

УДК 624.012.36:311.214

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.О. Глухов¹, Т.М. Глухова²

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь
e-mail: d.gluhov@pso.by¹, t.gluhova@psu.by²

Показано влияние нелинейных моделей строительных элементов и конструкций на форму вероятностных распределений, описывающих сопротивление конструкции и воздействие. Показано, что расчетные сочетания усилий как случайная величина, в силу процессов перераспределения усилий, связанных с трещинообразованием, представляет собой смесь несимметричных деформированных вероятностных распределений, что не допускает применение упрощенных методов оценки надежности. Предложен алгоритм оценки надежности строительных конструкций с применением нелинейных моделей, основанный на методе Монте-Карло с оптимизацией.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, нелинейные модели, надежность, вероятностные модели, статистическое моделирование.

METHODS AND ALGORITHMS FOR PROBABILISTIC ASSESSMENT OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

D. Glukhov¹, T. Glukhova²

Polotsk State University, Republic of Belarus
e-mail: d.gluhov@pso.by¹, t.gluhova@psu.by²

This paper shows the effect of the use of nonlinear models of building elements and structures on the shape of probability distributions describing the structural resistance and loads. It is shown that the calculated combinations of forces as a random variable, due to the processes of redistribution of forces associated with cracking, is a mixture of asymmetric deformed probability distributions, which does not allow the use of simplified methods for assessing reliability. We have proposed an algorithm for assessing the reliability of building structures using non-linear models based on the Monte-Carlo method with optimization.

Keywords: reinforced concrete structures, nonlinear models, reliability, probabilistic models, statistical modeling.

В Полоцком государственном университете проделана большая работа в области нелинейного моделирования строительных конструкций и отдельных элементов конструкций. В рамках научной школы д.т.н., профессора Лазовского Д.Н. в работах ряда авторов (Глухов Д.О., Лазовский Е.Д., Глухова Т.М.) получен важный фундаментальный результат, а именно, выполнен переход к интегральной форме записи систем уравне-

ний равновесия, описывающих напряженно-деформированное состояния сечений нормальных и наклонных к продольной оси железобетонного элемента (1). Данный переход позволил взглянуть на задачу расчета напряженно-деформированного состояния шире и применить высокоточные немультпликативные квадратурные правила.

$$\begin{cases} M_y = -\iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_o) dx dy + N(y_{oe} - y_o) \\ M_x = -\iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_o) dx dy + N(x_{oe} - x_o) \\ N = \iint_C \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy \\ V = \iint_C \tau_t dx dy \end{cases} \quad (1)$$

Разработаны методы и алгоритмы расчета железобетонных элементов на совместное действие изгибающих моментов, продольной и перерезывающей силы для сечений произвольной геометрии.

Лешкевичем О.Н., Глуховым Д.О., Глуховой Т.М. разработан алгоритм расчета методом конечных элементов пространственных строительных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности.

В силу высокой сложности построения комплексной модели, описывающей нелинейные свойства составного конструктивного элемента строительной конструкции, как конечно-элементной 3-х мерной объемной модели в пространстве полного 6-мерного тензора деформаций и соответствующего тензора напряжений, а также с учетом математической модели сцепления арматуры с бетоном, выделяют отдельные нелинейные модели, описывающие нелинейное поведение конструкции в наиболее опасных (подверженных разрушению) участках конструкции (рисунок 1).

Системы нелинейных сингулярных уравнений являются основой целого ряда математических моделей. В частности, такие системы возникают при попытке описать напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов, работающих под нагрузкой при внецентренном сжатии и изгибе, при работе таких элементы в предпорной зоне на срез с изгибом. Сингулярные свойства таких моделей связаны с тем, что те либо иные параметры, зависимости, описывающие свойства модели, имеют точки разрыва первого и второго рода. Такие точки разрыва фактически разделяют всю область определения входных параметров на подобласти непрерывного поведения. Для затронутого примера, такие точки разрыва позволяют описать скачкообразное изменение напряжения в бетоне в момент трещинообразования.

Опыт нескольких лет изучения подобного рода математических моделей с целью разработки эффективных алгоритмов решения сингулярных систем нелинейных уравнений показал, что наиболее верным подходом является детальное изучение всех особенностей многомерной поверхности решения и применение различных стратегий поиска решения на поверхности решений в зависимости от области непрерывного поведения системы, в которой находятся значения входных параметров.

Апробация разработанных нелинейных моделей была проведена в рамках 7 диссертационных исследований: Лазовский Д.Н., Лешкевич О.Н., Жукьян А.П., Салех Али Хомуд, Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д., Лазовский А.Д.

