

В.В. ТУР¹, В.В. НАДОЛЬСКИЙ¹¹Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация. Расчётные классические модели сопротивления, вносимые в нормативные документы, подтверждаются большим количеством теоретических и экспериментальных исследований с последующим сравнением с существующим опытом проектирования. Однако в современных условиях быстрого совершенствования материалов и технологий всё шире используют новые оригинальные конструктивные формы, для которых расчётные модели не установлены или не имеют достаточного подтверждения. Для преодоления этих трудностей и ввиду высокой стоимости испытаний все большее распространение получают численные методы анализа (моделирования, симуляций) поведения строительных конструкций или отдельного элемента конструкции. Однако реализация проектирования стальных конструкций на основе численных моделей в первую очередь сдерживается отсутствием единых подходов к их разработке, что заключается в отсутствии верифицированных рекомендаций по назначению таких параметров, как описание диаграмм деформирования стали, размеров конечных элементов, формы и значений несовершенств и т.д. Второй важной проблемой является отсутствие формата безопасности и значений частных коэффициентов. В статье обоснованы области применения метода проектирования на основе численных моделей сопротивления, систематизированы факторы, влияющие на неопределённость значения сопротивления, и сформулированы необходимые этапы развития метода проектирования на основе численных моделей сопротивления.

Ключевые слова: численная модель сопротивления, формат безопасности, неопределённость, метод конечных элементов.

V.V. TUR¹, V.V. NADOLSKI¹¹Brest State Technical University, Brest, Belarus

THE CONCEPT OF DESIGN OF BUILDING STRUCTURES BASED ON NUMERICAL RESISTANCE MODELS

Abstract. A large number of theoretical and experimental studies confirms the classical resistance models introduced into standards. However, in modern conditions of rapid improvement of materials and technologies, new original design forms are increasingly being used, for which calculation models have not been established or do not have sufficient confirmation. To overcome these difficulties and due to the high cost of testing, numerical methods of analysis (modeling, simulations) of the behavior of building structures or a separate structural element are becoming increasingly widespread. However, the implementation of the design of steel structures based on numerical models is primarily constrained by the lack of unified approaches to development. There are no verified recommendations on the assignment of parameters of the numerical model, such as the description of steel deformation diagrams, recommendations on the assignment of the dimensions of the final elements, recommendations on the assignment of the shape and values of imperfections, etc. The second important problem is the lack of a safety format and the values of partial factors. The article substantiates the areas of application of the design method based on numerical resistance models, systematizes the factors affecting the uncertainty of the resistance and formulates the necessary stages of development of the design method based on numerical resistance models.

Keywords: numerical resistance model, safety format, uncertainty, finite element method.

Введение

Расчётные классические¹ модели сопротивления, вносимые в нормативные документы, подтверждаются большим количеством теоретических и экспериментальных исследований с последующим сравнением с существующим опытом проектирования. Однако в современных условиях быстрого совершенствования материалов и технологий всё шире используют новые оригинальные конструктивные формы, для которых расчётные модели не установлены или не имеют достаточного подтверждения. И хотя признано, и, вероятнее всего, это является правдой, что эксперименты должны лежать в основе каждой теоретической работы, становится очевидным, что некоторые аспекты, например, определённые сценарии нагружения, граничных условий и т.д., не могут быть изучены достаточно полно или вообще не могут быть воспроизведены из-за методических ограничений эксперимента. Для преодоления таких трудностей и ввиду высокой стоимости испытаний все большее распространение получают численные методы анализа (моделирования, симуляций) поведения строительных конструкций или отдельного элемента конструкции.

В проектировании строительных конструкций в большинстве случаев применение численных методов анализа распространяется на два вида задач. *«К задачам первого типа может быть отнесён нелинейный конечно-элементный анализ отдельных конструктивных элементов и простейших конструктивных систем... К задачам второго типа можно отнести нелинейный конечно-элементный анализ идеализированных конструктивных систем, когда, например, моделирование выполняется на уровне стержневой аппроксимации»* [1]. Данное исследование сфокусировано на задачах первого типа, т.е. на использовании численных моделей сопротивления для оценки поведения и значений сопротивления отдельного элемента конструкции. Можно выделить следующие случаи, когда применения численных моделей сопротивления является необходимым или, по крайней мере, полезным.

1) при отсутствии расчётных моделей сопротивления, например, при применении новых конструктивных решений и материалов, из которых они изготовлены, для которых недостаточно накоплено экспериментальных данных, выполнено мало теоретических исследований [2]. Примером таких решений могут служить балки со стеклянной стенкой и металлическими поясами, привлекающие своей эстетичностью [3].

