

ФОРМАТЫ МЕТОДА КОЭФФИЦИЕНТОВ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

В. В. Тур¹, В. В. Надольский²

¹ Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: profturnvic@gmail.com

² К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь; доцент кафедры строительных конструкций, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: nadolskiv@gmail.com

Реферат

В международных нормативных документах появляются требования, относящиеся к нелинейному конечно-элементному анализу конструкций и конструктивных систем, а главное – к обеспечению требуемого уровня надежности при выполнении такого анализа. Внесение в нормативные документы требований, относящихся к нелинейному анализу конструкций, связано как с возросшим интересом к данной проблеме при переходе на новые методы проектирования, так и новыми возможностями в связи с развитием компьютерной техники и программного обеспечения различного уровня, что создает возможности для такого проектирования. Учитывая то, что это направление является новым и не сформированным, вследствие чего возникает ряд терминологических и методологических нестыковок в научной литературе, в данной статье критически проанализированы подходы к обеспечению надежности при выполнении нелинейного анализа (не акцентируя внимания на реализации собственно нелинейной модели сопротивления), включенные в проекты нормативных документов prEN1990 и prEN1992. На основании аналитического обзора исследований представлены описание и критический анализ форматов записи метода коэффициентов надежности для железобетонных конструкций, проектируемых на основе нелинейных конечно-элементных моделей.

Систематизированы форматы записи метода коэффициентов надежности в зависимости (i) от того, на каком этапе происходит учет неопределенности базисных переменных и переход к расчетным значениям, (ii) от того, как вводятся изменчивости базисных переменных и погрешности модели, (iii) от того являются ли значения частных коэффициентов фиксированными или «регулируемыми». Сформированы две основные задачи, сдерживающие применение нелинейных конечно-элементных моделей в повседневном проектировании. Первая связана с методами оценки коэффициента вариации несущей способности конструкции. Вторая связана с отсутствием статистических параметров погрешности конечно-элементных моделей.

Ключевые слова: формат метода коэффициентов надежности, нелинейные модели несущей способности, метод конечных элементов, железобетонные конструкции, вероятностный метод, коэффициенты надежности, неопределенности, Еврокод.

FORMATS OF THE METHOD OF RELIABILITY FACTORS IN THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON COMPUTER MODELS

V. V. Tur, V. V. Nadolski

Abstract

In international regulatory documents, there are requirements related to the nonlinear finite element analysis of structures and structural systems, and most importantly to ensuring the required safety format when performing such an analysis. The introduction of requirements related to the nonlinear analysis of structures into regulatory documents is due both to the increased interest in this problem during the transition to new design methods, and new opportunities due to the development of computer technology and software at various levels, which creates opportunities for such design. Considering that this direction is new and not formed, which causes a number of terminological and methodological inconsistencies in the scientific literature, this article critically analyzes approaches to ensuring the required safety format when performing nonlinear analysis (without focusing on the implementation of the nonlinear resistance model proper) included in the draft regulatory documents prEN1990 and prEN1992. Based on an analytical review of the research, a description and critical analysis of the safety formats of reinforced concrete structures designed on the basis of nonlinear finite element models are presented.

The safety formats are systematized depending (i) on how the uncertainty of the basic variables is taken into account, (ii) on how the variability of the basic variables and model uncertainty are introduced, (iii) on whether the values of the partial factors are fixed or adjustable. Two main tasks have been formed that restrain the use of nonlinear finite element models in everyday design. The first is related to the methods of estimating the coefficient of variation of the load-bearing capacity. The second is related to the absence or lack of knowledge of the statistical parameters of the uncertainty of finite element models.

Keywords: safety format, nonlinear load-bearing capacity models, finite element method, reinforced concrete structures, probabilistic method, reliability factors, uncertainties, Eurocode.

Введение

В соответствии со сложившейся многолетней практикой, классический подход к проектированию конструкций представляют как процедуру, состоящую из двух отдельных независимых этапов. На первом этапе, опираясь на правила строительной механики с применением соответствующей расчетной модели, определяют *линейно-упругую реакцию* (отклик) конструкции, вызванную внешними воздействиями. Эту реакцию конструкции определяют как «эффекты воздействий» E , а их расчетные значения определяют как «расчетные эффекты воздействий» E_d . Линейно-упругий анализ выполняют с использованием средних значений жесткостных характе-

ристик, намереваясь получить наиболее реалистичное распределение эффектов воздействий. На втором этапе вычисляют максимальное (предельное) сопротивление R_d , применяя расчетные модели для сечений (при проверках «прочности») или элементов (при проверках «устойчивости»). Каждое критическое сечение или элемент затем проверяют, используя детерминистические неравенства вида $E_d \leq R_d$.

Следует учитывать, что проверку критических сечений конструкций во многих случаях выполняют с применением «локальных» *нелинейных* моделей. При этом, в соответствии с требованиями метода коэффициентов надежности, проверку сечений выполняют с применением расчетных значений прочностей материалов, консер-

вативных нелинейных моделей (например, метода предельных усилий и т. д.), базирующихся на довольно осторожных допущениях и ограничениях, главным образом для обеспечения целевого уровня надежности. Так, например, при разработке СНБ 5.03.01 «Бетонные и железобетонные конструкции», как и некоторых из промежуточных версий Eurocode 2, для того чтобы снять противоречие при применении в одном критерии результатов, полученных из линейно-упругого анализа при определении эффектов воздействий и глубоко нелинейной моделью локального сопротивления для критических сечений, были введены ограничения для относительных деформаций растянутой арматуры: $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq 10 \text{‰}$. Применение данного ограничения приводит к тому, что из полной нелинейной реакции элемента учитывается только ограниченная часть, что дает возможность выполнять проверки предельных состояний, составляя неравенства не в терминах деформаций, а традиционно в терминах усилий.

