

DOI:10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102

## ГОТОВЫ ЛИ МЫ ПЕРЕЙТИ К НЕЛИНЕЙНОМУ АНАЛИЗУ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ?

*А.В. Перельмутер<sup>1,2</sup>, В.В. Тур<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НП ООО SCAD Soft, г. Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> Брестский государственный технический университет, г. Брест, БЕЛАРУСЬ

**Аннотация:** Указывается на декларативность нормативных требований относительно обязательности выполнения нелинейных расчетов объектов строительства. Приводится перечень проблем, отсутствие решения которых мешает полноценному использованию нелинейного анализа в проектировании. Утверждается, что на настоящем этапе нелинейные расчеты можно рассматривать лишь как некоторый дополнительный инструмент, который используют в тех случаях, когда применение простых стандартных методов расчета сечений является недостаточным.

**Ключевые слова:** нелинейный анализ, конструктивная система, формат безопасности, надежность

## WHETHER WE ARE READY TO PROCEED TO A NONLINEAR ANALYSIS AT DESIGNING?

*Anatoly V. Perelmuter<sup>1</sup>, Victor V. Tur<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> SCAD Soft Ltd., Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Brest State Technical University (BSTU), Brest, BELARUS

**Abstract:** Despite of the fact that in recent years the non-linear analysis is considered as an advanced method of structural analysis, the basic requirements, which are associated with this method in actual Design Codes, are often vague and declarative without clear comments. The main problems, which must be solved for implementation of the non-linear analysis in practical design, are discussed. It was shown, that currently non-linear analysis can be considered as an additional tool, which is utilizing for limit states checking in special cases, for example, checking of the structural robustness in accidental design situation.

**Keywords:** non-linear analysis, structural system, safety format, reliability

### ВВЕДЕНИЕ

Вся логика развития строительной науки и особенности таких ее разделов как строительная механика (теория сооружений) и теория конструктивных форм, ведут к тому, что необходим учет факторов, позволяющих физически более точно определять напряженное и деформированное состояние конструктивного элемента, работающего в составе конструктивной системы. И в качестве одного из актуальных направлений исследований выдвигается проблема учета при выполнении расчетных процедур нелинейного поведения конструктивного комплекса.

Необходимость расчета конструкций на устойчивость и стремление полнее использовать возможности конструктивных материалов потребовало учета конечных перемещений и перехода к общим нелинейным зависимостям напряжений от деформаций. К этому же ведет проектирование по методу предельных состояний (*англ. Limit States Design*), поскольку именно в окрестности предельного состояния реализуется нелинейное поведение конструкций. Приступая к рассмотрению проблемы применения нелинейного анализа при проектировании конструктивных систем, введем некоторые ограничения. Во-первых, в настоя-

щей статье не будут критически рассмотрены особенности организации собственно расчетных процедур в конечно-элементных комплексах, декларирующих возможности выполнения нелинейного анализа. Хотя опосредованно, нам придется обращаться к необходимости оценивания статистических параметров ошибки моделирования для конкретного вычислительного инструмента, что непосредственно связано с принятой расчетной стратегией и уровнями аппроксимаций.

Во-вторых, обширная национальная и зарубежная литература, посвященная нелинейным проблемам строительной механики (см., например, [2, 5, 20, 9, 11, 22, 23, 24, 25, 27]), рассматривает в основном способы определения напряженно-деформированного состояния для нелинейных задач, и мало освещает вопрос о месте нелинейного анализа в процессе реального проектирования строительных конструкций, практически не затрагивая вопросы использования результатов нелинейного анализа. Изучение публикаций, относящихся к проблеме, даёт основание утверждать, что термин «**нелинейный анализ**» (англ. *Non-linear Analysis*) применяется различными авторами для обозначения двух типов задач. К задачам *первого типа* может быть отнесен нелинейный конечно-элементный анализ отдельных конструктивных элементов и простейших конструктивных систем (неразрезных балок, плоских простых рам и т.д.), в рамках которого предпринимается попытка физического моделирования поведения конструкции под нагрузкой с учетом трещинообразования, совместной работы арматуры с бетоном, нелинейных аппроксимаций диаграмм деформирования для материалов и т.д. Для этих целей применяют мощные («тяжеловесные») вычислительные комплексы, оснащенные библиотеками специальных конечных элементов. В данном случае нелинейный анализ рассматривается, главным образом, как дополнительный исследовательский инструмент, позволяющий с определенными допущениями выполнять численный эксперимент

при решении задач локального сопротивления в узлах, контактных задач и т.д., при отсутствии обоснованных аналитических моделей. Говорить о применении нелинейного анализа в описанной (как правило 3-D) постановке к реальному проектированию, по крайней мере, преждевременно.

К задачам *второго типа* можно отнести нелинейный конечно-элементный анализ идеализированных конструктивных систем, когда, например, моделирование выполняется на уровне стержневой аппроксимации.

Такой анализ ближе к практическому проектированию и позволяет оптимизировать решения для сложных статически неопределимых конструктивных систем, выполнить проверки живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, а также произвести оценивание технического состояния существующих конструкций. В данном случае моделирование нелинейной работы связывают, как правило, с врезкой различных типов пластических шарниров с заданными свойствами.

Таким образом, обращаясь к вопросам проектирования, в данной статье рассматриваются задачи, относящиеся, главным образом, ко *второму типу*.

Вместе с тем среди специалистов различного уровня бытует иллюзия полной готовности перехода к «нелинейному проектированию». Это мнение базируется на некотором локальном анализе проектной ситуации и не рассматривает в полной мере весь круг возникающих здесь вопросов.

## ДЕКЛАРАЦИЯ ИЛИ ПРАВИЛА ПОВЕДЕНИЯ

Отсутствие комплексного подхода к проблеме привело к тому, что в последние годы декларативные требования относительно применения нелинейного анализа поведения конструкций все чаще включаются в нормы проектирования строительных конструкций. Вот типичные примеры:

«5.1.2 Расчет бетонных и железобетонных конструкций (линейных, плоскостных, пространственных, массивных) по предельным состояниям первой и второй групп производят по напряжениям, усилиям, деформациям и перемещениям, вычисленным от внешних воздействий в конструкциях и образуемых ими системах зданий и сооружений с учетом физической нелинейности (неупругих деформаций бетона и арматуры), возможного образования трещин и в необходимых случаях - анизотропии, накопления повреждений и геометрической нелинейности (влияние деформаций на изменение усилий в конструкциях)» [32].

