

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 624.01

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ХЛОРА**

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

Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь

**Постановка задачи**

Одной из распространенных моделей предельного состояния железобетонных конструкций (ввиду инициирования коррозии арматуры из-за воздействия хлора) является DuraCrete-модель [1]

$$C_X = C_{SN} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right), \quad (1)$$

Она позволяет учитывать толщину защитного слоя бетона  $x$ , коэффициент диффузии хлора  $D_a(t)$ , критическую концентрацию и поверхностное содержание хлора  $C_{SN}$ , время воздействия  $t$ . Каждый из воздействующих факторов может быть еще более детализирован. Например, коэффициент диффузии хлора  $D_a(t)$  в каждый момент времени определяется условиями изготовления, условиями окружающей среды, начальным коэффициентом диффузии хлора, временем измерения начального коэффициента диффузии, возрастом бетона:

$$D_a t = D_a t_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^n = k_e k_i k_t D_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^n, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент, учитывающий влияние изготовления (параметр материала);  $k_e$  – коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды (параметр внешней среды);  $k_t$  – коэффициент, учитывающий влияние метода испытаний (параметр метода испытаний);  $D_0$  – начальный коэффициент диффузии хлора, определенный при стандартных условиях, стандартным методом (параметр материала),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $t_0$  – эталонное время, при котором измерен  $D_0$ , с;  $n$  – фактор возраста (параметр внешней среды и материала).

По критерию проникновения хлоридов к арматуре вероятность ресурсного отказа железобетонных конструкций определяется вероятностью того, что на глубине залегания арматуры  $x$  фактическая концентрация хлоридов  $C_X$  превысит критическую  $C_{\text{крит}}$ :

$$P_{\text{отказа}} = P(C_X < C_{\text{крит}}), \quad (3)$$

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 большим количеством учитываемых факторов (всего 17 факторов). Законы распределения воздействующих факторов подчиняются произвольным распределениям, а функции их влияния, как правило, нелинейные. Возможным способом решения поставленных задач является имитационное моделирование и метод Монте-Карло [2]. Основной проблемой этого метода является сложность компьютерной реализации. Целью данной работы является разработка специализированных программных средств автоматизации имитационного моделирования.

### **Средства автоматизации моделирования**

В работе предлагается программный комплекс автоматизации имитационного моделирования «СМ-ДЭС» [3], в котором для решения поставленных задач задействованы следующие три модуля. Первый модуль 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, трапецидального, Лапласа, арксинуса, Пуассона и др.) и произвольного распределения, заданного гистограммой (рисунок 1).

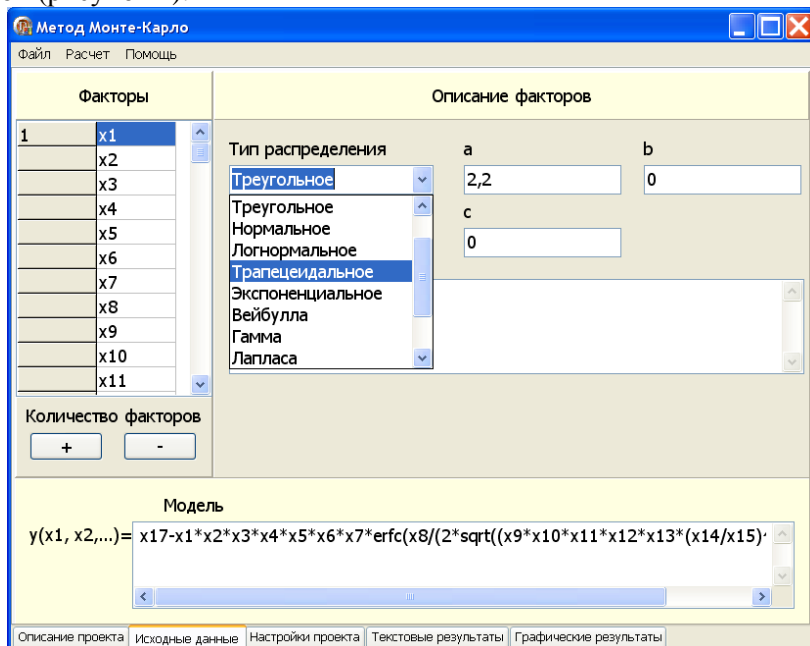


Рисунок 1. Основная форма программы «Монте-Карло» пакета СМ-ДЭС с указанием моделируемых распределений случайных величин