Принятая форма линеаризации позволяет несколько сгладить названные противоречия (несоответствия) в сторону безопасного подхода. Вместе с тем, такой подход не позволяет адекватно оценить поведение конструкции или конструктивной системы в тех случаях, когда вывод основывается на её полной *нелинейной реакции* (например, при прямом оценивании максимальной несущей способности или проверках конструктивных систем в особых расчетных ситуациях). Поэтому, как отмечалось ранее, для получения более реалистичного описания поведения (отклика) конструкции под приложенными воздействиями все более широко пытаются применять на практике компьютерное моделирование (например, нелинейный анализ посредством метода конечных элементов) [1–6].

Среди новых разделов, внесенных в проекты норм prEN1990¹ и prEN1992², появляются требования, относящиеся к нелинейному конечно-элементному анализу конструкций и конструктивных систем, а главное – к обеспечению надежности при выполнении такого анализа. Внесение в нормативные документы требований, относящихся к нелинейному анализу конструкций, связано как с возросшим интересом к данной проблеме при переходе на новые методы проектирования [7–9], так и новыми возможностями в связи с развитием компьютерной техники и программного обеспечения различного уровня, что создает возможности для такого проектирования.

Внесению нового раздела в prEN1992 предшествовали несколько крупных грантов, организованных Международной федерацией по железобетону fib и Техническим комитетом CEN/TC250 Конструкционные Еврокоды, результаты которых можно найти в работах [10–15]. Учитывая то, что это направление является новым и не сформированным, вследствие чего возникает ряд терминологических и методологических нестыковок в научной литературе, в данной статье критически проанализированы подходы к обеспечению надежности при выполнении нелинейного анализа (не акцентируя внимания на реализации собственно нелинейной модели сопротивления), включенные в проекты нормативных документов prEN1990 и prEN1992. Кроме того, выполнена систематизация возможных форматов записи метода коэффициентов надежности и рассмотрены некоторые новые подходы.

Материалы и методы

В соответствии с приложением F к prEN1992 в общем случае расчетное значение сопротивления R_d предложено определять с применением следующих методов, отличающихся уровнем применения вероятностно-статистического подхода:

- 1) вероятностного метода (full probabilistic method);
- 2) метод частных коэффициентов (partial factor method);
- 3) метод глобального коэффициента (global factor method).

Вероятностный метод

Нелинейную конечно-элементную модель применяют для получения реакции конструкции для текущего набора значений базисных

переменных, сгенерированных (выбранных) из соответствующих функций распределения (например, свойств материалов, геометрических размеров, граничных условий, ошибок (неопределенностей) моделирования и т. д.), с применением, например, метода Monte-Carlo или LHS (Latin Hypercube Sampling) [16–18]. В этом случае расчетное значение сопротивления определяют как квантиль сгенерированной выборки значений сопротивления [19, 20].

Как показано в ряде публикаций [11, 13, 15, 21] и подтверждается собственным опытом практического применения вероятностного метода, данный способ проверки надежности (безопасности) является сложным для реализации и может быть использован как при проектировании новых, так и оцениваются существующих конструкций только в тех случаях, когда повышенная трудоемкость расчетных операций экономически оправдана.

Метод частных коэффициентов надежности

В рамках формата частных коэффициентов расчетное значение сопротивления определяется посредством нелинейной численной модели, подставляя расчетные значения прочности материалов (бетона f_{cd} и арматуры f_{yd}) и номинальные значения геометрических параметров a_{nom} . Выражение для расчетного сопротивления в рамках этого подхода имеет вид:

$$R_d = R\{f_{cd}, f_{yd}, a_{nom}\} / \gamma_{Rd}, \quad (1)$$

где γ_{Rd} – частичный коэффициент надежности, учитывающий неопределенность модели.

Недостаток этого подхода заключен в том, что нелинейный анализ в этом случае выполняется с крайне низкими значениями базисных переменных модели сопротивления. В силу этого в расчете используют нереально низкие значения прочностных характеристик материалов (квантили порядка 0,1 %). При выполнении нелинейного анализа статически неопределимых конструкций (систем) применение таких заниженных прочностных характеристик материалов приводит к нереальному перераспределению эффектов воздействий и непредсказуемым формам разрушения. По этой причине не рекомендуется основывать выводы только на этом подходе. Кроме того, для конструкций, поведение которых под нагрузкой зависит от эффектов второго порядка, заниженные прочностные параметры материалов могут давать сверхконсервативные и неэкономичные результаты. Так, авторы работы [22] отмечают, что «*применение т. н. «расчетных» диаграмм деформирования материалов (с расчетными значениями прочностей и относительных деформаций в параметрических точках) ведет к существенному искажению матрицы жесткостей конечно-элементной модели в процессе реализации итерационной процедуры нелинейного анализа*».