«Стальные конструкции следует, как правило, рассчитывать как единые пространственные системы с учетом факторов, определяющих напряженное и деформированное состояние, особенности взаимодействия элементов конструкций между собой и основанием, геометрической и физической нелинейности, свойств материалов и грунтов» [29].

К сожалению, нормы проектирования, которые декларируют необходимость выполнения нелинейных расчетов, не содержат указаний, как по их выполнению, так и трактовке полученных результатов расчета.

И абсолютно не ясно, о каком расчете идет речь. Ведь все проектные расчеты представляют собой двухэтапную процедуру:

- определение напряженно-деформированного состояния
- проверка прочности и устойчивости элементов конструкции.

Нормы не говорят, к какому этапу расчета относится «нелинейное требование». Правила, содержащиеся в нормах проектирования конструкций, базируются, главным образом, на классических процедурах, использующих линейно-упругий анализ для определения эффектов воздействий с последующей проверкой отдельных критических сечений с использованием глубоко нелинейных моделей сопротивления. И если речь идет только

о втором этапе расчетной процедуры, то и делать ничего не следует.

Если же речь идет о первом этапе, то остается не ясным как использовать его результаты при проверке прочности и устойчивости элементов конструкции, применять ли те же коэффициенты, которые используются по результатам линейного анализа или же вводить другие (какие?) и т.п. При этом обязательным условием остается обеспечение требуемого уровня надежности, установленного действующими нормами. Таким образом, формат безопасности при выполнении нелинейных расчетов становится одной из важнейших проблем, которой, хотя бы в общих чертах, коснемся далее.

В принципе, при применении нелинейного анализа мы не можем однозначно выделить два названных этапа<sup>1</sup>. Так, применительно к железобетонным конструкциям предлагалось рассмотрение объединенного предмета под названием «нелинейная механика железобетона».

Например, остается не совсем ясным вопрос о применимости к результатам расчета по деформированной схеме такого, например, понятия, как коэффициент продольного изгиба  $\varphi$ , используемый при проверке устойчивости сжатых стальных стержней. Ведь при определении коэффициента  $\varphi$  уже один раз использовался расчет по деформированной схеме.

## ГОТОВНОСТЬ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Внедрение нелинейных расчетов в практику проектирования стало возможным с одной стороны, благодаря интенсивному развитию компьютерной техники, а с другой — в результате разработки программных продуктов, реализующих нелинейные расчетные процедуры. Но при этом проектировщик

<sup>1</sup> Заметим, что в некоторых задачах рассматривающих только геометрическую нелинейность такая возможность сохраняется.

натывается на ряд противоречий и первым (не всегда замечаемым) в этом ряду стоит правило применения метода расчетных предельных состояний в форме метода частных коэффициентов надежности [17, 6], значения которых обоснованы сегодня линейным вероятностным анализом. При этом критерии проверок предельного состояния, сформулированные в терминах предельных усилий, могут оказаться неприменимым, когда отсутствует пропорциональность между воздействиями (нагрузками) на систему и эффектами воздействий.

В соответствии с EN 1990 [18] требования надежности при проверках предельных состояний обеспечиваются при применении следующих методов:

- полностью вероятностного метода, в соответствии с общим форматом безопасности;
- полувероятностного метода частных коэффициентов;
- расчетами, подкрепляемыми результатами испытаний.

В рамках вероятностного подхода функция плотности распределения вероятности сопротивления  $r(r)$  формулируется с использованием нелинейных моделей с учетом статистической изменчивости характеристик свойств материалов, геометрических характеристик, ошибки моделирования модели сопротивления и т.д. Безопасность оценивают опираясь на нормируемое целевое значение индекса надежности или связанной с ним вероятности отказа, значения которых содержатся в EN 1990.

Следует отметить, что вероятностное моделирование хотя и позволяет напрямую получить расчетное значение сопротивления, но является трудоемкой процедурой, требующей не только существенных затрат времени, но и соответствующей подготовки специалистов.

Полностью вероятностный подход, более детально рассмотренный, например, в наших работах [34, 13], применяется для калибровки значений частных коэффициентов, ис-

пользуемых при практическом проектировании. В большинстве случаев при нелинейных расчетах для упрощения и без того сложной процедуры используют т.н. раздельную калибровку частных коэффициентов для сопротивлений и для воздействий (при принятых коэффициентах чувствительности при одностороннем оценивании согласно ISO 2394).

Вместе с тем, как показано в [11], может оказаться неприемлемым раздельное рассмотрение моделей неопределенности воздействий и неопределенности сопротивления конструкции (рис. 1). Кроме того и сама процедура вероятностного оценивания имеет ряд неопределенностей, требующих отдельного детального обсуждения.

Поэтому практически во всех актуальных нормах проектирования для проверок предельных состояний применяют полувероятностный метод частных коэффициентов. Так, в соответствии с п.6.1(1)Р EN 1990 [6] *«метод частных коэффициентов следует применять для подтверждения того, что во всех соответствующих расчетных ситуациях ни одно из значимых предельных состояний не будет превышено, если в расчетных моделях воздействий (эффектов воздействий) и моделях сопротивлений приняты расчетные значения базисных переменных»*.

Очевидно не требует дополнительного обсуждения тот факт, что нелинейный анализ, базирующийся на применении **расчетных** значений прочностных и деформационных характеристик свойств материалов (как базисных переменных модели сопротивления), представленных экстремально низкими значениями, соответствующими назначенным нормами квантилям, которые не отражают реальных свойств материалов, в ряде случаев приводит не только к нереалистичным перераспределениям эффектов воздействий, но и формам разрушения. Кроме того, применение т.н. *«расчетных»* диаграмм деформирования материалов (с *расчетными* значениями прочностей и относительных деформаций в параметрических точках) ведет к существен-

ному искажению матрицы жесткостей конечно-элементной модели в процессе реализации итерационной процедуры нелинейного анализа. Учитывая это обстоятельство европейские нормы [18] ограничивают прямое применение метода частных коэффициентов при выполнении нелинейных расчетов.

Так, в разделе 6.2 EN 1990 содержится следующая запись: " для нелинейных расчетов и расчетов на усталость при циклических нагружениях следует применять подробные правила , изложенные в соответствующих частях EN 1991-EN 1999". Применительно к проектированию железобетонных конструкций в EN 1992 [26] (п.5.7.4 (3) Р) данное требование расширено до... общей формулировки вида: " при выполнении нелинейных расчетов следует использовать характеристики материалов, которые позволяют наиболее реально отображать жесткостные характеристики конструкции ,но учитывают погрешности (неопределенности) расчетной модели, описывающей разрушение».