В качестве алгоритмов генерации базовой случайной величины предлагается использовать линейный конгруэнтный метод, реализованный в системе программирования Delphi, а также алгоритмы «Marsaglia Multicarry», «Xorshift» и «вихрь Мерсенна», имеющие лучшие статистические свойства по критериям совпадения моментов и независимости элементов генерируемой числовой последовательности в сравнении с конгруэнтным методом (рисунок 2).

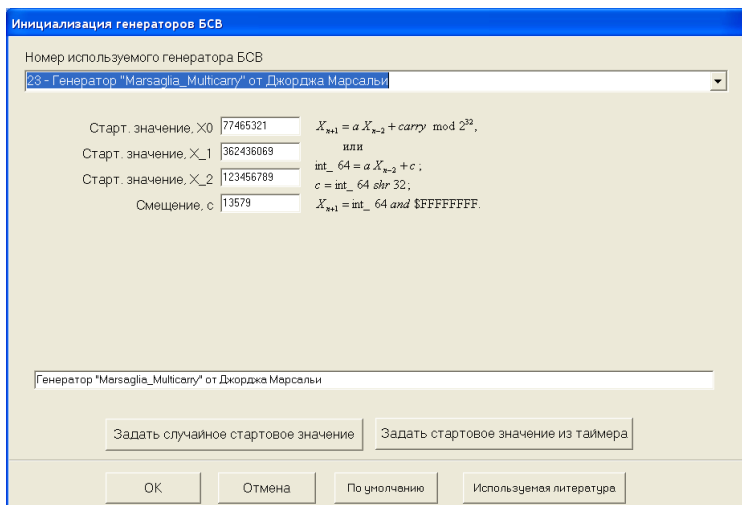


Рисунок 2. Настройки генераторов базовой случайной величины

Второй модуль пакета СМ-ДЭС – 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 вычислений пакета компьютерной математики Maple. Для взаимодействия программы «СМ-ДЭС», написанной в среде программирования Delphi, с ядром Maple используется стандартная технология OpenMaple и дополнительная библиотека преобразования типов данных.

Третий модуль пакета СМ-ДЭС занимается анализом результатов статистических испытаний – оценкой основных числовых характеристик, в том числе квантилей распределения случайных величин и вероятностей событий.

Первоначально программа СМ-ДЭС формирует текстовую строку, соответствующую исследуемой модели – математическую функцию  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  множества аргументов, записанную на языке Maple. Для получения очередной реализации метода Монте-Карло разыгрывается случайный вектор  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Его значения передаются в ядро Maple с запросом на вычисление вещественной

функции  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Процедура повторяется указанное число раз с последующим статистическим анализом результатов.

### Результаты вычислений

Для значений влияющих факторов, характерных для эксплуатации железобетонных балок путепроводов в Республике Беларусь, в пакете СМ-ДЭС была построена модель проникновения хлоридов

$$R = C_{\text{ед}} - C_X. \quad (4)$$

и определены значения вероятностей ресурсного отказа в течение различного срока эксплуатации для различных значений толщины защитного слоя бетона (рисунок 4). При этом состоянию ресурсного отказа соответствуют отрицательные значения  $R$  в выражении (3), т.е. когда фактическая концентрация хлоридов  $C_X$  на глубине  $x$  превышает критическую концентрацию  $C_{\text{крит}}$ .