2) при «ограниченных» расчётных моделях сопротивления, например, для относительно новых конструктивных решений, для которых подтверждена эффективность, выполнено довольно много исследований, и такие решения с каждым днём получают более широкое распространение, однако расчётные модели или плохо отражены в нормативных документах или имеют существенные ограничения по параметрам конструктивного исполнения (например, существующая модель разработана и/или подтверждена только для балок с рёбрами жёсткости) или по видам проверок (например, существуют модели проверок при действии изгибающего момента, однако отсутствуют для действия продольных усилий). Примерами таких конструктивных решений могут служить перфорированные и гофрированные элементы, эффективность которых подтверждена большим количеством исследований и даже практикой применения, однако в большинстве случаев эти решения применяются отдельными производителями с ограниченным набором конструктивных решений. Основная причина сдерживания их распространения – ограниченность моделей сопротивления. Например, для гофрированных балок есть отдельные методики расчёта с

¹ Под классическими моделями сопротивления подразумеваются модели, записанные в виде формул, математических выражений, которые представляют собой либо замкнутые решения, либо эмпирические зависимости.

трапециевидным видом гофр [4-6], для перфорированных или только с круглым, или только с шестиугольным видом отверстий [7-9].

3) при отсутствии адекватных расчётных моделей сопротивления, например, при применении в целом хорошо изученных и повсеместно распространённых конструктивных решений, однако для которых отдельные модели сопротивления очень сложны или консервативны. Примерами таких решений могут служить тонкостенные элементы при проверках с учётом потери местной устойчивости. Анализ моделей сопротивления показывает, что они очень консервативны [10, 11], что обусловлено в большей мере большим количеством параметров, влияющих на поведение элемента, и, соответственно, сложностью разработки точных моделей сопротивления.

4) при использовании большого числа однотипных элементов конструкций, запроектированных с применением классических моделей сопротивления, которые в большинстве случаев обладают консерватизмом², поэтому даже незначительное снижение уровня консерватизма модели может сопровождаться существенным экономическим эффектом без снижения надёжности.

5) для подтверждения некоторых из допущений, принятых в классических моделях сопротивления, так как численные модели сопротивления позволяют более универсально учесть всю специфику проектируемого элемента в параметрах конструктивного исполнения, задании свойств материалов, условия нагружения и т.д. [12].

6) для сокращения объёмов и сроков экспериментальных исследований. Верифицированные численные модели используют в связи с отсутствием возможности осуществления натурного эксперимента (частичное замещение реальных экспериментов) или для тщательного изучения влияний различных параметров (параметрические численные исследования).

Как видно, проектирование на основе численных моделей не предназначено для полной замены классических (формульных) моделей сопротивления в нормативных документах, а предназначено для определения сопротивления в случаях, которые не охватываются нормативными документами или в которых отсутствуют точные рекомендации для рассматриваемого конструктивного решения (см. рисунок 1).

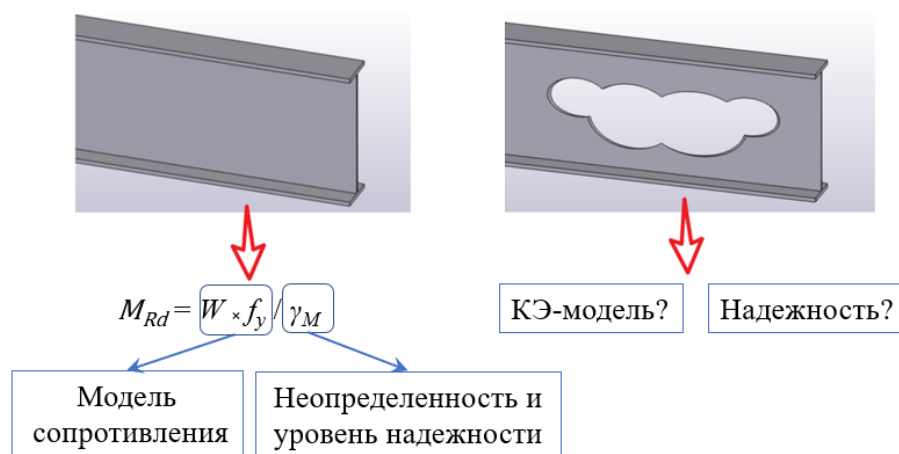


Рисунок 1 – Графическая интерпретация методов проектирования на основе классических (слева) и численных (справа) моделей сопротивления

² Консерватизм, как правило, вызван принятием допущений и упрощений для достижения простоты моделей, и это допущение очень эффективно для общей практики нормирования, и даже, в какой-то степени, оно позволяет повысить надёжность проектирования. Так, при применении простых, физически понятных формул снижается вероятность человеческих ошибок – одного из главных факторов отказа (разрушения) элементов строительного сооружения или здания.

Неопределённости численных моделей сопротивления и способы их учёта при проектировании

Научное и инженерное сообщество заинтересованы в развитии наиболее точных моделей для оценки реального поведения как проектируемых, так и существующих зданий. Очевидно, что невозможно получить идеально точную модель, поэтому любой модели присущи неопределённости³.