Метод глобального коэффициента надежности

В общем случае суть метода глобального сопротивления заключается в том, что расчетные значения сопротивления R_d получают путем деления величины сопротивления, рассчитанного при рационально выбранных репрезентативных значениях базисных переменных X_{rep} , на глобальный коэффициент сопротивления³ γ_{Rd}^* и коэффициент, учитывающий погрешности расчетной модели сопротивления⁴ γ_{Rd} .

$$R_d = R\{X_{rep}\} / (\gamma_{Rd}^* \gamma_{Rd}). \quad (2)$$

В постановке prEN1992 в качестве репрезентативных значений приняты средние значения для прочностных характеристик материалов f_{cm} , f_{ym} и номинальные значения для геометрических размеров a_{nom} , тогда уравнение (2) имеет вид:

$$R_d = R\{f_{cm}, f_{ym}, a_{nom}\} / (\gamma_{Rd}^* \gamma_{Rd}). \quad (3)$$

¹ prEN 1990. Eurocode – Basis of structural design. Brussels: CEN. Draft 09.2021.

² prEN 1992-1-1. Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. CEN. Draft 11.2021.

³ γ_{Rd}^* is the global resistance factor for the uncertainties of materials properties and geometry prEN1992-1-1.

⁴ γ_{Rd} is the partial safety factor accounting for the model uncertainty prEN1992-1-1.

Глобальный коэффициент сопротивления γ_r^* определяют согласно prEN1992 подобно тому, как это сделано в fib MC 2010, из выражения:

$$\gamma_r^* = \exp(\alpha_R \beta V_r^*), \quad (4)$$

где V_r^* – коэффициент вариации сопротивления, который в общем случае получают на основе симуляций Monte-Carlo;

α_R – коэффициент чувствительности для сопротивления;

β – целевой индекс надежности.

Основная сложность реализации предложенного метода заключается в вычислении коэффициента вариации V_r^* , что послужило стимулом для развития метода глобального коэффициента, на с упрощенной процедурой оценки коэффициента вариации [23, 24].

Метод глобального коэффициента с упрощенной процедурой оценки коэффициента вариации

В prEN1992, вслед за рекомендацией fib MC 2010, принят упрощенный подход, основа которого положена в работах [10]. В рамках данного подхода, который получил в международной практике название ECOV (Estimation of Coefficient Of Variation), коэффициент вариации сопротивления V_r^* оценивают с использованием результатов двух отдельных нелинейных расчетов согласно выражению:

$$V_r^* = \ln [R\{f_{cm}, f_{ym}, a_{nom}\} / R\{f_{ck}, f_{yk}, a_{nom}\}] / 1.65. \quad (5)$$

Как отмечается в [12, 15], краеугольным камнем этого метода является определение среднего R_m и характеристического R_k сопротивлений из двух отдельных нелинейных расчетов (анализов), при определении которых используют в одном случае – средние, а в другом – характеристические значения базисных переменных как входных параметров для свойств материалов.

Отмечая преимущества данного подхода, утверждается, что он является общим и позволяет обеспечить любой требуемый уровень надежности, изменяя значение целевого индекса надежности β_{tag} [12, 15]. С другой стороны, подчеркивается, что для описания сопротивления может быть принята любая, а не только логнормальная (LN) функция распределения вероятностей. При этом, в данном подходе результат оценивания или уровень надежности не зависит от формы разрушения конструкции и чувствительность к случайным вариациям всех входных параметров материалов включается автоматически. В качестве «легкого недостатка» рассматривается только необходимость выполнения двух отдельных нелинейных расчетов.

Безусловно, что при первом рассмотрении предложенный подход выглядит вполне убедительным и, главное, простым в практической реализации. Казалось бы, достаточно два раза выполнить нелинейный анализ и обеспечить при этом требуемый (произвольный) уровень надежности. Однако при ближайшем рассмотрении возникают серьезные сомнения относительно корректности математической точности приведенных зависимостей. Это связано, главным образом, с тем, что не только в целом ряде статей, посвященных данному формату [10–15], но и в нормативных документах fibMC2010 и prEN1992 (что не позволяет говорить о редакционных неточностях) утверждается или, по крайней мере, предполагается при выводе формулы (5), что сопротивление R_k , вычисленное при подстановке в нелинейную функцию сопротивления *характеристических* значений прочностных характеристик (f_{ck}, f_{yk}, \dots), будет соответствовать 5 % квантили [25]. Но здесь имеет место серьезное несоответствие, на которое следует обратить внимание: принимая в качестве входных параметров в нелинейной модели сопротивления характеристические значения прочностей материалов (как 5 % – квантили), результирующее сопротивление R_k **не является** 5 % – квантилью, что, очевидно, не дает права использовать в формуле (5) значение статистики 1,65. Скорее всего, это будет неизвестная квантиль другого порядка, и в общем виде запись формулы (5) должна быть представлена в следующем виде [12]:

$$V_r^* = \ln [R\{f_{cm}, f_{ym}, a_{nom}\} / R\{f_{ck}, f_{yk}, a_{nom}\}] / c, \quad (6)$$

где c – коэффициент, соответствующий квантили значения $R\{f_{ck}, f_{yk}, a_{nom}\}$.

Но проблема в том, что указать заранее значение коэффициента «с» **невозможно**. Для каждой отдельной расчетной модели, для каждой отдельной расчетной процедуры, применяемой при нелинейном анализе, будут иметь место различные квантили, соответствующие сопротивлению, вычисленному при характеристических значениях прочностей материалов, что ещё больше увеличивает неопределенность нелинейного анализа.

