

УДК 691.5

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.В. Надольский

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

e-mail: Nadolski_V@mail.ru

Методы проектирования на основе формульных моделей сопротивления применимы для конструкций, свойства материалов и геометрические параметры которых находятся в области, для которой накоплен достаточный опыт. В современных условиях быстрого совершенствования материалов и технологий всё шире используют новые оригинальные конструктивные формы, для которых существующие методы не применимы или ограничены. Поэтому для новых конструктивных решений и материалов находят применение проектирования на основе испытаний или на основе конечно-элементного моделирования. Целью данного исследования является систематизация и критический анализ направлений применения компьютерного моделирования для проектирования строительных конструкций. В статье представлены два подхода проверки несущей способности посредством численной компьютерной модели.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, численный эксперимент, компьютерное моделирование, физические концентрации напряжений, численные концентрации напряжений.

PROSPECTS OF COMPUTER MODELING IN THE FIELD OF DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

V. Nadolski

Brest State Technical University, Republic of Belarus

e-mail: Nadolski_V@mail.ru

Design methods based on classical resistance models are applicable for structures whose material properties and geometric parameters are in an area for which sufficient experience has been accumulated. In modern conditions of rapid improvement of materials and technologies, new original design forms are increasingly being used, for which existing methods are not applicable or limited. Therefore, for new design solutions and materials, design based on tests or on computer modeling (finite element models) are used. The purpose of this study is to systematize the areas of application of computer modeling for the design of building structures. The article presents two approaches to checking the load-bearing capacity by a numerical model.

Keywords: finite element model, numerical experiment, computer simulation, physical stress concentrations, numerical stress concentrations.

Введение. Классические подходы проектирования, регламентированные в нормативных документах, основаны на большом количестве теоретических и экспериментальных исследований. Однако методы проектирования на основе формульных моделей сопротивления применимы для конструкций, свойства материалов и геометрические параметры которых находятся в области, для которой накоплен достаточный опыт. В современных условиях быстрого

совершенствования материалов и технологий всё шире используют новые оригинальные конструктивные формы, для которых существующие методы не верифицированы и не валидированы и, соответственно, не применимы. Поэтому для новых конструктивных решений и материалов допускается осуществлять проектирование на основе испытаний или на основе конечно-элементных моделей (компьютерного моделирования). При этом проектная надежность должна быть обеспечена с учетом изменчивости базисных переменных и погрешности конечно-элементной модели. Целью данного исследования является систематизация направлений применения компьютерного моделирования для проектирования строительных конструкций.

Направления применения компьютерного моделирования. Область применения компьютерного моделирования интенсивно приобретает все более широкие границы, что вызывает сложности не только в терминологическом плане, но иногда создает непонимание методологии создания компьютерной модели и необходимых процедур контроля и последующих мероприятий по учету неопределенностей и обеспечению надежности исходя из целей моделирования. Ниже приведены основные направления применения компьютерного моделирования.

Определение эффектов воздействий. Основная цель данного направления сводится к определению эффектов воздействий (усилий, перемещений, деформаций и т.д.), в том числе с учетом эффектов второго порядка. В литературе встречаются следующие названия: структурный анализ, глобальный анализ, статический и динамический расчет. В рамках этого направления наиболее часто применяют следующие типы анализа: геометрически линейный или нелинейный упругий анализ на стержневых конечно-элементных моделях с или без несовершенств. Контроль неопределенностей, как правило, отсутствует и сильно зависит от опыта инженера. Проектные неопределенности учитываются коэффициентами надежности для воздействий и эффектов воздействий.

Определение параметров модели несущей способности таких, как упругие критические силы и напряжения, которые в дальнейшем применяют в формульных проверках и которые представляют собой только промежуточные результаты анализа. Названия: определение параметров несущей способности, анализ требующий последующих формульных проверок, бифуркационный анализ, определение расчётных длин. Типы анализа: линейный упругий бифуркационный анализ на стержневых конечно-элементных моделях.

Расширение экспериментальных данных и параметрические исследования. В литературе используются следующие названия: численный эксперимент, численные симуляции, компьютерный эксперимент. Неопределенности минимальные. Как правило, модель верифицируют и валидируют в процессе калибровки (подгонки) по близкому набору данных, при необходимости учитывая факторы преобразования (масштабный и иные). Неопределенности учитываются в процессе статистической обработкой результатов, при этом погрешностью модели обычно пренебрегают.

