных средств автоматизации моделирования.

Предлагается программный комплекс «NeoMetro», который состоит из трех модулей. Первый отвечает за генерацию случайных величин. В нем реализованы подпрограммы генерации базовой случайной величины (подчиняющейся равномерному закону распределения на отрезке [0; 1]), а также подпрограммы моделирования основных типовых распределений случайных величин (нормального, бета, гамма, Вейбулла, треугольного, трапецеидального, Лапласа, арксинуса, Пуассона и др.), а также произвольного распределения, заданного гистограммой. В качестве алгоритмов генерации базовой случайной величины предлагается использовать линейный конгруэнтный метод, реализованный в системе программирования Delphi, а также «вихрь Мерсенна», имеющий лучшие статистические свойства (в сравнении с конгруэнтным методом) по критериям совпадения моментов и независимости элементов генерируемой числовой последовательности. Второй модуль – вычислительный – отвечает за функциональные преобразования с множеством влияющих случайных величин. Поскольку исследуемые модели могут включать сколь угодно сложные и разнообразные математические преобразования, то в качестве вычислительного модуля было решено использовать ядро символьных вычис-