Таким образом, в Полоцком государственном университете имеются достаточные компетенции для численного моделирования большинства наиболее опасных расчетных ситуаций и участков конструкции.

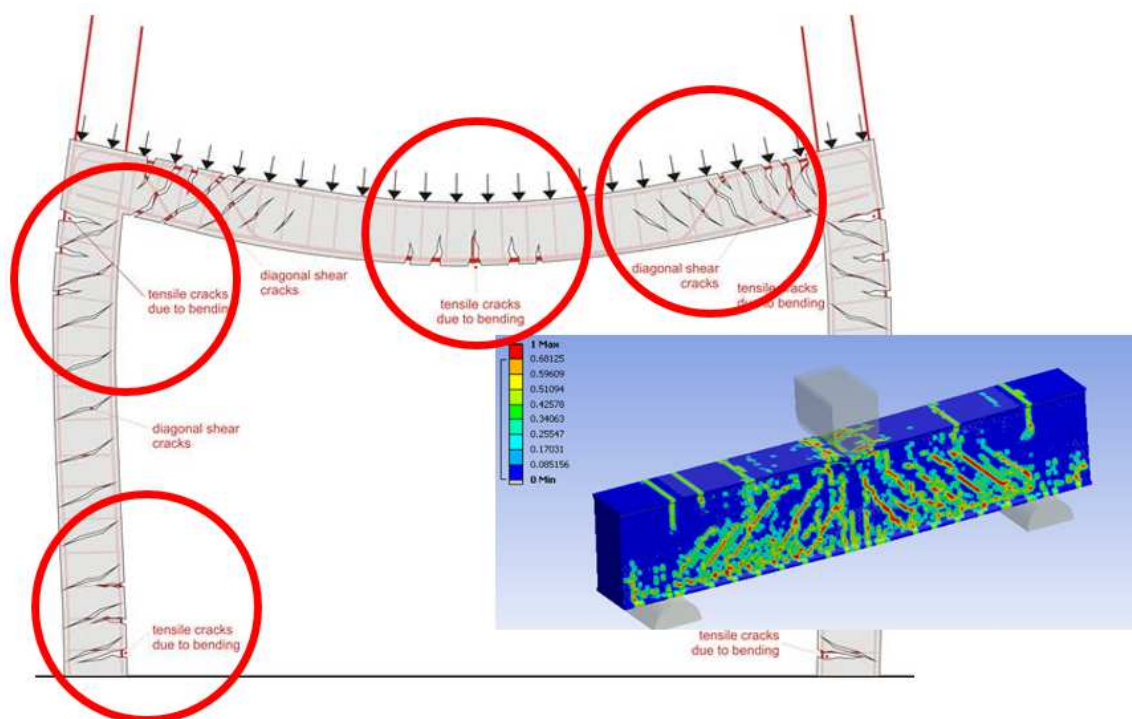


Рисунок 1. – Наиболее опасные расчетные ситуации

Данный теоретический задел позволил создать программное обеспечение для инженерных расчетов по нелинейным моделям как для отдельных железобетонных элементов, так и для строительных конструкций в целом и поставить вопрос о возможности оценки надежности проектируемых или находящихся на стадии оценки технического состояния строительных конструкций.

В Республике Беларусь усилиями целого ряда ученых (Т.М. Пецольд, В.В. Тур, А.А. Кондратчик, В.В. Надольский, В.Г. Казачек Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов и др.) ведется разработка единого методологического подхода к оценке надежности проектируемых и существующих строительных конструкций. Новая концепция надежности, определенная в утвержденном постановлении Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь 29.12.2007 № 67 и введенном в действие с 1 июля 2008 года СТБ ISO 2394-2007 "Надежность строительных конструкций. Общие принципы" четко определяет область применения вероятностных методов расчета индекса надежности.

Европейские нормы ТКП EN 1990 также предлагают систему параметров и соответствующих им законов распределения для имитационного моделирования поведе-

ния железобетонной конструкции, выстроенную по результатам многолетних исследований, с целью определения вероятности разрушения конструкции в целом или отдельно взятого конструктивного элемента.

Для выполнения вероятностных расчетов на стадии проектирования требуется по известным вероятностным моделям, лежащим в основе формирования проектных классов прочности, восстановить параметры теоретических распределений, провести статистическое моделирование методом Монте-Карло, и дать аналитические оценки взаимного влияния независимых случайных величин на распределение результирующей величины. Для обследуемых конструкций идентификация параметров теоретических распределений осуществляется по результатам детального обследования.