Представленное требование, имеющее значение «принципа» (обозначено литерой Р), приводит, по-существу, к оцениванию средних сопротивлений, выраженных в терминах воздействий с последующим делением на некоторый глобальный частный коэффициент безопасности, учитывающий погрешности модели сопротивления. Следует отметить, что в целом ряде предварительных версий EN 1992 (EC2) условия метода частных коэффициентов были записаны отдельно для проверок, основанных на расчетах критических сечений (традиционная форма) и нелинейных расчетов конструкций( при оценивании т.н. **глобального сопротивления**).

В окончательной версии EN 1992 термин «глобальное сопротивление» обозначен только общей записью в тексте, цитированном выше. Однако в версии **fib Model Code 2010** [10] данный термин используется по-прежнему, применительно к выполнению нелинейных расчетов. В соответствии с [13] термин «**глобальное сопротивление** (англ. **global resistance**)» используется для оценива-

ния конструктивной системы на уровне более высоком, чем отдельные сечения. По сути метод глобального сопротивления является полувероятностным методом частных коэффициентов и может быть записан в форме детерминистического неравенства вида:

$$E(\sum \gamma_G G_k + \sum \gamma_Q Q_k) \leq \frac{R(f_{ym}, f_{cm}, a_{nom})}{\gamma_{GL}} \quad (1)$$

где  $R(\dots)$  – среднее значение сопротивления, выраженное в терминах прямого/непрямого воздействия и получаемое из результата нелинейного расчёта;  $\gamma_{GL}$  – глобальный коэффициент безопасности.

В изложении EN 1992 и кодекса-образца **fib Model Code 2010** правая часть неравенства (1) представлена следующим образом:

$$R_d = \frac{r(f_m, \dots, a_d)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \quad (2)$$

На первый взгляд запись вида (2) вполне логична и не вызывает отторжения. Однако, при ближайшем рассмотрении пояснений к (2), приведенных в [24], возникает вначале недоумение, а, затем и возмущение. Проблема кроется в совершенно формальном подходе принятом при калибровке частного коэффициента безопасности с целью получения некоего единого значения независимо от формы разрушения элемента. ( кстати, нечто подобное нам уже предлагалось в виде единых коэффициентов  $\dots = 1.35$  и  $\dots = 1.5$  для постоянных и переменных воздействий независимо от вида конструкций).

Детально данный вид калибровок критически рассмотрен в публикациях [28,29]. Для того, чтобы получить единое значение глобального коэффициента ( $\gamma_{GL} = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_R$ ) независимо от формы разрушения железобетонного элемента (по растянутой арматуре или сжатою бетону) авторы [27] вводят в МС2010 некую формальную величину «средней» прочности бетона, полностью ли-

Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании?

шенную какого-либо (а в первую очередь — статистического) смысла :  $f_{cm} \cong 0,85f_{ck}$  (!). Это означает, что *среднее* значение прочности бетона на 15% ниже его *5% -ной квантили*, соответствующей характеристической прочности. Но и при таком подходе *MC2010* — это единственный документ, предлагающий для обеспечения установленного формата безопасности применять к результатам нелинейного анализа единый глобальный коэффициент  $\gamma_{GL}=1.27$ . Необходимо подчеркнуть, что данный коэффициент получен, главным образом, для изгиба железобетонного элемента, учитывает изменчивость характеристик свойств материалов при постоянном значении коэффициента  $\gamma_R=1.1$ , описывающего неопределенности расчетной модели сопротивления.

Более привлекательным с методических позиций выглядит *метод оценивания коэффициента вариаций сопротивления* (т.н. **ECOV-method**), предложенный в работах проф. М. Holicki и включенный в [10]. Метод базируется на утверждении о том, что сопротивление подчиняется некоторой функции плотности распределения вероятности, из которой коэффициент вариаций может быть определен, опираясь на его средние и характеристические значения. Принимая согласно [10, 13] логнормальное распределение, коэффициент вариаций сопротивления определяют:

$$V_R = \frac{1}{1,65} \ln\left(\frac{R_m}{R_k}\right) \quad (3)$$

При установленном значении коэффициента вариаций сопротивления определяют значение глобального коэффициента:

$$\gamma_{GL} = \exp(\alpha_R \beta \cdot V_R) \quad (4)$$

Расчетное значение сопротивления в терминах воздействий определяют:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_R} \quad (5)$$

Ключевой процедурой метода является расчет среднего и характеристического значений сопротивления. Предлагается для их установления выполнять два независимых нелинейных расчета с использованием средних и характеристических значений свойств материалов:

$$R_m = r(f_{cm}, f_{ym}, \dots, a_d) \quad (6)$$

$$R_k = r(f_{ck}, f_{yk}, \dots, a_d) \quad (7)$$

Следует отметить, что в последние годы предложено ряд модификаций ECOV-метода [10, 13], которые несколько снижают его неопределенности без изменения базовой концепции.

Все представленные методы калибровок глобального коэффициента имеют общий недостаток: при калибровках не учитываются *a-priori* неизвестные неопределенности как модели сопротивления (при этом следует иметь ввиду, что для различных комплексов эти неопределенности будут отличаться), так и неопределенности модели эффектов воздействий несмотря на то, что они имеют фундаментальное значение.

Кроме того, допущение о том, что сопротивление железобетонного элемента подчиняется логнормальному (LN) распределению, скорее не отвергается, чем принимается научным сообществом. Однако, эта базовая гипотеза неоднократно подвергалась критике. Так, например, в работе [12] показано, что даже при анализе простых моделей сопротивления для железобетонных конструкций, имеющих одну преобладающую форму разрушения (например, при изгибе или осевом сжатии) фактическая функция плотности распределения вероятности сопротивления практически всегда отличается от принятой теоретической и зависит от «входных» параметров конструкции. (Следует отметить, что при подобных оцениваниях практически ни-

когда не вспоминают о различиях между теорией вероятностей и математической статистикой.) Вместе с тем, концепция ECOV-метода близка к вероятностному формату, т.к. оценивание, базирующееся на средних и характеристических значениях, относительно устойчивы. При этом обязательным условием является установление ошибки моделирования для применяемого вычислительного комплекса на фоне опытных данных, полученных для широкого спектра применя-

емых конструкций. Как показано в [13], даже при применении одинаковых аналитических описаний диаграмм деформирования материалов, близких процедурах моделирования сопротивления сечений, два широко применяемых конечно-элементных комплекса, декларирующих возможность выполнения нелинейных расчетов, дают по ECOV-методу значения глобального коэффициента, отличающиеся до 40%(!).