Безусловно, одним из основных факторов, влияющих на неопределённость численной модели, является опыт инженера, т.е. практические навыки создания и интерпретации численной модели. Следующим фактором является создание модели на основе унифицированных общепринятых научно-обоснованных базисных переменных и параметров численной модели, таких как диаграмм деформирования стали, размеров сетки и типов конечных элементов, форм и значений несовершенств и т.д. [13]. Ещё одним из факторов, влияющих на точность численной модели, считают её сложность или, как сегодня говорят, «продвинутость». Популяризируется утверждение о том, что для снижения неопределённостей следует создавать и использовать более сложные модели (например, смоделировать здание в пространственной постановке с использованием пластинчатых или объёмных элементов). Однако эта стратегия не даёт гарантий точности, а тем более гарантии повышения надёжности. Например, в случае применения КЭ модели сопротивления можно получить выигрыш в расходе материала 5-10% по сравнению с классической моделью, однако с учётом неопределённостей численной модели посредством соответствующих частных коэффициентов этот выигрыш для проектной надёжности снизится до 2-5%, при этом фактическая надёжность из-за человеческих ошибок может снизиться на несколько порядков. Поэтому следует с осторожностью относиться к попыткам усложнения моделей. Можно предположить, что «достаточный» уровень проработки модели обеспечивается стандартизированным набором параметров численной модели, а возникающие неопределённости в результате упрощений учитывают посредством частных коэффициентов. Из этого следует, что модель должна быть простой, но злоупотреблять этим нельзя. Ведь ещё Эйнштейн говорил: *«Все должно быть сделано максимально просто, но не проще»*. Это значит, что начинать стоит с самых простых моделей и постепенно их усложнять, наблюдая за поведением [14]. Следует обратить внимание, что использование более «продвинутых» моделей сопротивления с использованием стандартных частных коэффициентов может приводить к снижению уровня надёжности, см. [15, 16].

³ Неопределённость, ошибка, погрешность обычно используют как синонимы в повседневном языке. В рассматриваемом контексте приняты следующие определения: **неопределённость** определяется как потенциальный недостаток моделирования из-за недостатка знаний и/или **природной изменчивости** случайных величин (базисных переменных); **ошибка** (грубые, человеческие) определяется как признанный, непреднамеренный недостаток моделирования, который не связан с недостатком знаний; **погрешность** – как признанный недостаток моделирования, связанный с преднамеренными упрощениями. Ключевым словом в определении неопределённости является «потенциальный», что указывает на то, что недостатки могут существовать, а могут и не существовать. Недостаток знаний в первую очередь связан с отсутствием знаний о физических величинах и процессах, которые участвуют в построении модели. Определение ошибки и погрешности подразумевает, что их можно идентифицировать при исследовании. Для компьютерного моделирования термин «неопределённость» подходит больше всего, поскольку точное значение обычно неизвестно, поэтому далее по тексту будет использован термин неопределённость, при этом в ряде случаев он будет в явном виде включать понятие «ошибка» и «погрешность». Утверждение «2 плюс 2 равно 5» является ошибкой, утверждение «2.01 плюс 2.01 равно 4.00» погрешностью, утверждение «предел текучести стали равен значению X» неопределённостью, так как предел текучести – это случайная величина.

Базовым этапом в развитии метода проектирования на основе численных моделей сопротивления можно выделить анализ неопределённостей, существующих и возникающих в процессе реализации данного метода проектирования. Анализ неопределённостей направлен на выявление причин неопределённостей, оценку степени значимости неопределённости и выработку метода (способа) учёта неопределённостей для обеспечения надёжности строительных конструкций.

Основой для оценки неопределённости расчётных моделей выступают базы данных результатов экспериментальных исследований. Экспериментальное значение рассматривается как наиболее близкое к условно «истинному» значению, хотя содержит неопределённости процедуры испытания, измерений и т.д. (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Факторы, влияющие на экспериментальное значение сопротивления

Факторы	Примеры
Неопределённость испытываемого образца	Изменчивость, связанная с изготовлением определённого образца, изменчивость свойств образца в сечении и по длине элемента, наличие локальных дефектов.
Неопределённость схемы испытания, включая приложение нагрузки	Наличие не учтённых сил трения. Несоответствие условий раскрепления и условий закрепления. Идеализация схемы нагружения, скорости и интенсивности приложения нагрузки.
Неопределённость критерия отказа	В ряде случаев затруднительно сформулировать и проконтролировать качественную и количественную характеристику отказа (предельные нагрузки, деформации, прогибы), поэтому фактически в качестве результата исследования могут приводиться разные по физическому понятию значения, но при этом использоваться общий термин.
Неопределённость измерения экспериментального значения	Погрешность измерительных приборов, неучтённые факторы, влияющие на точность измерений.

Считается, что неопределённость экспериментального значения малозначима по отношению к неопределённости моделирования и изменчивости базисных переменных и ею можно пренебречь. Во многих случаях более важно установить соответствие между реальной работой конструкции и испытываемым образцом (идеализация реальной конструкции для эксперимента) и составить репрезентативную базу экспериментальных данных для рассматриваемого случая напряженно-деформированного состояния.