Анализ поведения конструктивного элемента или узла (компонента). Основная цель данного направления сводится к оцениванию поведения компонента конструкции посредством численной модели, на основании которого оценивают несущую способность с учетом заданного уровня надежности, неопределенность базисных переменных и погрешности модели. Названия: проектирование на основе численных моделей несущей способности, проектирование на основе конечно-элементных моделей. Неопределенности умеренные, зависят от количества образцов для валидации модели. Обязательны процедуры верификации и валидации модели [1]. Неопределенности базисных переменных и погрешность модели учитываются коэффициентами надежности [2]. Тип анализа: геометрически и физически нелинейный анализ на оболочечных конечно-элементных моделях с несовершенствами.

Анализ поведения конструктивной системы направлен на оценивание поведения системы, в том числе модифицированной. В современной практике надежность системы после отказа отдельного элемента оценивается с точки зрения живучести к аварийным (особым) событиям. Названия: анализ живучести, расчет на прогрессирующее обрушение. Геометрически и физически нелинейный анализ на стержневых конечно-элементных моделях с несовершенствами и интегрированными моделями несущей способности конструктивного компонента (узла или элемента).

Сравнение компьютерного моделирования для прямого оценивания несущей способности и для численного эксперимента приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Сопоставление компьютерных моделей для прямого оценивания несущей способности и для численного эксперимента

| | | |
|--|--|--|
| Цель | Прямое оценивание несущей способности посредством численной компьютерной модели | Расширение экспериментальных данных и параметрические исследования. Также применяют для предварительных исследований или для сложных экспериментов, которые нет возможности провести из-за методологических ограничений физического эксперимента |
| Название | Прямое определение проектной несущей способности (проектирование на основе численных моделей несущей способности, проектирование на основе конечно-элементных моделей) | Численный эксперимент (численные симуляции, численный эксперимент, компьютерный эксперимент) |
| Результат | График деформирования, значение несущей способности, единичное значение | График деформирования, значение несущей способности, тренд (зависимость) |
| Значения параметров модели | Стандартизированные (номинальные, средние, характеристические, откалиброванные) | Измеренные, откалиброванные или статистически предсказанные (как правило, средние) |
| Уровень неопределенности, верификация и валидация модели | Неопределенности умеренные, зависят от количества образцов для валидации модели. Обязательны процедуры верификации и валидации модели [1] | Неопределенности минимальные. Как правило, модель верифицируют и валидируют в процессе калибровки (подгонки) по близкому набору данных, при необходимости учитывая факторы преобразования (масштабный и иные) |
| Параметры безопасности | Неопределенности учитываются коэффициентами надежности, учитывающими неопределенность базисных переменных и погрешность модели [2] | Неопределенности учитываются статистической обработкой результатов. Погрешностью модели обычно пренебрегают |
| Процедура | Применяют набор стандартизированных параметров численной модели на основании которых создают модель. Далее выполняется процедура верификации и валидации модели | Есть физические эксперименты, по которым калибруют численную модель (т.е. подгоняют параметры модели для наилучшего совпадения физического и численного эксперимента). Далее меняют отдельные параметры модели (как правило, связанные с конструктивным исполнением образца) для расширения данных |
| Уровень проработки модели | Геометрически и физически нелинейный анализ на оболочечных конечно-элементных моделях с несовершенствами | Геометрически и физически нелинейный анализ на оболочечных конечно-элементных моделях с несовершенствами |

В нормативных документах оценивание несущей способности посредством численной компьютерной модели может быть выполнено на основании следующих двух подходов.

1. Проверка прочности в упругой стадии, т.е. проверка напряжений. Критерием предельного состояния является равенство расчетного значения напряжения ($\sigma_{eq,Ed}$) пределу текучести стали в любой точке или зоне конструкции. За расчетное значение напряжения принимают максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу. Могут применяться дополнительные расчетные критерии, например, ограничения максимально допустимых деформаций. Для проверки предельного состояния несущей способности стальных конструкций в упругой стадии могут применяться: линейный анализ или геометрически нелинейный анализ. Линейный анализ или геометрически нелинейный анализ могут применяться или для определения эффектов воздействий, на основании которых выполняются формульные проверки, как правило стержневые модели, или для «прямой» оценки несущей способности, как правило оболочечные модели.