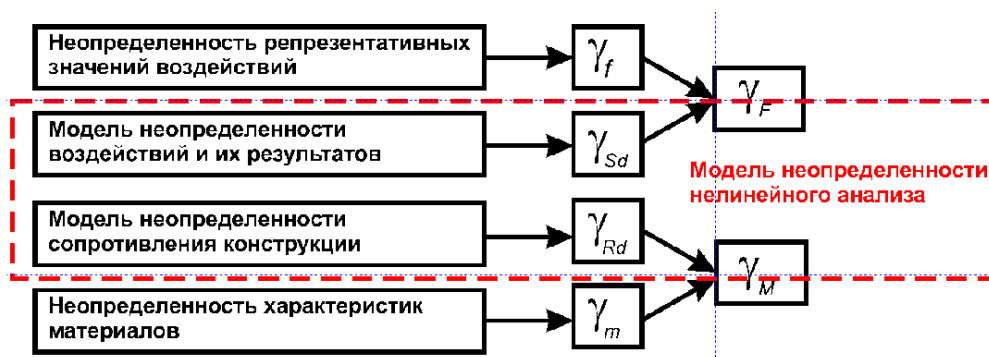


Рисунок 1. Система частных коэффициентов по EN 1990 и необходимость ее изменения.

Нужно помнить, что нормы проектирования представляют собой взаимоувязанный комплекс документов, в котором присутствует множество компромиссов, и этот комплекс создавался и отлаживался в эпоху линейного анализа. Поэтому существенное изменение такой основополагающей концепции как переход к нелинейному анализу в проектировании нельзя рассматривать изолированно. Так, например, внутри упомянутого комплекса документов некоторые нормативные документы устанавливают правила требующие именно линейного подхода к решению задачи. Одним из основных здесь являются динамические расчеты, тесно привязанные к таким понятиям линейной динамики сооружений, как частоты и формы собственных колебаний системы. Для нелинейной системы исчезает само понятие отдельных форм собственных колебаний и все основанные на этом рекомендации (имеющие в виду процедуру разложения движений по формам свободных колебаний системы), теряют свой

смысл. Как было показано выше, на данное обстоятельство обращает внимание п.6.2 [6]. Альтернативный подход, пригодный для учета нелинейных эффектов, иногда (хотя и редко) присутствует в нормах, как, например, прямой динамический расчет по инструментальным или синтезированным акселерограммам, но чаще всего о нем не только не упоминается, а он попросту никак не разработан. Типичными здесь могут быть расчеты на действие ветровых пульсаций в нормах по нагрузкам и воздействиям [30], или расчет фундаментов под машины с динамическими нагрузками в соответствующем нормативном документе [31].

Еще одной проблемой, которая никак не решается в нелинейном расчете является проблема выбора невыгодных комбинаций нагрузок (воздействий или эффектов от воздействий). В натуре практически отсутствуют сооружения, работающие только на один вариант нагружения. Обычно необходимо предусмотреть возможность появления с раз-

Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании?

личной вероятностью многих переменных нагрузок и, следовательно, требуется каким-то образом определить их расчетную комбинацию.

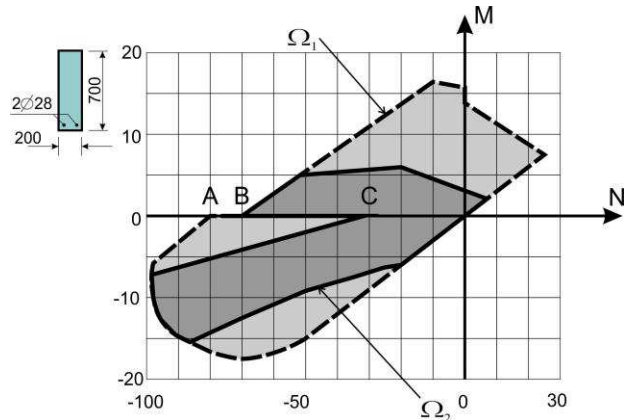
Эта задача имеет решение при линейном подходе к расчету, когда можно воспользоваться принципом суперпозиции. Если же ориентироваться на нелинейный анализ, то одновременно следует указать для какой комбинации нагрузок следует выполнять проверки прочности и устойчивости, поскольку перебор всех мыслимых комбинаций, необходимость в котором возникает при отсутствии суперпозиции, может оказаться реально невыполнимым. Такого типа указания в нормативных документах чаще всего отсутствуют.

Одновременно следует сказать, что поиск невыгодной комбинации воздействий (эффектов воздействий) основан не только на использовании принципа суперпозиций, но и на том, что критерий поиска (например, максимальное напряжение) является выпуклой функцией параметров нагружения. Здесь редко возникают сомнения, поскольку большинство из используемых критериев являются линейными.

Однако свойство выпуклости выполняется не во всех случаях. Если в качестве критериальной функции принимается несущая способность элемента с учетом всех нормативных требований (прочность, устойчивость, жесткость), то исследование ее выпуклости необходимо провести весьма тщательно. В частности, стоит убедиться, что область несущей способности рассматриваемого элемента является выпуклой, поскольку детальный анализ свидетельствует о достаточно часто встречающейся ситуации отсутствия выпуклости этой области [8].

Достаточно представительный пример представлен на рис. 2.

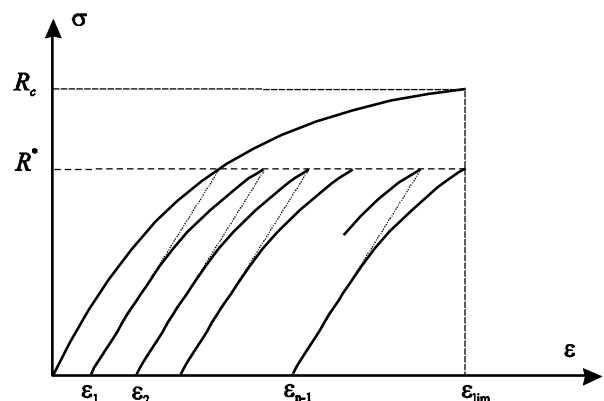
Наконец, следует упомянуть, что нелинейный анализ может быть связан с отсутствием однозначности решения (например, возможность реализации более чем одного состояния устойчивого равновесия, к которым можно прийти, используя различные истории нагружения).



**Рисунок 2.** Область несущей способности:  $\Omega_1$  - без ограничения ширины раскрытия трещин;  $\Omega_2$  - при запрете образования трещин.

Возникает вопрос о каком-то нормировании тех историй нагружения (например, только пропорциональные нагружения), которые надлежит проверить для обеспечения надежности системы.