В общем случае статистические параметры неопределённости модели определяют эмпирическим путём, сопоставляя результаты испытаний с теоретическими расчётами [17]. В документе [18] рекомендуется два вида записи расчётных моделей, включающих базисные переменные неопределённости моделирования:

$$R(X, Y) = \theta \times r(X_i)$$

$$R(X, Y) = \theta + r(X_i)$$

где R – сопротивление, полученное по результатам испытаний;

$r(X_i)$ – сопротивление, полученное по модели сопротивления с использованием фактических (измеренных) характеристик материала и геометрических характеристик;

θ – случайная переменная с некоторым законом распределения вероятностей, характеризующая неопределённость модели сопротивления;

X – вектор базисных переменных, входящих в модель сопротивления;

Y – вектор переменных, которые не учитываются моделью сопротивления, но могут влиять на сопротивление.

Основные факторы влияющие на неопределённость значения сопротивления, полученного посредством численной модели, представлены в таблице 2. В основу систематизации и классификации положены работы [19-23].

Таблица 2 – Факторы, влияющие на значения численной модели сопротивления

Факторы	Примеры
Неопределённость физического приближения	Граничные условия и геометрия; модель материала, вид графика деформирования и значения характерных точек (учет упрочнения стали, критериев текучести и т.д.); структурные несовершенства (сварочные напряжения); геометрические несовершенства, такие как отсутствие вертикальности, прямолинейности.
Неопределённость метода конечных элементов (несовершенства дискретизации и несовершенства нелинейного анализа)	Тип (учитываемые компоненты напряжённого состояния (мембранные, изгибаемые, тонкие, толстые), количество узлов, степеней свободы в узлах, количество точек интегрирования в плоскости и по толщине) и размер конечного элемента; Способ нелинейного анализа, критерий сходимости.
Упущения в модели	Ограниченность знаний об образце и некоторых его свойствах
Ошибки использования Ошибки программирования	Не учёт несовершенств, очень крупное разбиение сетки, попытка вычислить максимальное значение сопротивления только при упругой работе материала и т.д.
Неопределённость базисных переменных	Прочностные характеристики стали, размеры профилей и проката, несовершенства и т.д.
Неопределённость критерия отказа	Качественная и количественная характеристика отказа (например, критерий «образование пластических деформаций» будет зависеть от размеров КЭ и зоны распространения).

Далее более детально представлены неопределённости сопротивления, определённого на основе численной модели сопротивления.

– Неопределённости **физического приближения** возникают из-за неопределённости в формулировке модели и преднамеренного упрощения модели. Эти ошибки относятся только к континуальной модели. Преобразование модели в дискретную форму обсуждается как часть ошибок дискретизации. Ошибки физического приближения связаны в первую очередь с выбором моделей материалов, учётом несовершенств. Источники неопределённости в физических моделях: параметры модели известны, но с некоторой степенью неопределённости; параметры модели упрощают, что вносит неопределённость; и экспериментальное подтверждение параметров модели невозможно или является неполным (т.е. либо эксперимент имеет ограничения, либо эксперимент обладает неопределённостью). Даже когда физическое явление известно с высоким уровнем точности, упрощённая модель может использоваться для удобства более эффективных вычислений.

Неопределённость физического приближения *минимизируют* путём создания требований к параметрам КЭ модели и способов (правил) обеспечения этих требований, проверочных исследований на основе экспериментальных данных, анализа чувствительности, и *учитывают* посредством применения коэффициентов надёжности.

– Неопределённость **дискретизации** является результатом замены действительной геометрии системой конечных элементов (неопределённость геометрической дискретизации по плоскости и по толщине) и результатом замены действительного распределения искомых функций в пределах КЭ их представлением с помощью аппроксимирующих функций (ошибка аппроксимации). Или, другими словами, неопределённости дискретизации возникают из-за представления физических моделей в виде алгебраических выражений в дискретной области пространства (конечно-разностный, конечный объем, конечный элемент). Дискретная пространственная область известна как сетка. Ошибки дискретизации зависят от качества и размера сетки и типа конечного элемента. По мере того, как размер сетки приближается к нулю, решение должно становиться менее чувствительным к шагу сетки и приближаться к континуальному решению (сеточная сходимость). Исследование

сходимости сетки - полезная процедура для определения уровня ошибки дискретизации. Ошибки дискретизации вызывают серьёзную обеспокоенность, поскольку они зависят от качества сетки; однако часто бывает трудно точно указать параметры качественной сеткой до начала моделирования.

Неопределённость дискретизации *минимизируют* путём создания требований к параметрам КЭ модели и способов (правил) обеспечения этих требований, проверочных исследований на основе экспериментальных данных, анализа чувствительности и сходимости сетки, и *учитывают* посредством применения коэффициентов надёжности.

– Неопределённость **способа нелинейного анализа** возникает из-за приближений и допущений итерационного и инкрементального метода решения нелинейной задачи. К этому виду неопределённости также относится погрешность итерационной сходимости (качественного и количественного критерия сходимости). Ошибки итеративной сходимости не считают значительными по сравнению с другими ошибками.