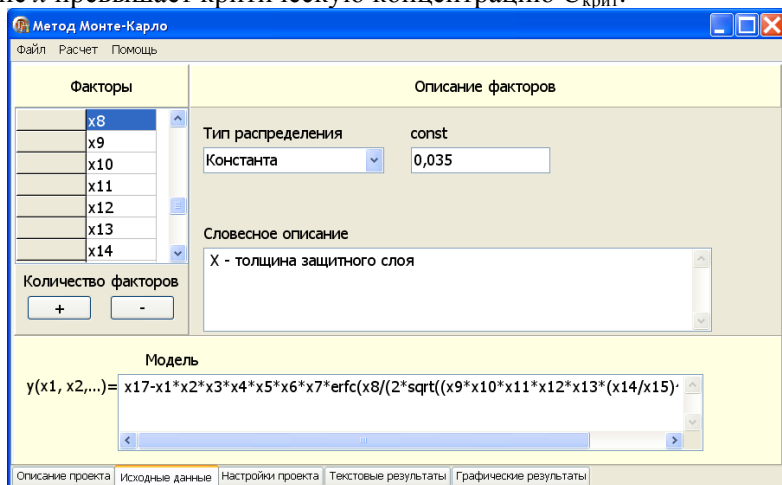


Рисунок 3. Задание исходной модели в СМ-ДЭС

Результаты вычисления вероятности ресурсного отказа в течение  $t = 1$  года для толщины защитного слоя бетона  $X = 0,035$  м представлены на рисунках 4 и 5. Ни одна из 100 тыс. реализаций величины  $R$  не приняла отрицательного значения, следовательно, оценка вероятности ресурсного отказа равна 0.

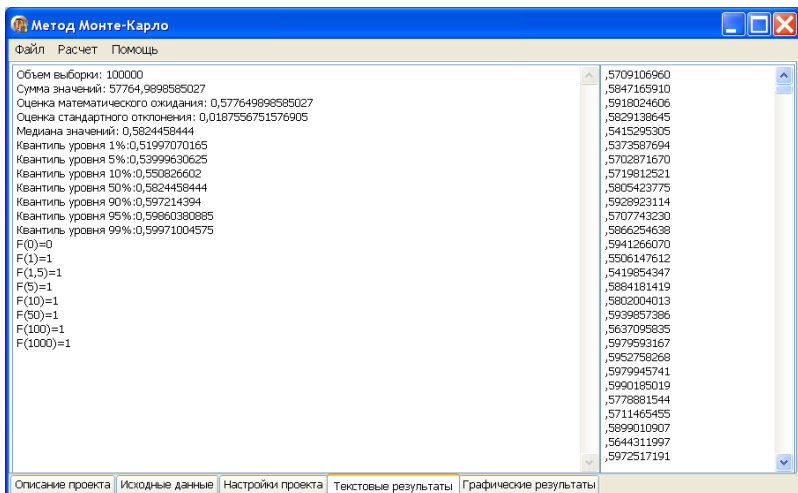


Рисунок 4. Результаты моделирования в СМ-ДЭС ( $t = 1$  год,  $X = 0,035$  м)

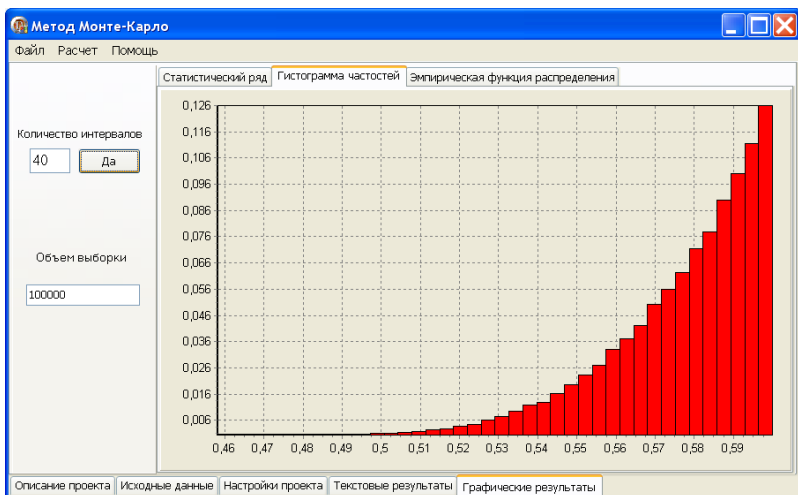


Рисунок 5. Гистограмма значений разности критической и фактической концентрации хлоридов ( $t = 1$  год,  $X = 0,035$  м)