Метод глобального коэффициента надежности с модификацией прочности материалов

В соответствии с EN 1992-2⁵ при выполнении нелинейных расчетов было предложено применять некоторые модифицированные прочности материалов, при этом выражение для расчетного сопротивления в рамках этого подхода имеет вид:

$$R_d = R\{f_{cmd}, f_{ym}, a_{nom}\} / \gamma_{GL}, \quad (7)$$

где f_{cmd} – пониженное значение прочности бетона на сжатие, принимаемое равным $0.85 f_{ck}$, при этом f_{ck} – характеристическое (5 % квантиль) значение прочности бетона на сжатие;

f_{ym} – среднее значение прочности (предела текучести) арматуры на растяжения, принимаемое равным $1.1 f_{yk}$, при этом f_{yk} – характеристическое (5 % квантиль) значение предела текучести арматуры;

$\gamma_{GL} = 1,27$ – глобальный коэффициент надежности.

По сравнению с форматом записи метода коэффициентов надежности, принятом при расчете сечений согласно EN1992-1-1, формат записи согласно EN1992-2 считается серьезным улучшением при выполнении нелинейных анализов железобетонных конструкций. Утверждается [10], что при введении дополнительного коэффициента сопротивления γ_{GL} нет необходимости учитывать неопределенности только снижением прочностных характеристик материалов. Это позволяет использовать более реалистичные параметры материалов в нелинейном анализе, что дает возможность моделирования более реалистичной реакции конструктивной системы. Однако при этих «условных» плюсах трудно согласиться с тем, что задание в расчетной модели сопротивления прочности бетона $f_{cmd} = 0.85 f_{ck}$ (!) всё более приближает нас к реальной работе конструкции.

Результаты исследования

В практике проектирования широкое распространение получил метод коэффициентов надежности, на котором и будут сосредоточены дальнейший анализ и обобщение возможных форматов. В последнее время в научной литературе появляются большое разнообразие названий метода коэффициентов надежности, например, «adjusted partial factors method», «global partial factor», «global resistance factor», «global safety format» [26–28]. Разнообразие таких названий иногда ставит в тупик даже опытного специалиста. Но с методологической точки зрения эти методы являются близкими, скорее меняется их формат записи, но не сам метод. Методы проверок предельных состояний целесообразнее разделять только исходя из метода (способа) учета неопределенности базисных переменных и целевых уровней надежности, а не от формата записи того или иного метода [29–31].

Во-первых, формат записи метода коэффициентов надежности можно выделить в зависимости от того, на каком этапе происходит учет неопределенности базисных переменных и переход к расчетным значениям:

– подстановка **расчетных значений базисных переменных** в модель сопротивления и/или модель эффектов воздействий. Это один из основных форматов реализации метода коэффициентов надежности, принятых в нормах и получивший название метода частных коэффициентов. Данный формат наиболее распространен для железобетонных конструкций. Согласно этому формату записи, учет неопределенностей и изменчивостей, возникающих из-за различных причин, происходит с помощью расчетных значений, присвоенных базисным переменным. Расчетные значения базисных пере-

⁵ EN 1992-2. Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 2: concrete bridges. CEN. Brussels. 2005.

менных, полученные из характеристических значений и частных коэффициентов, должны быть введены в модели. Предельная нагрузка, полученная при анализе путем ввода расчетных значений базисных переменных в модель сопротивления, является расчетным сопротивлением, т. е.

$$R_d = R_{Xd}, \quad (8)$$

где R_{Xd} – значение сопротивления, вычисленное при расчетных значениях базисных переменных;

– подстановка **характеристических значений базисных переменных** в модель сопротивления. Этот формат записи наиболее распространен для стальных конструкций. В рамках этого формата в расчетные модели сопротивления подставляют характеристические значения базисных переменных, а затем общая изменчивость базисных переменных и модели сопротивления учитывается «глобальным» частным коэффициентом. Расчетное значение сопротивления определяется как

$$R_d = R_{Xk} / \gamma_{R,Xk \rightarrow d}, \quad (9)$$

где R_{Xk} – значение сопротивления, вычисленное на основе численной модели при характеристических значениях базисных переменных;

$\gamma_{R,Xk \rightarrow d}$ – коэффициент надежности для модели сопротивления при переходе от характеристических значений базисных переменных к расчетному значению сопротивления, учитывающий неопределенности присущие всем базисным переменным, входящим в модель сопротивления, в том числе и неопределенность самой модели сопротивления;

– подстановка **средних значений базисных переменных** в модель сопротивления. Согласно этому формату, который также включен в Еврокод 2⁶ и *fib Model Code 2020*⁷, влияние различных неопределенностей интегрированы в расчетное значение сопротивления посредством «глобального»⁸ частного коэффициента [32]. При анализе должны быть введены **средние** значения базисных переменных, полученные из характеристических значений или каким-то другим способом, например, из номинальных. Тогда расчетное значение сопротивления определяется как

$$R_d = R_{Xmean} / \gamma_{R,Xmean \rightarrow d}, \quad (10)$$

где R_{Xmean} – значение сопротивления, вычисленное на основе численной модели при средних значениях базисных переменных;

$\gamma_{R,Xmean \rightarrow d}$ – коэффициент надежности для модели сопротивления при переходе от средних значений базисных переменных к расчетному значению сопротивления, учитывающий неопределенности присущие всем базисным переменным, входящим в модель сопротивления, в том числе и неопределенность модели сопротивления.

Во-вторых, формат метода коэффициентов надежности можно выделить в зависимости от того, как вводятся изменчивости базисных переменных и погрешности модели [32]:

– интегрально, когда все неопределенности объединяются в одно значение коэффициента, например:

$$R_d = R_{Xmean} / \gamma_{R,Xmean \rightarrow d}; \quad (11)$$

– раздельно (дифференцированно):

$$R_d = R_{Xmean} / (\gamma_{r,Xmean \rightarrow d} \gamma_{Rd}), \quad (12)$$

где $\gamma_{r,Xmean \rightarrow d}$ – коэффициент надежности, учитывающий неопределенности, вносимые базисными переменными, входящими в модель сопротивления;

γ_{Rd} – коэффициент надежности, учитывающий неопределенность модели сопротивления.