Неопределённость способа нелинейного анализа *минимизируют* путём создания требований к параметрам КЭ модели и способов (правил) обеспечения этих требований, проверочных исследований на основе экспериментальных данных, анализа чувствительности, и *учитывают* посредством применения коэффициентов надёжности.

– Неопределённость (ошибка) **использования** вызвана неточным или неправильным применением. Ошибки использования могут фактически проявляться как ошибки физического приближения, дискретизации и способа нелинейного анализа. Пользователь устанавливает параметры, используемые в моделировании, что затем определяет точность моделирования. Могут быть явные ошибки, например, неучёт несовершенств, очень крупное разбиение сетки, попытка вычислить максимальное значение сопротивления только при упругой работе материала. Ошибки могут быть не такими очевидными. Вероятность ошибок использования увеличивается с увеличением уровня опций, доступных в модели. Пользователь может намеренно ввести ошибку как попытку ускорить моделирование за счёт снижения точности. Это может быть уместно на концептуальной стадии исследования, когда требуется более общая информация с меньшей точностью. Даже на более поздних этапах могут отсутствовать надлежащие вычислительные мощности, например, при очень большой плотности сетки.

Ошибки использования *минимизируют* путём надлежащего обучения, накопления опыта, контроля качества, анализа чувствительности. Данный вид ошибок *не учитывают* посредством применения коэффициентов надёжности.

– Неопределённость (ошибка) **программного комплекса** возникает в процессе программирования и разработки программного комплекса. Это ответственность разработчиков. К этому виду ошибки также отнесена неопределённость (ошибка) компьютерного округления. Ошибки компьютерного округления возникают из-за представления чисел с плавающей запятой на компьютере и точности их хранения. При использовании современных компьютерных ресурсов числа обычно хранятся в 16-, 32- или 64-битном формате. Ошибки округления не считают значительными по сравнению с другими ошибками.

Ошибки программного комплекса *минимизируют* посредством систематического выполнения проверочных исследований программы на эталонных исследованиях и «истинных» значениях. *Не учитывают* посредством применения коэффициентов надёжности.

Оценка статистических характеристик неопределённости выступает в качестве последнего этапа обоснования и принятия моделей сопротивления, однако для КЭ моделей следует выделить один предшествующий этап (менее важный для обычных моделей). Это **этап анализа чувствительности** сопротивления (выходного параметра) к вариации входных параметров моделей и изменчивости параметров КЭ модели (предпосылок создания модели) [24]. Этот этап можно рассматривать как элемент процедуры контроля качества.

Анализ чувствительности позволяет установить, при каком разбросе входных данных сохраняется справедливость основных выводов. Оценка чувствительности является исключительно важной и необходимой процедурой.

Необходимые этапы развития метода проектирования на основе численных моделей сопротивления

Для развития метода проектирования на основе численных моделей сопротивления можно выделить два основных «блока» (см. рисунок 2), которые могут быть выполнены по отдельности, независимо друг от друга:

– «Первый блок» связан с вопросами создания КЭ модели и оценки неопределённости этих моделей.

– «Второй блок» связан с обеспечением надёжности при проверках предельных состояний с учётом неопределённостей проектирования на основе КЭ моделей и требуемых показателей конструкционной (проектной) надёжности.



Рисунок 2 – Графическая интерпретация двух «блоков» концепции проектирования на основе КЭ моделей сопротивления

В блок “создание КЭ модели сопротивления” входят следующие задачи:

– обзор, разработка требований к параметрам КЭ моделей и способов (правил) обеспечения этих требований, включая этап верификации на основе экспериментальных данных. Одни параметры будут зависеть от специфики реализации метода конечных элементов (специфика расчётного комплекса, типа конечного элемента, метода решения нелинейных уравнений), и для них важно определить наиболее универсальные и распространённые рекомендации. Другие «условно не зависят» от специфики реализации МКЭ (например, форма и значения несовершенств), и рекомендации по их назначению, главным образом, должны быть верифицированы на основании сходимости с экспериментальными данными или теоретическими предпосылками. Использовано «условно не зависят», так как по своей физической природе эти параметры не зависят от модели, однако так как рекомендации по их назначению верифицируют на КЭ моделях для определённого программного комплекса, в которые включён первый тип параметров, поэтому они, так или иначе, будут взаимосвязаны. Метод конечных элементов обладает неоспоримыми плюсами и позволяет решать задачи различного класса. Однако к основным недостаткам метода можно отнести сложность и трудоёмкость создания моделей для многих практических задач, зависимость результатов расчёта от принятых предпосылок при

создании КЭ модели (предпосылок назначения параметров КЭ модели), что, в свою очередь, влияет на трудность оценки точности получаемых результатов. Косвенный недостаток для практического применения КЭ моделирования — это большая универсальность метода и, как следствие, отсутствие регламентированных правил создания и интерпретации результатов, что приводит к ошибкам использования компьютерного моделирования конкретным пользователем. Для сопоставимости результатов и минимизации неопределённостей расчёта необходима разработка единых требований к параметрам КЭ моделей и способов (правил) обеспечения этих требований. Требования должны быть направлены на то, чтобы проектирование с использованием МКЭ было надёжным и сопоставимым по точности с инженерными расчётными зависимостями.