При этом оценка вероятности ресурсного отказа в течение 10 лет составила 0,00121 (рисунки 6 и 7), а в течение 20 лет – 0,0678 (рисунки 8 и 9).

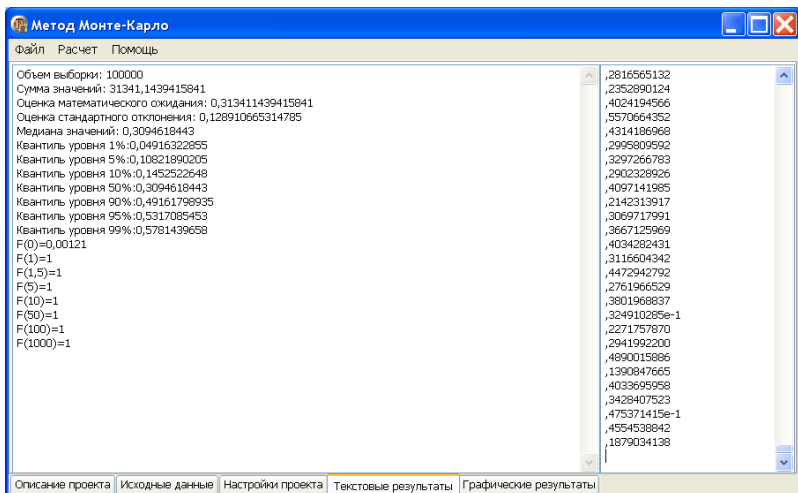


Рисунок 6. Результаты моделирования в СМ-ДЭС ( $t = 10$  лет,  $X = 0,035$  м)

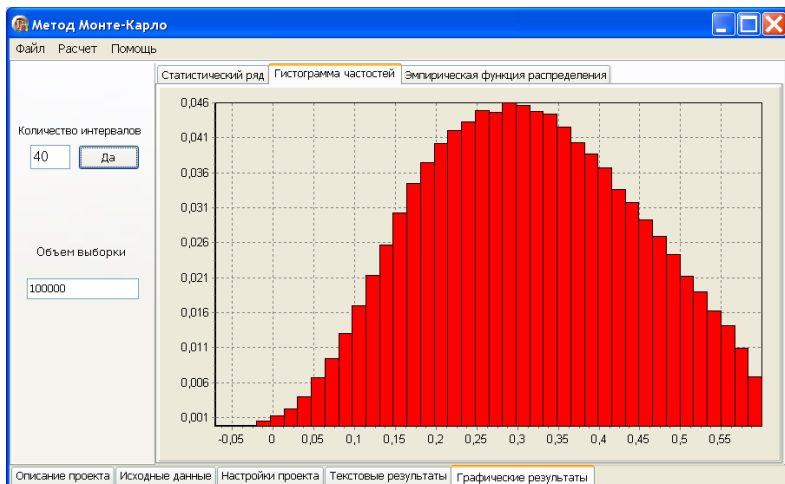


Рисунок 7. Гистограмма значений разности критической и фактической концентрации хлоридов ( $t = 10$  лет,  $X = 0,035$  м)