Поскольку, говоря о надежности, мы говорим о вероятностях порядка $1e-6$, лежащей в области хвостов распределений, то качеству идентификации уделяется особое значение. Качество оценивается по значению критериев согласия (Пирсона, Колмогорова, Крамера-Мизеса-Смирнова, Купера и др.).

Определение точного значения данного интеграла является в большинстве случаев невыполнимой задачей, поэтому для моделей, допускающих дифференцируемость, применяются упрощенные методы оценки значения интеграла, которые носят название FORM (First Order Reliability Method) и SORM (Second Order Reliability Method). [1] Или метод Монте-Карло. Однако, учитывая порядок малости искомой вероятности, моделирование методом Монте-Карло требует большого объема вычислений и не применяется без соответствующих методов оптимизации.

Для оценки вероятности P_f широкое распространение получила процедура определения индекса надежности β (индекс безопасности по С.А. Корнелл [2], характеристика безопасности по А.Р. Ржаницын [3], индекс надежности по Раквицу и Фислеру [4]).

В силу нелинейности модели необходимо отметить, что процессы трещинообразования и перераспределения усилий в конструкции искажают как распределение, описывающее сопротивление элементов [5], так и существенно (при переходе от расчетных сочетаний нагрузок к расчетным сочетаниям усилий) деформируют и кластеризуют распределение, описывающее воздействие.

Поэтому применение распространенной формулы индекса надежности, применяемой из предположения о нормальном законе распределения функции воздействия, функции предельного состояния, и независимости случайных величин S и R (2), недопустимо.

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} \quad (2)$$

Нами построен алгоритм вероятностной оценки надежности строительной конструкции на основе метода Монте-Карло с оптимизацией, показанный на рисунках 2–4.