– создание (разработка) КЭ моделей и сравнительный анализ с экспериментальными результатами. В связи с этим сбор, составление и анализ базы экспериментальных данных, необходимой для верификации параметров КЭ моделей. Создание баз данных экспериментальных исследований является очень важным этапом в познании поведения элементов строительных конструкций под нагрузкой, и, в частности, незаменимым этапом при разработке и верификации моделей сопротивления. В эту задачу также входит оценка статистических характеристик неопределённости на основании репрезентативных экспериментальных данных. Помимо важной и необходимой цели определения статистических характеристик для калибровки частных коэффициентов, эта задача также важна, потому что можно сколь угодно долго заниматься совершенствованием КЭ моделей сопротивления в попытках достичь наилучшего совпадения с экспериментальными данными, но без анализа значений статистических характеристик и их чувствительности к изменениям параметров КЭ модели нельзя сделать вывод о достаточности степени детализации КЭ модели и нельзя выделить параметры, на которые необходимо больше всего обращать внимание, контролировать.

– сравнение точности сопротивления, определённого по нормативно закреплённым моделям и по КЭ моделям. Однако параметры точности не стоит рассматривать как аргумент в вопросе выбора модели сопротивления.

В блок «обеспечение надёжности при проектировании на основе КЭ моделей сопротивления» входят следующие задачи:

– выбор формата метода частных коэффициентов. На сегодня одним из наиболее простых и универсальных практических методов обеспечения конструкционной надёжности является метод предельных состояний с использованием метода частных коэффициентов. С помощью частных коэффициентов учитывают неопределённость базисных переменных, в том числе неопределённость моделей сопротивления, т.е. различия между реальным физическим процессом и применяемой для его описания расчётной моделью. Однако формат записи метода частных коэффициентов требует уточнений в силу специфики КЭ моделей сопротивления, поэтому *«формат безопасности при выполнении нелинейных расчётов становится одной из важнейших проблем»* [1].

– разработка общего метода оценки характеристических значений для нелинейных моделей сопротивления, включающая анализ чувствительности к способам определения характеристического значения и законам распределения, принятым для описания результирующего сопротивления. Такой метод на сегодня отсутствует, а нелинейность моделей или учитывают условно с помощью частных коэффициентов, определённых для переменных с наибольшей изменчивостью (для стальных конструкций, как правило, для предела текучести), или исключают применением линейной части зависимости сопротивления.

– разработка общего метода оценки расчётных значений для нелинейных моделей сопротивления с помощью вероятностного метода с учётом целевых уровней надёжности. В этой задаче немаловажную роль играют следующие подзадачи: выявление базисных переменных для модели сопротивления и вероятностная формулировка модели

сопротивления, вероятностная формулировка предельного состояния; обоснование вероятностных моделей эффектов воздействий и сопротивления; обоснование целевых значений вероятности отказа и, собственно, определение расчётных значений и коэффициентов чувствительности для базисных переменных.

– адаптация общего метода оценки характеристических и расчётных значений для практического применения с учётом особенностей КЭ моделей, включая разработку методики оценки коэффициентов вариации сопротивления, определённого на основе КЭ моделей, с учётом изменчивости базисных переменных и неопределённости КЭ модели. Основная сложность заключается в том, что невозможно применить классические аналитические (так как КЭ модели представлены в неявной форме) или численные (так как количество расчётов КЭ модели ограничено из-за сложности и трудоёмкости нелинейного расчёта) способы для определения коэффициента вариации.

– практическая реализация и верификация предложенных методов на примере существующих формульных моделей сопротивления. В данном случае стоит обратить внимание на элементы с выраженным нелинейным поведением.

Следует также обратить внимание, что традиционно конструкции анализируют линейными методами для определения внутреннего распределения усилий (сил и моментов), а сопротивления поперечных сечений проверяют в соответствии с расчётными формулами (моделями) сопротивления, которые часто учитывают развитие неупругих (пластических) деформаций. Следует помнить, что хотя такое разделение широко распространено в практике проектирования и нормирования, существуют случаи, для которых это допущение несправедливо, так как распределение усилий зависит от реакции отдельных элементов и их взаимосвязи в системе. Поэтому в общем случае при использовании КЭ модели сопротивления, т.е. при анализе отдельного изолированного элемента, следует ограничивать работу элемента линейной или упругой стадией либо применять для случаев аналогичным регламентированным в нормах (когда допускается считать сопротивление с развитием пластических деформаций, а усилия определять по линейному расчёту). При нелинейном поведении всей системы *«ещё одной проблемой, которая никак не решается в нелинейном расчёте является проблема выбора невыгодных комбинаций нагрузок (воздействий или эффектов от воздействий)»* [1].