Вопрос об истории нагружения возникает еще по одному поводу: нормативные документы по проектированию железобетонных конструкций [32] ориентированы на выполнение критерия предельной деформации, и эти критерии для одноосного напряженного состояния приведены.



**Рисунок 3.** Накопление пластической деформации.

Но нет ответа на вопрос о том, как быть в условиях многократного нагружения, когда на каждом его цикле предельная деформация не достигается, но накопленная остаточная



Таблица 1. Некоторые особенности решаемых задач.

Особенность	Линейные задачи	Нелинейные задачи
1	2	3
Зависимость перемещений от нагрузки	Перемещения линейно зависят от приложенной нагрузки	Зависимость перемещений от нагрузки нелинейная
Связь между напряжением и относительной деформацией материала	Принимается линейная зависимость между напряжением и относительной деформацией	В задачах, где рассматривается физическая нелинейность, зависимость «напряжение – относительная деформация» может являться нелинейной функцией напряжения, деформации и/или времени
Величина перемещения	Изменение в геометрии благодаря смещению считается малым, и игнорируются при проверке равновесия	Перемещения могут быть не малыми и для проверки равновесия необходимо использовать геометрию деформированного состояния
Свойства материала	Линейные упругие свойства материала обычно просто определяются.	Нелинейные свойства материала часто неизвестны, что может потребовать проведения дополнительного экспериментального исследования
Обратимость	Все деформации полностью обратимы и исчезают при разгрузке системы	После снятия нагрузки состояние системы может отличаться от исходного
Граничные условия	Граничные условия в течение расчета остаются неизменными	Граничные условия могут изменяться, например, меняются площадки контакта.
Поведение нагрузки	Направление действия нагрузок остается неизменным	При больших перемещениях и/или больших углах поворота направление действия нагрузки может следовать за искажением формы
Последовательность приложения нагрузок	Последовательность приложения нагрузок не важна, заключительное состояние от нее не зависит	Состояние конструкции может зависеть от последовательности приложения нагрузок
Комбинирование результатов	Результаты расчета на разные нагрузки допускают сложение или умножение на некоторые коэффициенты, с целью объединения расчетных состояний	Разложение задачи на составляющие воздействия и последующее объединение результатов невозможно
Исходное напряженно-деформированное состояние	Исходное напряженно-деформированное состояние несущественно	Исходное напряженно-деформированное состояние обычно требуется задать, в особенности для нелинейности, связанной с поведением материала

1	2	3
Расчетные сочетания воздействий (эффектов воздействий)	Все переменные нагрузки входят в расчетное сочетание с полным (комбинационным) значением или же не учитываются вообще	Возможной является ситуация, когда расчетному сочетанию нагрузок соответствует их частичные (неполные) значения

пластическая компонента деформаций может достигнуть этот предел [16] за  $n$  повторений, где  $n$  зависит от относительного уровня нагружения  $\eta = R^* / R_c$  (см рис. 3).

Очевидно, что здесь следует переходить к трансформированной диаграмме работы бетона. При этом следует учесть, что по некоторым сведениям (см., например, [19]), когда  $\eta \geq 0,85$  наблюдается неограниченный рост неупругих деформаций и, следовательно, вообще нельзя удовлетворить требования по ограничению деформации бетона, если только не рассматривается случай небольшого числа циклов нагружения.

Получается, что кроме всего прочего следует задавать и ожидаемое число циклов нагружения, но эти сведения обычно отсутствуют, и нормы игнорируют любые более сложные программы.

## ГОТОВНОСТЬ КАДРОВ

Не следует забывать и о том, что нелинейный анализ является более затратным и требует привлечения для его выполнения специалистов более высокой квалификации.

В частности, эти специалисты должны четко понимать те различия, которые существуют между линейным и нелинейным анализом задачи, и знать ответы, на возникающие здесь вопросы. Такие вопросы связаны с целым рядом особенностей нелинейных задач, и многие из них непривычны для специалистов, чье становление происходило под влиянием линейных решений. Некоторые (далеко не все) из указанных особенностей указаны в таблице 1.

К сожалению, опыт общения с пользователями программных систем говорит о том, что они недостаточно подготовлены к грамотному выполнению нелинейных расчетов. И здесь дело не только в недостатке образования. (к слову, по утверждению Ж.Ж. Руссо «ещё никакое образование не делало человека образованным») Ведь проектирование, в отличие от изобретательства, строится на использовании предшествующего опыта. Проектировщик всегда стремится использовать этот опыт, который увеличивает его уверенность в правильности принимаемых решений. А в рассматриваемом случае, опыт, основанный на линейных расчетах, нуждается, как минимум, в детальном анализе возможности его использования.

Ведь если в пользу результатов линейного расчета может говорить многолетний опыт его удачного применения, то переход к нелинейному расчету в какой-то мере перечеркивает этот опыт, и заменить его могут лишь хорошо проведенные исследования. К сожалению, детальность и глубина проработки таких исследований во многих случаях оставляют желать лучшего.

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ

Как следует из представленного краткого обсуждения проблемы, практически ни в одном нормативном документе мы не находим более-менее подробных правил выполнения нелинейного анализа, а тем более трактовки результатов расчетов с учетом требований надежности, принятых при традиционном

проектировании. Сформулированные положения с одной стороны просто допускают применение нелинейного анализа, но с другой - требуют сохранения общего формата безопасности, установленного ИСО 2394 и развитого в соответствующих нормах проектирования конструкций.

Здесь, нам кажется, следует сделать ещё одну оговорку: действующие нормы рассматривают, главным образом, проектирование сечений или отдельных элементов и практически не содержат правил проектирования конструктивных систем, к которым собственно и применим нелинейный анализ.

Очевидно, что создание нормативного документа, содержащего требования к проектированию на основе нелинейного анализа, является сложной и трудоёмкой работой, требующей солидного научного обоснования как в части применяемых расчетных моделей, так и правил обеспечения требуемого уровня надежности.

Очевидно, что в «массовом» практическом проектировании не следует ожидать в обозримом будущем применения нелинейных вероятностных расчетов, а базовым подходом останется метод частных коэффициентов. В данном случае калибровки частных коэффициентов должны основываться исключительно на совместном учете неопределенностей моделей сопротивлений и моделей воздействий ( применительно к нелинейному анализу, и, неопределенностей моделирования эффектов воздействий). При этом, статистические параметры ошибки моделирования для нелинейных моделей сопротивления, применяемых в различных вычислительных комплексах, могут быть установлены только на фоне результатов экспериментальных исследований, хотя бы простейших, но конструктивных систем. Для этого могут быть применены как существующие базы данных, так и выполнены дополнительные испытания.