В-третьих, формат метода коэффициентов надежности можно выделить в зависимости от того, являются ли значения частных коэффициентов фиксированными или «регулируемыми» [33–35]:

– с **фиксированными** значениями. Этот формат общепринятый в нормативных документах, т. е. значения частных коэффициентов определены одним из возможных методов и предписаны в нормах в виде фиксированных значений;

– с **регулируемыми** (модифицированными) значениями частных коэффициентов. Метод называется с «регулируемыми» значениями частных коэффициентов⁹, потому что не содержит фиксированных значений частных коэффициентов, а позволяет упрощенно учитывать изменчивость базисных переменных и целевой уровень надежности. Расчетное значение определяется как квантиль распределения, при этом квантиль устанавливается на основании коэффициентов чувствительности и индекса надежности. Так, для произведения двух независимых логнормально распределённых случайных величин используют следующее выражение:

$$R_d = \mu_r \times \mu_{\theta r} \times \exp(-\alpha_r \times \beta \times V_R), \quad (13)$$

где μ_r – среднее значение сопротивления;

$\mu_{\theta r}$ – среднее значение неопределенности модели, т. е. отношения фактического (экспериментального) значения сопротивления к значению, определенному по расчетной зависимости (модели сопротивления);

V_R – коэффициент вариации значения сопротивления с учетом неопределенности модели;

α_r – коэффициент чувствительности для сопротивления согласно теории надежности 1-го порядка (FORM);

β – целевое значение индекса надежности.

Заключение

В рамках статьи систематизированы результаты исследований форматов записи метода коэффициентов надежности и выполнена их классификация в зависимости (i) от того, на каком этапе происходит учет неопределенности базисных переменных и переход к расчетным значениям, (ii) от того, как вводятся изменчивости базисных переменных и погрешности модели, (iii) от того являются ли значения частных коэффициентов фиксированными или «регулируемыми». Оценивая сложившуюся ситуацию в проектировании, можно сделать следующие заключения:

– в рамках стандартной (традиционной) проектной процедуры эффекты воздействий определяют в назначенных критических сечениях из линейно-упругого анализа. Результаты расчетов, полученные с применением линейно-упругих моделей, представляют собой, по сути, некоторое возможное распределение эффектов воздействий, формально удовлетворяющих условиям равновесия, но не отражают реального распределения усилий, особенно при расчете статически неопределимых конструкций, например для железобетонных конструкций, работающих с трещинами или для стальных с пластическим деформациями;

– в формате записи метода частных коэффициентов надежности, применяемого в традиционном проектировании, проверки предельных состояний несущей способности осуществляют в локальных сечениях, тогда как общий уровень надежности конструкции в целом не проверяют. Подход метода частных коэффициентов в определенной мере может быть оправдан тем, что в локальных сечениях могут иметь место некоторые достаточно низкие значения прочностных характеристик для бетона, которые необходимо отразить в расчетном сечении;

– при выполнении нелинейных расчетов взаимодействуют практически все локальные сечения. Поэтому резонно следующее

⁹ В англоязычной литературе получил название «adjusted partial factors method». Хотя метод преподносится как новый, но он относится к методу назначения расчетных значений на основании квантиля, т. н. статистический метод назначения расчетного значения. К одному из «регулируемых» методов частных коэффициентов относят формат, предложенный в работах Cervenkova V. [10], получивший название метод ECOV.

утверждение А. В. Перельмутера: «гипотеза о том, что все без исключения микрообъемы материала имеют наихудшие параметры качества, вряд ли должна использоваться. Её реализация, по-видимому, имеет исчезающе малую вероятность. При построении диаграммы деформирования « σ - ε », которая используется в процессе физического нелинейного расчета, следует исходить из увеличенных (по сравнению с контролем прочности) значений прочностного параметра». Здесь следует добавить, что эти повышенные значения должны довольно адекватно отражать поведение материала под нагрузкой и позволять получать близкие к реальным значения элементов в матрице жесткостей;

– нелинейный анализ, основанный на применении диаграмм деформирования « σ - ε », отражающих фактическое поведение материалов под нагрузкой, дает возможность смоделировать нелинейное поведение конструкции, близкое к реальному. Однако нелинейный анализ требует разработки методов надежности, учитывающих интегральное поведение системы.

Аналитический обзор литературы показал, что на сегодня не найдено решение для научно обоснованного назначения формата проверки надежности (безопасности) железобетонных конструкций, проектируемых на основе нелинейных конечно-элементных моделей. Обобщенно можно констатировать две основные проблемы, которые существуют и требуют дальнейших исследований:

– первая связана с методами оценки коэффициента вариации несущей способности конструкции. Одно из широко распространенных предложений оценки коэффициента посредством симуляционных методов не нашло широкого применения из-за сложности нелинейного анализа, что не позволяет создать большие массивы данных. Второе предложение на основе метода Cervenka V. обладает существенной математической неточностью, которая представлена в статье;

– вторая связана с отсутствием статистических параметров погрешности конечно-элементных моделей.