Выводы

Активное развитие и внедрение компьютерных технологий приводит к всё более повсеместному и интенсивному использованию численных моделей в повседневном проектировании. Существует множество работ по численному моделированию строительных конструкций в расчётных комплексах, в которых авторы демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными результатами. Но при неоспоримых плюсах использования численных моделей остаётся много вопросов, на которые следует выработать научно обоснованные рекомендации.

Результат, полученный посредством численной модели (например, конечно элементной), не является «абсолютно» точным, а содержит неопределённости, обусловленные идеализациями и упрощениями, принятыми в процессе создания модели, а в ряде случаев может содержать ошибки. Одним из шагов минимизации неопределённостей можно выделить создание рекомендации по назначению параметров численной модели. Дополнительно в неопределённость результата численной модели вклад вносит изменчивость базисных переменных, таких как предел текучести, геометрические размеры и т.д. Поэтому для учета неопределённостей и обеспечения требуемого уровня надёжности необходимо разработать формат проверки безопасности с соответствующими значениями частных коэффициентов надёжности.

Положительная тенденция развития расчёта конструкций на основе численных моделей сопротивления все же оставляет надежду, что в скором времени будет уделено должное внимание развитию численных моделей сопротивления расчёта и разработке нормативного документа, регламентирующего процедуру компьютерного моделирования. Данное исследование направлено на выработку этапов и задач, необходимых для развития метода проектирования на основе численных моделей сопротивления. Представлен анализ неопределённостей и способов их учёта при обеспечении надёжности строительных конструкций в рамках метода предельных состояний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102.
2. Кузнецов Д.Н., Емельянов Д.И., Павленко Т.М. Силовая сэндвич-панель поэлементной сборки // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 1(24). С. 70-84.
3. Netu M., Eli M. Design of the Composite Steel-Glass Beams with Semi-Rigid Polymer Adhesive Joint // *Journal of civil engineering and architecture*. 2012. No. 6. Pp. 1059-1069.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010. No. 54(2). Pp. 79–88. ISSN 15873773.
5. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // *Вестник МГСУ*. 2021. № 6 (16). С. 676-687.
6. Макеев С.А., Силина Н.Г. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 12. С. 52-60.
7. Verweij J.G. Cellular beam-columns in portal frame structures. Delft University of Technology, 2010. 215 p.
8. Рекомендации по проектированию и применению стальных балок с перфорированной стенкой. ЦНИИПроектСтальКонструкция. М., 1991. 76 с.
9. Притыкин А.И., Мисник А.В., Лаврова А.С. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ // *Известия КГТУ*. 2016. № 43. С. 249–259.
10. Надольский В.В. Анализ расчетных моделей сопротивления локальной нагрузке стальных элементов // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2016. № 1(97). С. 167–171.
11. Мартынов Ю.С., Лагун Ю.И., Надольский В.В. Модели сопротивления сдвигу стальных элементов, учитывающие потерю местной устойчивости стенки // *Металлические конструкции*. 2012. Том 18. № 2. С. 111–122.
12. Сидоров В.Н. Бадина Е.С. Нелокальные модели демпфирования в динамических расчетах конструкций из композитных материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 66-70.
13. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 2 (100). С. 26-43.
14. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011. 732 с. ISBN 978-5-94074-710-9.
15. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // *Engineering Structures*. 2021. Pp. 1059-1069.
16. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten - Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode // *Baustatik – Baupraxis* 14. 2020. Pp. 1059-1069.
17. Крылов А.С. Экспериментальная оценка точности расчетов стальных балок при различных граничных условиях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 1(81). С. 48-55.
18. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. 2001. Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. –Date of access: 15.01.2016.
19. Надольский В.В. Мартынов Ю.С. Оценка ошибок моделей сопротивления сдвигу, принятых в EN 1993-1-5 и СНиП II-23 // *Вестник МГСУ*. 2013. Vol. 5. Pp. 7–20. doi:10.22227/1997-0935.2013.5.7-20.
20. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in Resistance Models for Steel Members // *Trans. VŠB – Tech. Univ. Ostrava, Civ. Eng. Ser.* 2015. Vol. 14. No. 2. Pp. 26–37.
21. MacLeod I. Modern Structural Analysis: Modelling Process and Guidance // Thomas Telford, Reston, VA, 2005. 206 p.
22. Sykora M. Holicky M. Assessment of Uncertainties in Mechanical Models // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 378. Pp. 13–18.

23. Weisberg M. Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World // Oxford University Press, Oxford, UK, 2013. 224 p.
24. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 176. Pp. 106-138. ISSN 0143-974X.