Как следует из предварительного анализа [34], даже при прочих равных условиях ( одинаковые аналитические описания диа-

грамм деформирования материалов, равное количество арматуры, размеры сечений) различие в значениях коэффициентов вариаций сопротивления, полученные при выполнении нелинейного анализа (по *ECOV*-методу) с использованием двух широко известных КЭ комплексов, декларирующих выполнение нелинейного анализа составило до 40%. Это связано с тем, что каждый из примененных комплексов имеет свою ошибку моделирования, статистические параметры которой, зачастую, не известны даже разработчику комплекса.

Сама по себе процедура калибровки частных коэффициентов для нелинейного анализа на основе вероятностного подхода является предметом отдельного рассмотрения и требует на начальных этапах выработки некоторых научно-обоснованных (хотя бы на национальном уровне) соглашений, например, установление согласованных критериев наступления –идентификации предельного состояния при нелинейном анализе, устранение несоответствий в статистических моделях, применяемых при оценивании воздействий и сопротивлений.

Процедура нормирования воздействий, выполняемая на основе статистического оценивания выборок результатов наблюдений за определенной период отнесения – общеизвестна. Только вряд ли кто-либо даже из составителей норм может достоверно назвать какую обеспеченность имеет принятая из некоторой условной (*best of fits*) функции распределения 98%- квантиль, обозначенная как характеристическое значение воздействия.

Безусловно, требуют и дальнейшего совершенствования модели сопротивления. Применительно к железобетону - это переход от довольно подробно разработанной традиционной деформационной модели сечений к блочной модели для конструктивного элемента. Такой переход требует, в частности, продолжения сопутствующих исследований в области совместной работы армирующих элементов и бетона при различных видах нагружения. Связанным вопросом является

Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании?

моделирование параметров пластических шарниров, а в случае плоских плит – линейных пластических шарниров.

## ЧТО МОЖНО ДЕЛАТЬ СЕГОДНЯ

Означает ли сказанное выше призыв к отказу от нелинейного анализа? Конечно, нет. Практика иногда демонстрирует применение нелинейного анализа уже сегодня, не говоря уже о том, что имеется целый ряд объектов, где без геометрически нелинейного расчета попросту нельзя обойтись (вантовые покрытия, мачтовые сооружения и т.п.). Для строго оговоренных случаев нормы рекомендуют использование и некоторых приемов физически нелинейного расчета, таких, как частичное перераспределение внутренних усилий за счет пластических деформаций или же оценка предельного равновесия (см., например, п. 5.6 в [7]).

Но в более широком контексте нелинейный анализ выступает в роли вспомогательного инструмента, дополняющего и уточняющего результаты линейного расчета. Достаточно типичным является пример, представленный в работе [21], где описываются приемы нелинейного анализа работы фундаментной плиты и элементов междуэтажных перекрытий высотного комплекса «Федерация» ММДЦ «Москва-Сити» (рис. 4).

Авторы указывают, что предварительно были выполнены все расчеты, основанные на линейном подходе, в ходе которых были выявлены особенности работы конструкции и отлажена конечно-элементная модель объекта. И лишь затем проводились уточнения работы рассматриваемых фрагментов с учетом нелинейного поведения железобетона, эти уточнения касались проверки прогибов и ширины раскрытия трещин.



*Рисунок 4. Высотный комплекс «Федерация».*

Характерной является формулировка, приведенная в [15], где указывается, что линейный расчет остается самым популярным, а о нелинейном расчете сказано: «Этот метод может оказаться полезным при оценке прочности уже готовой конструкции или в случае, если необходимо убедиться в надежности многократно используемых однотипных конструкций».

## ВЫВОДЫ

1. На настоящем этапе нелинейные расчеты следует рассматривать как некоторый более совершенный, но дополнительный инструмент, который используют в тех случаях, когда применение простых стандартных методов расчета сечений является недостаточным и не дает пол-

ный информации о поведении конструктивной системы.

2. Возможно следует иметь нормативное требование, регулирующее те случаи, когда дополнительный нелинейный анализ является обязательным. При этом следует указать на возможность или невозможность его выполнения применительно к некоторой части расчетной схемы (например, проверке плит перекрытия).
3. Важнейшей проблемой при выполнении нелинейных расчетов является обеспечение требуемого общего формата надежности в соответствии с действующими нормами. Существующие методы, основанные на применении глобального коэффициента безопасности к среднему значению сопротивления в терминах воздействия, несовершенны и действуют на уровне предложений не включенных в нормы проектирования. Необходимо разработать обоснованные методы калибровки частных коэффициентов для нелинейного анализа с учетом неопределенностей как моделей сопротивления, так и воздействий (эффектов воздействий). Статистические параметры для описания ошибки моделирования сопротивления наиболее широко применяемых КЭ комплексов следует установить на фоне результатов испытаний конструктивных систем и их фрагментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Antman S.S.** Nonlinear Problems of Elasticity. New York, Springer-Verlag Inc, 2004, 835 pages.
2. **Becker A.A.** Understanding Non-linear Finite Element Analysis Through Illustrative Benchmarks. Glasgow, NAFEMS, 2001, 170 pages.
3. **Bertagnoli G, Giordanol.** etc. Safety format for the non-linear analysis of Concrete Structures. // Studies and Researches, Vol. 25, Polytechnico di Milano, Italy, 2004.
4. **Cervenka V.** (Editor). SARA – Structural Analysis and Reliability Assessment. User's manual. Cervenka consulting, Prague, 2003, 128 pages.
5. **Crisfield M.A.** Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol. 1: Essentials; Vol. 2: Advanced Topics. Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 1998, 345 pages & 494 pages.
6. EN 1990:2002. Basis of Structural Design. Brussels, CEN, 2011.
7. EN 1992:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General – Common Rules for Building and Civil Engineering Structures. Brussels, CEN, Dec. 2004.
8. **Gavrilenko I.S., Girenko S.V., Perelmutter A.V., Perelmutter M.A., Yurchenko V.V.** Load-bearing capacity region as an interactive tool of analysis in SCAD Office. // Proceeding of the METNET Seminar 2017 in Cottbus. Hämeenlinna, Häme University of Applied Sciences (HAMK), 2017.
9. **Hinton E.** Introduction to Non-linear Finite Element Analysis. East Kilbridge, NAFEMS, 1992, 220 pages.
10. Model Code 2010, First Complete Draft, Vol. 1, Vol. 2 – fib, 2010 – CH – 1015 – 293 pages.
11. **Schlune H.** Safety Evaluation of Concrete Structures with Nonlinear Analysis. Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2011, 45 pages.
12. **Schlune H., Plos M.** etc. Safety Format for the non-linear analysis of Concrete Structures. Engineering Structures, Elsevier, vol. 33, №8, August 2011.
13. **Tur V., Nadolski V.** A First Attempt to Determine the Partial Factor According to Eurocodes for Verification of the ULS of Steel Elements for conditions of the Republic Belarus. // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, №1/14(2016), pp. 44-50.