Также следует отметить, что большинство исследований сосредоточены на обеспечении надежности для изолированных конструктивных элементов. Однако в конструктивных системах необходимо проводить четкое различие между локальным отказом (отказами) и глобальным отказом. Локальный отказ может быть определен на основе превышения локальных пределов для материалов, например, прочности и предельных деформаций, или механизмов, например, сопротивления и предельной деформируемости. Глобальный режим отказа может быть определен на основе механического следствия (одновременных) локальных механизмов отказа, либо на основе превышения намеренно выбранной феноменологической меры общей емкости конструктивной системы. Тщательное исследование поведения материала, элемента или системы на всех этапах деформирования должно обеспечить механическое объяснение взаимосвязи между наблюдаемым локальным механизмом (механизмами) отказа и глобальным режимом отказа. Последовательность локальных механизмов отказа, приводящих к глобальному режиму отказа, должна быть тщательно исследована. При анализе систем важным является вопрос, на который следует ответить при анализе: будут ли отказы коррелируемые (взаимосвязаны) или нет. Для случая (почти) коррелированных одновременных механизмов отказа глобальный коэффициент надежности совпадает с глобальным коэффициентом надежности для одного механизма отказа. В случае (почти) некоррелированных механизмов одновременного отказа глобальный коэффициент отличается в зависимости от того, расположены ли они последовательно или параллельно.

Список цитированных источников

1. Shear resistance evaluation of prestressed concrete bridge beams: fib Model Code 2010 guidelines for level IV approximations / B. Belletti [et al.] // *Structural Concrete*. – 2013. – Vol. 14 (3). – P. 242–249. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200046>.
2. Schlune, H. Safety formats for nonlinear analysis tested on concrete beams subjected to shear forces and bending moments / H. Schlune, M. Plos, K. Gylltoft // *Engineering Structures*. – 2011. – Vol. 33. – P. 2350–2356. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.008>.
3. Olalusi, O. B. Model uncertainties and bias in shear strength predictions of slender stirrup reinforced concrete beams / O. B. Olalusi, C. Viljoen // *Structural Concrete*. – 2019. – Vol. 21. – P. 316–332. – <https://doi.org/10.1002/suco.201800273>.
4. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106933>.
5. Рахмонов, А. Д. Компьютерное моделирование для исследования напряженно-деформированного состояния балок с комбинированным армированием / А. Д. Рахмонов, Н. П. Соловьев, В. М. Поздеев // *Вестник МГСУ*. – 2014. – № 1. – С. 187–195.
6. Сафаров, А. Р. Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов / А. Р. Сафаров, В. Б. Дорожнинский, В. И. Андреев // *Вестник МГСУ*. – 2023. – Т. 18. – № 4. – С. 545–555. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.4.545-555>.
7. Тур, В. В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления / В. В. Тур, В. В. Надольский // *Строительство и реконструкция*. – 2022. – № 6(104). – С. 78–90. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90>.
8. Non-linear finite element analyses applicable for the design of large reinforced concrete structures / M. Engen [et al.] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 23. – P. 1381–1403. – <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1348993>.
9. Тамразян, А. Г. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой / А. Г. Тамразян, Т. А. Мацевич // *Строительство и реконструкция*. – 2022. – № 1(99). – С. 89–98. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>.
10. Cervenka, V. Reliability – based non-linear analysis according to fib Model Code 2010 / V. Cervenka // *Structures Concrete, Journal of fib*. – 2013. – Vol. 14. – P. 19–28. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200022>.
11. Allaix, D. L. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures / D. L. Allaix, V. I. Carbone, G. Mancini // *Structural Concrete*. – 2013. – Vol. 14(1). – P. 29–42. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200017>.
12. Shlune, H. Safety format for non-linear analysis of concrete structures / H. Shlune, K. Gylltoft, M. Plos // *Magazine of Concrete Research*. – 2012. – Vol. 64(7). – P. 563–74.
13. Sykora, M. Safety format for non-linear analysis in the model code – verification of reliability level / M. Sykora, M. Holicky // *Proceeding of fib symposium on concrete engineering for excellence and efficiency*. – 2011. – P. 943–946.
14. Cervenka, V. Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures / V. Cervenka // *Proceedings of the 11th Probabilistic Workshop, Brno*, – 2013. – ID: 215762212.
15. Partial safety factor for resistance model uncertainties in 2D non-linear finite element analysis of reinforced concrete structures / P. Castaldo [et al.] // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 176. – P. 746–762. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.041>.
16. Olsson, A. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis / A. Olsson, G. Sandberg, O. Dahlblom // *Structural Safety*. – 2003. – Vol. 25(1). – P. 47–68.
17. Vořechovsk, M. Correlation control in small-sample Monte Carlo type simulations I: a simulated annealing approach / M. Vořechovsk, D. Novak // *Probabilistic Engineering Mechanics*. – 2009. – Vol. 24 (3). – P. 452–462.
18. Харченко, А. О. Использование вероятностных методов оценки надежности технических объектов на примере технологических и автомобильных систем / А. О. Харченко, А. А. Харченко, Е. А. Владецкая // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2019. – № 4 (67). – С. 3–10.
19. Лизогуб, А. А. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона / А. А. Лизогуб, А. В. Тур, В. В. Тур // *Строительство и реконструкция*. – 2023. – № 4(108). – С. 93–105. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-108>.