REFERENCES

1. Perel'muter A.V., Tur V.V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii? [Are we ready to switch to nonlinear analysis in the design?] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102.
2. Kuznecov D.N., Emel'janov D.I., Pavlenko T.M. Silovaja sjendvich-panel' pojelementnoj sborki [Power sandwich panel of piecemeal assembly] // Stroitel'naja mehanika i konstrukcii. 2020. No. 1(24). Pp. 70-84.
3. Netu M., Eli M. Design of the Composite Steel-Glass Beams with Semi-Rigid Polymer Adhesive Joint // Journal of civil engineering and architecture. 2012. No. 6. Pp. 1059-1069.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2010. No. 54(2). Pp. 79-88. ISSN 15873773.
5. Saijan S.G., Paushkin A.G. Chislennoe parametricheskoe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija dvutavrovyyh balok s razlichnymi tipami gofrirovannyh stenok [Numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams with various types of corrugated walls] // Vestnik MGSU. 2021. No. 6(16). Pp. 676-687.
6. Makeev S.A., Silina N.G. Razrabotka metodiki utochnennogo rascheta gofrobalk na obshhuju ustojchivost' [Development of a methodology for the refined calculation of corrugated rollers for overall stability] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. No. 12. Pp. 52-60.
7. Verweij J.G. Cellular beam-columns in portal frame structures. Delft University of Technology, 2010. 215 p.
8. Rekomendacii po proektirovaniju i primeneniju stal'nyh balok s perforirovannoj stenкой [Recommendations for the design and application of steel beams with a perforated wall]. CNIIProekstal'konstrukcija. M., 1991. 76 p.
9. Pritykin A.I., Misnik A.V., Lavrova A.S. Osobennosti rascheta perforirovannyh balok MKJe [Features of calculation of perforated beams of the FEM] // Izvestija KGTU. 2016. No. 43. Pp. 249-259.
10. Nadol'skij V.V. Analiz raschetnyh modelej soprotivlenija lokal'noj nagruzke stal'nyh jelementov [Analysis of calculated models of resistance to local load of steel elements] // Vestnik BrGTU. 2016. No. 1(97): Stroitel'stvo i arhitektura. Pp. 167-171.
11. Martynov Ju.S., Lagun Ju.I., Nadol'skij V.V. Modeli soprotivlenija sdvigu stal'nyh jelementov, uchityvajushhie poterju mestnoj ustojchivosti stenki [Models of shear resistance of steel elements, taking into account the loss of local stability of the walls] // Metallicheskie konstrukcii. 2012. Vol. 18. No. 2. Pp. 111-122.
12. Sidorov V. N. Bad'ina E.S. Nelokal'nye modeli dempfirovanija v dinamicheskikh raschetah konstrukcij iz kompozitnyh materialov [Non-local damping models in dynamic calculations of structures made of composite materials] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2021. No. 9. Pp. 66-70.
13. Nadol'skij V.V., Podymako V.I. Ocenka nesushhej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh jelementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovykh usilij [Evaluation of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces] // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2022. No. 2 (100). Pp. 26-43.
14. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost'ju ih analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis.]. M.: Izdatel'stvo SKAD SOFT, 2011. 732 p. ISBN 978-5-94074-710-9.
15. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // Engineering Structures. 2021. Pp. 1059-1069.
16. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten - Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode. Baustatik. Baupraxis 14. 2020. Pp. 1059-1069.
17. Krylov A. S. Jeksperimental'naja ocenka tochnosti raschetov stal'nyh balok pri razlichnykh granichnykh uslovijah [Experimental evaluation of the accuracy of calculations of steel beams under various boundary conditions] // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2019. No. 1(81). Pp. 48-55.
18. JCSS Probabilistic Model Cod. Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. 2001. Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. Date of access: 15.01.2016.
19. Nadol'skij V.V., Martynov Ju.S. Ocenka oshibok modelej soprotivlenija sdvigu, prinjatyh v EN 1993-1-5 i SNIIP II-23 [Estimation of errors of shear resistance models adopted in EN 1993-1-5 and SNIIP II-23] // Vestnik MGSU. 2013. Vol. 5. Pp. 7-20. doi:10.22227/1997-0935.2013.5.7-20.
20. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in Resistance Models for Steel Members // Trans. VŠB . Tech. Univ. Ostrava, Civ. Eng. Ser. 2015. Vol. 14. No. 2. Pp. 26-37.
21. MacLeod I. Modern Structural Analysis: Modelling Process and Guidance // Thomas Telford, Reston, VA, 2005. 206 p.

22. Sykora M., Holicky M. Assessment of Uncertainties in Mechanical Models // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 378. Pp.13–18.
23. Weisberg M. Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World // Oxford University Press, Oxford, UK, 2013. 224 p.
24. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 176. Pp. 106 - 138. ISSN 0143-974X.

Информация об авторах:

Тур Виктор Владимирович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии бетона и строительных материалов».

E-mail: profturvic@gmail.com

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».

E-mail: nadolskivv@gmail.ru

Information about authors:

Tur Viktor V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

doctor of technical sciences, professor, head of the department of Concrete Technology and Building Materials.

E-mail: profturvic@gmail.com

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions.

E-mail: nadolskivv@mail.ru