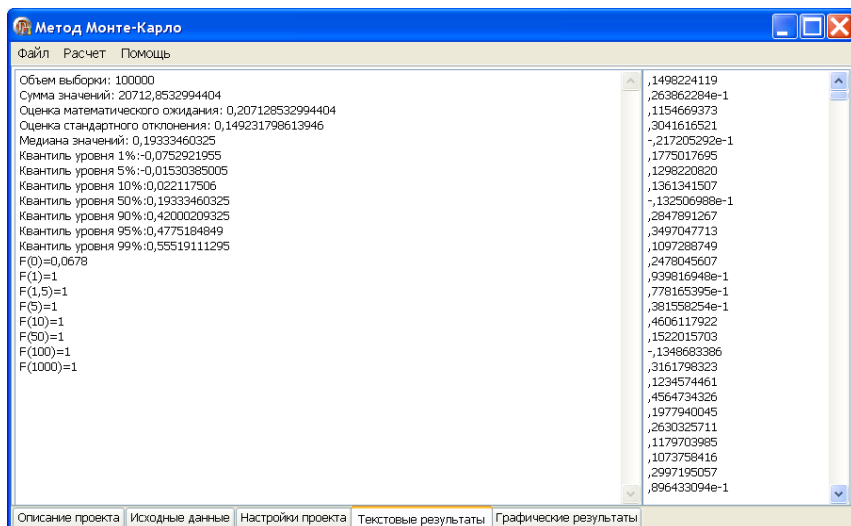


Рисунок 8. Результаты моделирования в СМ-ДЭС ( $t = 20$  лет,  $X = 0,035$  м)

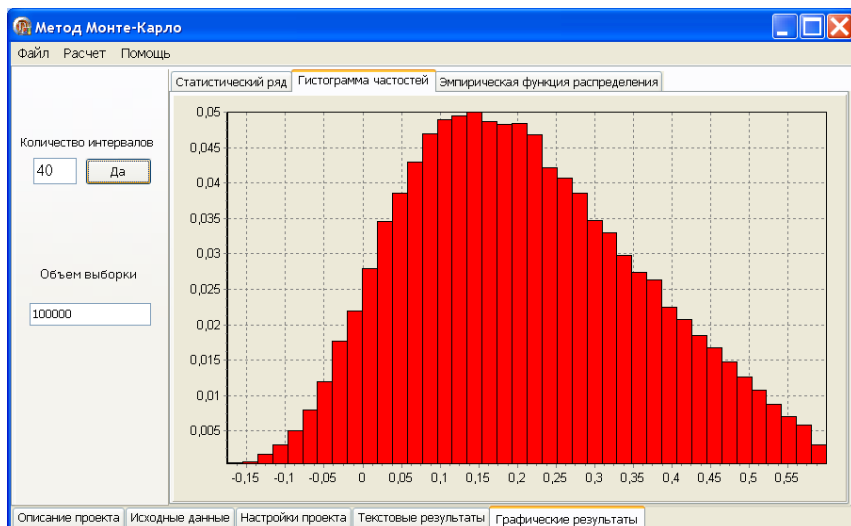


Рисунок 9. Гистограмма значений разности критической и фактической концентрации хлоридов ( $t = 20$  лет,  $X = 0,035$  м)



При уменьшении толщины защитного слоя бетона до  $X=0,02$  м оценки вероятностей ресурсного отказа в течение 1, 10 и 20 лет составляют соответственно 0; 0,29952 и 0,58863.

### **Заключение**

Подобным образом с помощью имитационного моделирования в пакете СМ-ДЭС может быть оценена вероятность ресурсного отказа по критерию проникновения хлоридов к арматуре различных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды. При этом может быть решена и обратная задача определения гамма-процентного ресурса – ресурса конструкций, обеспечиваемого с заданной вероятностью  $\gamma$ .

Предлагаемый программный комплекс успешно решает поставленные задачи, позволяет уточнять и еще более детализировать влияние на ресурс железобетонных конструкций различных факторов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. DuraCrete (2000b), Statistical quantification of the Variables in the Limit State Functions, Document BE95-1347/R9, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 2000.
2. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
3. Максимей, И.В. Имитационное моделирование случайных процессов в СМ-ДЭС / И.В. Максимей, Д.Н. Шевченко // Математические машины и системы, № 3, 2010. – С. 141-152.