14. **Walraven J.** (Editor). “*fib Model Code for Concrete Structures 2010*”, September 2013, ISBN: 978-3-433-03061-5.
15. **Биби Э.В., Нараянан Р.С.** Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций. – М.: МГСУ, 2012. – 292 с.
16. **Гениев Г.А., Мамаева Г.В.** О физическом моделировании процесса деформирования бетона. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2002, №1, с. 23-26.
17. **ГОСТ 27751-2014.** Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2015.
18. **Григолюк Э.И., Шалашилин В.И.** Проблемы нелинейного деформирования. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
19. **Ерышев В.А., Тишин Д.С.** Диаграммы деформирования бетона при немногих повторных нагружениях. // Известия вузов. Строительство, 2005, №10, с. 109-114.
20. **Игнатъев В.А., Игнатъев А.В., Галишникова В.В., Онищенко Е.В.** Нелинейная строительная механика стержневых систем. Электрон. изд. сетевого доступа. Волгоград: ВолГАСУ, 2014. – 97 с.
21. **Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Травуш В.И.** О методах расчета высотных зданий и сооружений из монолитного железобетона на основе послойной детализации. // Современное промышленное и гражданское строительство, 2011, том. 7, №3, с. 147-163.
22. **Клованич С.Ф., Малышко Л.** Нелинейные модели материалов в строительной механике. – Одесса: ОНМУ, 2017. – 125 с.
23. **Лукаш П.А.** Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
24. **Оден Дж.** Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
25. **Петров В.В.** Нелинейная инкрементальная строительная механика. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с.
26. Проектирование конструкций из бетона. Общие правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1 (EC2) (IDT: EN 1992-1-1:2004: Design of Concrete Structures. General rules and rules for buildings), 276 pages.
27. **Рудых О.Л., Соколов Г.П., Пахомов В.Л.** Введение в нелинейную строительную механику. – М.: Издательство АСВ, 1998. – 103 с.
28. **Cervenka V.** Reliability – Based Non-linear Analysis According to fib Model Code 2010. // Structures Concrete, Journal of fib, Vol. 14., March 2013, ISSN 1464-4177, pp. 19-28.
29. **СП 16.13330.2011.** Стальные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – М.: 2011.
30. **СП 20.13330.2016.** Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-858. – М.: 2016.
31. **СП 26.13330.2012.** Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. – М.: 2012.
32. **СП 63.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями №1, 2).
33. **Стриклин Дж., Хайслер В.** Оценка методов решения задач строительной механики, нелинейность которых связана со свойствами материала и/или геометрией. // Ракетная техника и космонавтика, 1973, №3, с. 46-56.
34. **Тур В.В., Тур А.В.** Формат безопасности при выполнении нелинейных расчётов. // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР): Сборник статей Международной научно-технической

конференции, Брест, 30-31 марта 2017 г. – Брест: БрГТУ, 2017, с. 243-260.

35. **Тяпин А.Г.** Различия в нормативных подходах к расчету на сейсмические воздействия гражданских сооружений и сооружений АЭС. Часть IV. Нелинейный расчет. // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений, 2015, №3, с. 17-20.

## REFERENCES

1. **Antman S.S.** Nonlinear Problems of Elasticity. New York, Springer-Verlag Inc, 2004, 835 pages.
2. **Becker A.A.** Understanding Non-linear Finite Element Analysis Through Illustrative Benchmarks. Glasgow, NAFEMS, 2001, 170 pages.
3. **Bertagnoli G, Giordanol.** etc. Safety format for the non-linear analysis of Concrete Structures. // Studies and Researches, Vol. 25, Polytechnico di Milano, Italy, 2004.
4. **Cervenka V.** (Editor). SARA – Structural Analysis and Reliability Assessment. User's manual. Cervenka consulting, Prague, 2003, 128 pages.
5. **Crisfield M.A.** Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol. 1: Essentials; Vol. 2: Advanced Topics. Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 1998, 345 pages & 494 pages.
6. EN 1990:2002. Basis of Structural Design. Brussels, CEN, 2011.
7. EN 1992:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General – Common Rules for Building and Civil Engineering Structures. Brussels, CEN, Dec. 2004.
8. **Gavrilenko I.S., Girenko S.V., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A., Yurchenko V.V.** Load-bearing capacity region as an interactive tool of analysis in SCAD Office. // Proceeding of the METNET Seminar 2017 in Cottbus. Hämeenlinna, Häme University of Applied Sciences (HAMK), 2017.
9. **Hinton E.** Introduction to Non-linear Finite Element Analysis. East Kilbridge, NAFEMS, 1992, 220 pages.
10. Model Code 2010, First Complete Draft, Vol. 1, Vol. 2 – fib, 2010 – CH – 1015 – 293 pages.
11. **Schlune H.** Safety Evaluation of Concrete Structures with Nonlinear Analysis. Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2011, 45 pages.
12. **Schlune H., Plos M.** etc. Safety Format for the non-linear analysis of Concrete Structures. Engineering Structures, Elsevier, vol. 33, №8, August 2011.
13. **Tur V., Nadolski V.** A First Attempt to Determine the Partial Factor According to Eurocodes for Verification of the ULS of Steel Elements for conditions of the Republic Belarus. // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, №1/14(2016), pp. 44-50.
14. **Walraven J.** (Editor). “*fib* Model Code for Concrete Structures 2010”, September 2013, ISBN: 978-3-433-03061-5.
15. **Bibi Je.V., Narajan R.S.** Rukovodstvo dlja proektirovshhikov k Evrokodu 2: Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij [Guide for Designers to Eurocode 2: Design of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, MGSU, 2012, 292 pages.
16. **Geniev G.A., Mamaeva G.V.** O Fizicheskom Modelirovanii Processa Deformirovanija Betona [On the Physical Modeling of the Process of Deformation of Concrete]. // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij, 2002, No. 1, pp. 23-26.
17. **GOST 27751-2014.** Nadezhnost' Stroitel'nyh Konstrukcij i Osnovanij. Osnovnye Polozhenija [Reliability of Building Structures and Foundations. Basic Provisions]. Moscow, Standartinform, 2015.
18. **Grigoljuk Je.I., Shalashilin V.I.** Problemy Nelinejnogo Deformirovanija [Problems of Nonlinear Deformation]. Moscow, Nauka, 1988, 232 pages.
19. **Eryshev V.A., Tishin D.S.** Diagrammy Deformirovanija Betona pri Nemnogih