20. Sattler, F. Probabilistic and semi-probabilistic analyses of bridge structures – multi-level modelling based assessment of existing structures / F. Sattler, A. Strauss // Proceedings of the 1st conference of the European association on quality control of bridges and structures. – 2021. – Vol. 110. – P. 962–970. – <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4>.
21. Stochastic modelling and assessment of long-span precast prestressed concrete elements failing in shear / O. Slowik [et al.] // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 228. – Paper 111500. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111500>.
22. Перельмутер, А. В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? / А. В. Перельмутер, В. В. Тур // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13. – P. 86–102.
23. Надольский, В. В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой / В. В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – № 6. – С. 852–863. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.6.852-863>.
24. Novak, L. Estimation of coefficient of variation for structural analysis: the correlation interval approach / L. Novak, D. Novak // Structural Safety. – 2021. – Vol. 92. – Paper 102101. – <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102101>.
25. Соловьев, С. А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева // Вестник МГСУ. – 2023. – № 18(10). – С. 1545–1555. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555>.
26. Castaldo, P. Safety formats for non-linear finite element analysis of reinforced concrete structures: discussion, comparison and proposals / P. Castaldo, D. Gino, G. Mancini // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 193. – P. 136–153. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.136-153>.
27. Aleatory uncertainties with global resistance safety factors for non-linear analyses of slender reinforced concrete columns / P. Castaldo [et al.] // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 255. – Paper 113920. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113920>.
28. Тур, В. В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 2 / В. В. Тур, В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 5(67). – С. 69–75.
29. Bakeer, T. General partial safety factor theory for the assessment of the reliability of nonlinear structural systems / T. Bakeer // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 234. – Paper 109150. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109150>.
30. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures / L. Novak [et al.] // Structural Concrete. – 2022. – Vol. 24. – P. 771–787. – <https://doi.org/10.1002/suco.202200179>.
31. Уткин, В. С. Расчет несущих элементов конструкций по заданному значению надежности при неполной статистической информации / В. С. Уткин, С. А. Соловьев, О. В. Ярыгина // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 1(87). – С. 81–91. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91>.
32. Надольский, В. В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей / В. В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – Вып. 3. – С. 367–378. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.367-378>.
33. Caspeele, R. Validation of the harmonized partial factor method for design and assessment of concrete structures as proposed for fib model code 2020 / R. Caspeele, Den Hendre K. Van // Structural Concrete. – 2023. – Vol. 24. – P. 4368–4376. – <https://doi.org/10.1002/suco.202201109>.
34. Partial factor methods for existing structures according to fib Bulletin 80: Assessment of an existing prestressed concrete bridge / D. Gino [et al.] // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 21. – P. 15–31. – <https://doi.org/10.1002/suco.201900231>.
35. Slobbe, A. Reliability-based calibration of design code formulas: Application to shear resistance formulas for reinforced concrete members without shear reinforcement / A. Slobbe, A. Rózsás, Y. Yang // Structural Concrete. – 2023. – Vol. 24. – P. 2979–3001. – <https://doi.org/10.1002/suco.202200583>.
- References
1. Shear resistance evaluation of prestressed concrete bridge beams: fib Model Code 2010 guidelines for level IV approximations / B. Belletti [et al.] // Structural Concrete. – 2013. – Vol. 14(3). – P. 242–249. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200046>.
 2. Schlune, H. Safety formats for nonlinear analysis tested on concrete beams subjected to shear forces and bending moments / H. Schlune, M. Plos, K. Gylltoft // Engineering Structures. – 2011. – Vol. 33. – P. 2350–2356. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.008>.
 3. Olalusi, O. B. Model uncertainties and bias in shear strength predictions of slender stirrup reinforced concrete beams / O. B. Olalusi, C. Viljoen // Structural Concrete. – 2019. – Vol. 21. – P. 316–332. – <https://doi.org/10.1002/suco.201800273>.
 4. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106933>.
 5. Rahmonov, A. D. Komp'yuternoe modelirovanie dlya issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya balok s kombinirovannym armirovaniem / A. D. Rahmonov, N. P. Solov'ev, V. M. Pozdeev // Vestnik MGSU. – 2014. – № 1. – S. 187–195.
 6. Safarov, A. R. Realizatsiya chislennoy modeli betona CSCM primenitel'no k otechestvennym klassam betonov / A. R. Safarov, V. B. Dorozhinskij, V. I. Andreev // Vestnik MGSU. – 2023. – Т. 18. – № 4. – S. 545–555. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.4.545-555>.
 7. Тур, В. В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопоставления / В. В. Тур, В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6(104). – С. 78–90. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90>.
 8. Non-linear finite element analyses applicable for the design of large reinforced concrete structures / M. Engen [et al.] // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2017. – Vol. 23. – P. 1381–1403. – <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1348993>.
 9. Tamrazyan, A. G. Analiz nadezhnosti zhelezobetonnoj plity s korrodirovannoj armaturoj / A. G. Tamrazyan, T. A. Maceevich // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – № 1(99). – S. 89–98. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>.
 10. Cervenka, V. Reliability – based non-linear analysis according to fib Model Code 2010 / V. Cervenka // Structures Concrete, Journal of fib. – 2013. – Vol. 14. – R. 19–28. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200022>.
 11. Allaix, D. L. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures / D. L. Allaix, V. I. Carbone, G. Mancini // Structural Concrete. – 2013. – Vol. 14(1). – P. 29–42. – <https://doi.org/10.1002/suco.201200017>.
 12. Shlune, H. Safety format for non-linear analysis of concrete structures / H. Shlune, K. Gylltoft, M. Plos // Magazine of Concrete Research. – 2012. – Vol. 64(7). – P. 563–74.
 13. Sykora, M. Safety format for non-linear analysis in the model code – verification of reliability level / M. Sykora, M. Holicky // Proceeding of fib symposium on concrete engineering for excellence and efficiency. – 2011. – P. 943–946.
 14. Cervenka, V. Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures / V. Cervenka // Proceedings of the 11th Probabilistic Workshop, Brno, – 2013. – ID: 215762212.
 15. Partial safety factor for resistance model uncertainties in 2D non-linear finite element analysis of reinforced concrete structures / P. Castaldo [et al.] // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 176. – P. 746–762. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.041>.
 16. Olsson, A. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis / A. Olsson, G. Sandberg, O. Dahlblom // Structural Safety. – 2003. – Vol. 25(1). – P. 47–68.
 17. Vořechovsk, M. Correlation control in small-sample Monte Carlo type simulations I: a simulated annealing approach / M. Vořechovsk, D. Novak // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2009. – Vol. 24(3). – P. 452–462.
 18. Harchenko, A. O. Ispol'zovanie veroyatnostnyh metodov ocenki nadezhnosti tekhnicheskikh ob'ektov na primere tekhnologicheskikh i avtomobil'nyh sistem / A. O. Harchenko, A. A. Harchenko, E. A. Vladeckaya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – 2019. – № 4(67). – S. 3–10.