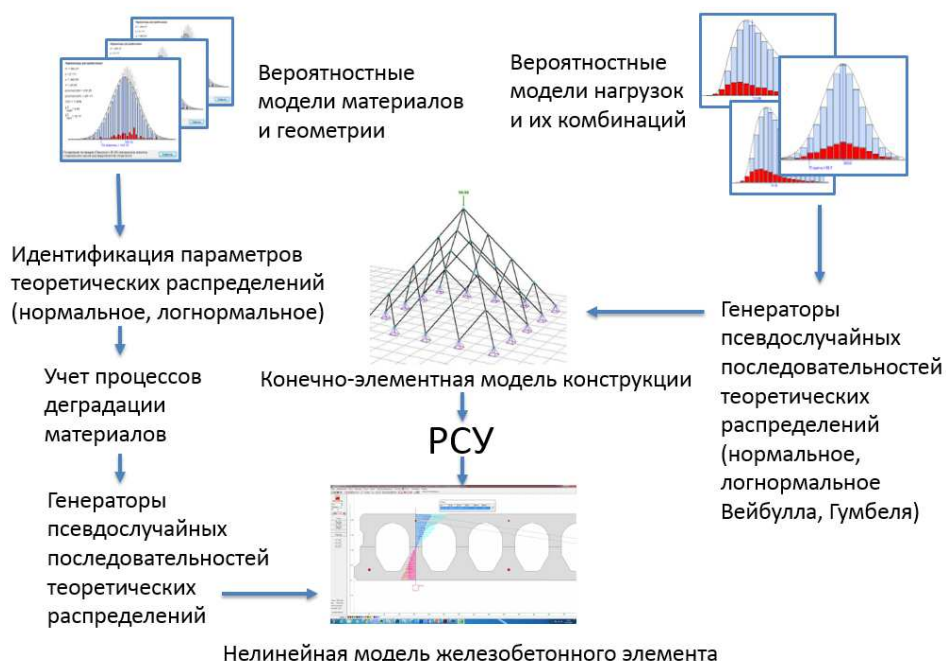


Рисунок 2. – Последовательность построения нелинейной вероятностной модели

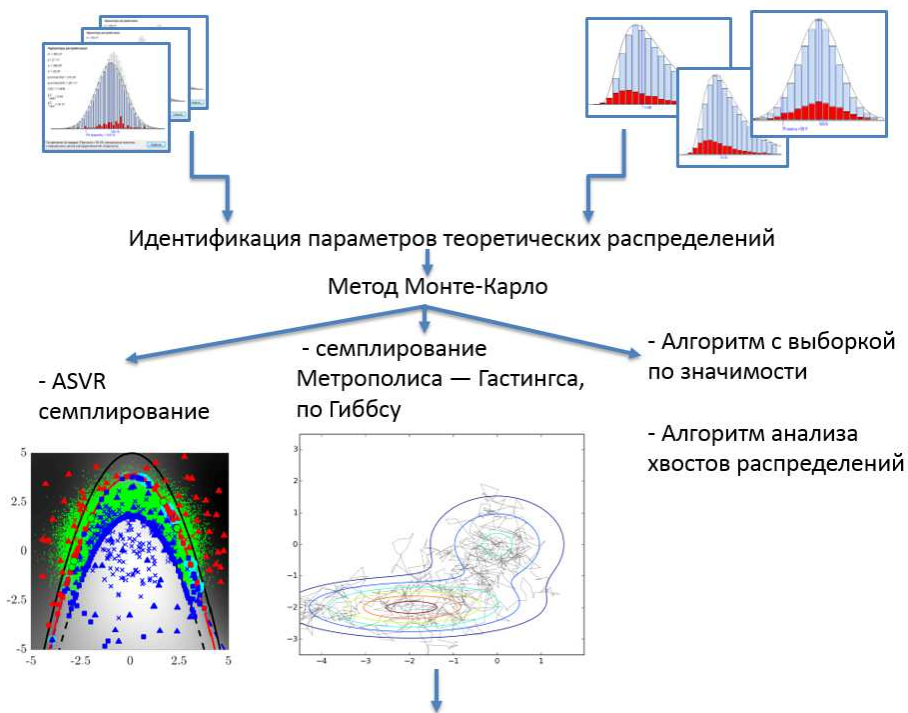


Рисунок 3. – Нелинейное вероятностное моделирование методом Монте-Карло с оптимизацией

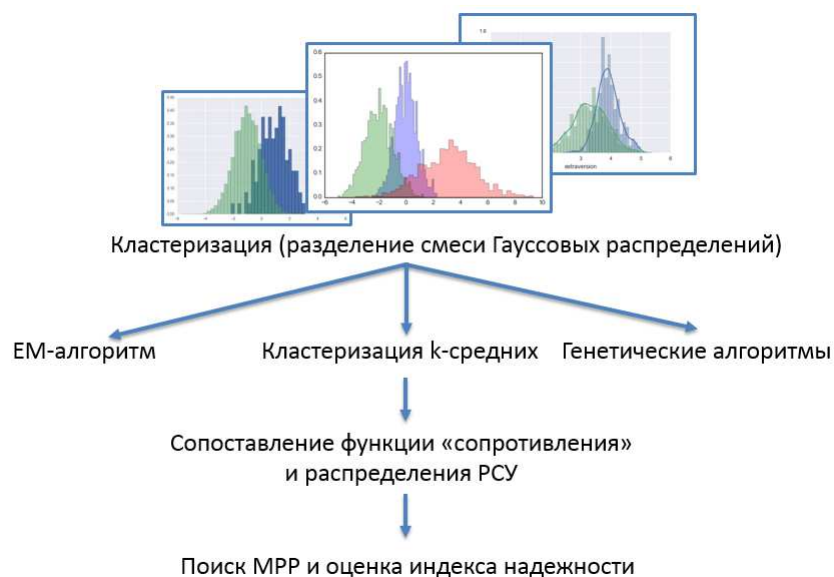


Рисунок 4. – Обработка результатов вероятностного моделирования с целью определения индекса надежности

Выводы:

1. Нелинейные процессы в строительных конструкциях, связанные с трещинообразованием и изменением жесткости сечений, приводят к существенным искажениям и кластеризации вероятностных распределений, описывающих сопротивление и воздействие на элементы, что делает невозможным применение упрощенных методов оценки индекса надежности;
2. Предложен алгоритм оценки надежности строительных конструкций с применением нелинейных моделей, основанный на методе Монте-Карло с оптимизацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haldar, A., and Mahadevan, S. (2000) Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, Wiley, New York.
2. Cornell C. A. Bounds on the Reliability of Structural Systems / C. A. Cornell // American Society of Civil Engineers : Journal of the Structural Division ASCE. – February, 1967. – Vol. 93, No. ST. – P. 171–200.
3. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
4. Rackwitz, R., and Fiessler, B. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences / Computers and Structures, 9. – 1978. – P.489-494
5. Глухов, Д. О. Разделение смеси гауссовых распределений при оценке надежности железобетонных элементов / Д. О. Глухов, Т. М. Глухова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара, Брест, 25–26 октября 2018 года : в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Строительный факультет ; редкол.: В. В. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Часть 1. – С. 119–124.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

№ госрегистрации 3671815379.

ISBN 978-985-531-701-3

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>