- Povtornyh Nagruzhenijah [Concrete Deformation Diagrams with Few Repeated Loads]. // *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2005, No. 10, pp. 109-114.
20. **Ignatiev V.A., Ignatiev A.V., Galishnikova V.V., Onishhenko E.V.** Nelinejnaja Stroitel'naja Mehanika Sterzhnevnyh Sistem [Nonlinear Structural Mechanics of Rod Systems]. Electronic edition of network access. Volgograd, VolgGASU, 2014, 97 pages.
  21. **Karpenko N.I., Karpenko S.N., Travush V.I.** O Metodah Rascheta Vysotnyh Zdanij i Sooruzhenij iz Monolitnogo Zhelezobetona na Osnove Poslojnoj Detalizacii [On the Methods for Analysis of High-Rise Buildings and Structures from Monolithic Reinforced Concrete on the Basis of Layered Detailing]. // *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 147-163.
  22. **Klovanych S.F., Malyshko L.** Nelinejnye Modeli Materialov v Stroitel'noj Mehanike [Nonlinear Models of Materials in Structural Mechanics]. Odessa, ONMU, 2017, 125 pages.
  23. **Lukash P.A.** Osnovy Nelinejnoj Stroitel'noj Mehaniki [Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics]. Moscow, Strojizdat, 1978, 204 pages.
  24. **Oden J.** Konechnye Jelementy v Nelinejnoj Mehanike Sploshnyh Sred [Finite Elements in the Nonlinear Mechanics of Continuous Media]. Moscow, Mir, 1976, 464 pages.
  25. **Petrov V.V.** Nelinejnaja Inkremental'naja Stroitel'naja Mehanika [Nonlinear Incremental Structural Mechanics]. Moscow, Infra-Inzhenerija, 2014, 480 pages.
  26. Proektirovanie Konstrukcij iz Betona. Obshhie Pravila Dija Zdanij [Design of Concrete Structures. General Rules for Buildings]: TKP EN 1992-1-1 (EC2) (IDT: EN 1992-1-1:2004: Design of Concrete Structures. General rules and rules for buildings), 276 pages.
  27. **Rudyh O.L., Sokolov G.P., Pahomov V.L.** Vvedenie v Nelinejnuju Stroitel'nuju Mehaniku [Introduction to Nonlinear Structural Mechanics]. Moscow, ASV Publishing House, 1998, 103 pages.
  28. **Cervenka V.** Reliability – Based Non-linear Analysis According to fib Model Code 2010. // *Structures Concrete, Journal of fib*, Vol. 14., March 2013, ISSN 1464-4177, pp. 19-28.
  29. **SP 16.13330.2011.** Stal'nye Konstrukcii. Osnovnye Polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNIIP II-23-81\* [Steel Structures. Basic provisions. Updated Version of SNIIP II-23-81\*]. Moscow, 2011.
  30. **SP 20.13330.2016.** Nagruzki i Vozdejstviya. Aktualizirovannaja Redakcija SNIIP 2.01.07-858 [Loads and Impacts. Updated Version of SNIIP 2.01.07-858]. Moscow, 2016.
  31. **SP 26.13330.2012.** Fundamenty Mashin s Dinamicheskimi Nagruzkami. Aktualizirovannaja redakcija SNIIP 2.02.05-87 [Foundations of Machines with Dynamic Loads. Updated Version of SNIIP 2.02.05-87]. Moscow, 2012.
  32. **SP 63.13330.2012.** Betonnye i Zhelezobetonnye Konstrukcii. Osnovnye Polozhenija. Aktualizirovannaja Redakcija SNIIP 52-01-2003 (s Izmenenijami No. 1, 2). [Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. The updated version of SNIIP 52-01-2003 (with Modifications No. 1, 2).
  33. **Striklin J., Haysler V.** Ocenka Metodov Reshenija Zadach Stroitel'noj Mehaniki, Nelinejnost' Kotoryh Svjazana so Svoystvami Materiala i/ili Geometrije [Estimation of Methods for Solving the Problems of Structural Mechanics, the Nonlinearity of Which is Related to the Properties of the Material and / or Geometry]. // *Raketnaja tehnika i kosmonavtika*, 1973, No. 3, pp. 46-56.
  34. **Tur V.V., Tur A.V.** Format Bezopasnosti pri Vypolnenii Nelinejnyh Raschjotov [The Safety Format for Performing Non-linear Analysis]. // *Teorija i praktika issledovanij i proektirovanija v stroitel'stve s prime-*



neniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR). Proceedings of International Scientific Conference, Brest, 30-31 March 2017. Brest, BrGTU, 2017, pp. 243-260.

35. **Tjapin A.G.** Razlichija v Normativnyh Podhodah k Raschetu na Sejsmicheskie Vozdejstviya Grazhdanskih Sooruzhenij i Sooruzhenij AJeS. Chast' IV. Nelinejnyj raschet [Differences in Regulatory Approaches to the Analysis of Seismic Impacts of Civil Structures and Structures of Nuclear Power Plants. Part IV. Non-linear Analysis]. // Sejsmostojkoe stroitel'stvo i bezopasnost' sooruzhenij, 2015, No. 3, pp. 17-20.

---

Перельмутер Анатолий Викторович, иностранный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), профессор, доктор технических наук; НПО СКАД Софт; 03037, Украина, г. Киев, ул. Просвещения (Освиты), 3а, к. 1,2; тел.: +38 044 249 71 93 (91), +38 044 248 71 00, +38 044 248 80 60; e-mail: avp@scadsoft.com.

Тур Виктор Владимирович, профессор, доктор технических наук, кафедра технологии бетона и строительных материалов, Брестский государственный технический университет; 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, д. 267; тел. 375 162 42-33-93; факс +375 162 42-21-27; e-mail: profsturvic@gmail.com.

Anatolii V. Perelmuter, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor of Science, Professor; SCAD Soft Ltd; office 1,2, 3a Osvity street, Kiev, 03037, Ukraine; tel.: +38 044 249 71 93 (91), +38 044 248 71 00, +38 044 248 80 60; e-mail: avp@scadsoft.com.

Victor V. Tur, Professor, Doctor of Science, Department of Concrete and Building Materials Technology, Brest State Technical University; 267, Moskovskaya Str., Brest, 224017, Belarus; tel. 375 162 42-33-93; fax +375 162 42-21-27; e-mail: profsturvic@gmail.com.