19. Lizogub, A. A. Veroyatnostnyj podhod k ocenke zhivuchesti konstruktivnyh sistem iz sbornogo i monolitnogo zhelezobetona / A. A. Lizogub, A. V. Tur, V. V. Tur // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2023. – № 4 (108). – S. 93–105. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-108>.
20. Sattler, F. Probabilistic and semi-probabilistic analyses of bridge structures – multi-level modelling based assessment of existing structures / F. Sattler, A. Strauss // Proceedings of the 1st conference of the European association on quality control of bridges and structures. – 2021. – Vol. 110. – P. 962–970. – <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4>.
21. Stochastic modelling and assessment of long-span precast prestressed concrete elements failing in shear / O. Slowik [et al.] // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 228. – Paper 111500. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111500>.
22. Pereł'muter, A. V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii? / A. V. Pereł'muter, V. V. Tur // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13. – P. 86–102.
23. Nadol'skij, V. V. Koefficienty nadezhnosti dlya nelinejnyh modelej nesushchej sposobnosti balok s gibkoj stenkoj / V. V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18. – № 6. – S. 852–863. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.6.852-863>.
24. Novak, L. Estimation of coefficient of variation for structural analysis: the correlation interval approach / L. Novak, D. Novak // Structural Safety. – 2021. – Vol. 92. – Paper 102101. – <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102101>.
25. Solov'ev, S. A. Metod veroyatnostnogo analiza nadezhnosti elementov konstrukcij na osnove granichnyh funkcij raspredeleniya / S. A. Solov'ev, A. A. Solov'eva // Vestnik MGSU. – 2023. – № 18(10). – S. 1545–1555. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555>.
26. Castaldo, P. Safety formats for non-linear finite element analysis of reinforced concrete structures: discussion, comparison and proposals / P. Castaldo, D. Gino, G. Mancini // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 193. – P. 136–153. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.136-153>.
27. Aleatory uncertainties with global resistance safety factors for non-linear analyses of slender reinforced concrete columns / P. Castaldo [et al.] // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 255. – Paper 113920. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113920>.
28. Tur, V. V. Kalibrovka znachenij chastnyh koefficientov dlya proverok predel'nyh sostojanij nesushchej sposobnosti stal'nyh konstrukcij dlya uslovij Respubliki Belarus'. CHast' 2 / V. V. Tur, V. V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2016. – № 5 (67). – S. 69–75.
29. Bakeer, T. General partial safety factor theory for the assessment of the reliability of nonlinear structural systems / T. Bakeer // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 234. – Paper 109150. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109150>.
30. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures / L. Novak [et al.] // Structural Concrete. – 2022. – Vol. 24. – P. 771–787. – <https://doi.org/10.1002/suco.202200179>.
31. Utkin, V. S. Raschet nesushchih elementov konstrukcij po zadannomu znacheniyu nadezhnosti pri nepolnoj statisticheskoj informacii / V. S. Utkin, S. A. Solov'ev, O. V. YArgina // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2020. – № 1(87). – S. 81–91. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91>.
32. Nadol'skij, V. V. Ocenka raschetnogo znacheniya nesushchej sposobnosti stal'nyh elementov, proektiruemyh na osnove chislennyh modelej / V. V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18. – Vyp. 3. – S. 367–378. – <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.367-378>.
33. Caspeele, R. Validation of the harmonized partial factor method for design and assessment of concrete structures as proposed for fib model code 2020 / R. Caspeele, Den Hende K. Van // Structural Concrete. – 2023. – Vol. 24. – P. 4368–4376. – <https://doi.org/10.1002/suco.202201109>.
34. Partial factor methods for existing structures according to fib Bulletin 80: Assessment of an existing prestressed concrete bridge / D. Gino [et al.] // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 21. – P. 15–31. – <https://doi.org/10.1002/suco.201900231>.
35. Slobbe, A. Reliability-based calibration of design code formulas: Application to shear resistance formulas for reinforced concrete members without shear reinforcement / A. Slobbe, A. Rózsás, Y. Yang // Structural Concrete. – 2023. – Vol. 24. – P. 2979–3001. – <https://doi.org/10.1002/suco.202200583>.

Материал поступил 07.06.2024, одобрен 24.06.2024, принят к публикации 27.06.2024