При данном подходе оценки несущей способности следует обращать повышенное внимание на концентрации напряжений. Концентрации напряжений проявляются в районе соединений, приложения нагрузки и опор, изменения сечения или в местах изменения регулярности сетки конечных элементов. Концентрации напряжений в стальных конструкциях являются нормальными. При применении стержневых конечных элементов концентрации напряжений не проявляются, поэтому в традиционном проектировании учитываются условно или игнорируются. Хорошей практикой считается минимизации концентраторов напряжений конструктивными мероприятиями, однако такой подход сопровождается большим субъективизмом. Если применяются модели из оболочек или объемных конечных элементов, концентрации напряжений становятся заметными, и их анализ и учет становится обязательным, особенно для проверки предельного состояния по критерию упругости или других проверок, которые основаны на анализе напряжений (проверки усталостного и хрупкого разрушения). Концентрация напряжений в численной модели обычно имеет два различных источника происхождения:

- а) физические концентрации напряжений (геометрические);
- б) численные концентрации напряжений (сингулярность).

Эти два явления обычно существуют в сочетании, и первой задачей проектировщика является отделение физических концентраций напряжений от численных. Разделение является важным, поскольку учет численных и физических концентраций напряжений различен. Если в численной модели используются острые кромки/углы, то численные концентрации напряжений невозможно полностью исключить, и они не могут быть полностью отделены от физических концентраций напряжений. Один из возможных подходов к разделению физической концентрации напряжений и сингулярности основан на определении напряжений или деформаций, независимых от размера сетки. Путем уменьшения сетки можно достичь увеличения зоны геометрической концентрации напряжений и уменьшения зоны сингулярности. Другим подходом является выполнение скругления в местах расположения острых краев / углов, чтобы избежать сингулярности. В этом случае величина радиуса закругления и размер сетки оказывают существенное влияние на величину геометрической концентрации напряжений. В настоящее время проводятся исследования, направленные на определение того, каким должен быть радиус скругления для различных применений и режимов отказа. В настоящее время не существует общих рекомендаций, поэтому в основном применяют инженерные оценки и аналитические решения. Следует отметить, что максимальные напряжения чувствительны к применяемому типу конечного элемента, настройкам элемента, форме и размеру сетки, поэтому точность модели должна быть проверена путем верификации модели.

Численными концентрациями напряжений (сингулярности) можно пренебречь, поскольку они являются результатом ошибок численной аппроксимации физических напряжений или деформаций. В зависимости от выбранного метода анализа и критериев предельного состояния геометрические концентрации напряжений следует учитывать при проверках предельных состояний, особенно для проверок предельных состояний усталости или хрупкого разрушения.

2. Проверка прочности в пластической стадии. Для проверки предельного состояния стальных конструкций в пластической стадии могут применяться: (i) физически нелинейный анализ или (ii) геометрический и физически нелинейный анализ. Геометрический нелинейный анализ следует применять для таких конструкций, где изменение геометрии может привести к значительному влиянию на распределение внутренних сил и напряжений. Нелинейный анализ следует выполнять с использованием расчетного уровня нагрузки, действующей на конструкцию. Это означает, что расчетный уровень нагрузки (или уровень нагрузки в анализируемом сочетании вариантов нагрузки) представляет собой нагрузку, которая должна быть приложена в численной модели, и эта нагрузка должна быть приложена к конструкциям путем увеличения приращений нагрузки до достижения разрушения или 100 % приложенной нагрузки. Результатом анализа будет график нагрузки-перемещения. Основываясь на оценке нелинейного графика нагрузки-перемещения, сопротивление в пластической стадии можно определить по критерию *максимальная нагрузка* или *максимальная деформация*.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

В статье обобщены направления применения численных компьютерных моделей для целей проектирования с присущими для каждой цели особенностями задания значений параметров, способов контроля и учета неопределённостей. Наиболее интересными и требующими дальнейших усилий для развития представляются компьютерное моделирование поведения конструктивного компонента (элемента или узла) и поведения конструктивной системы. Существующие нормативные рекомендации по проверкам предельных состояний на основании конечно – элементных моделей сводятся к двум подходам:

- 1) проверка прочности в упругой стадии, т.е. проверка напряжений;
- 2) проверка прочности в пластической стадии.

Обе эти проверки обладают существенным субъективизмом и критерии наступления предельного состояния очень чувствительны к формулировке конечно-элементной модели. Так, проверка прочности в упругой стадии существенно зависит о концентрации напряжений. При этом концентрации напряжений разделяют на физические (геометрические) и численные (сингулярность) концентрации напряжений, которые сложно отделить при анализе. В статье представлено описание двух подходов анализа концентраторов напряжений по природе их происхождения. Один основан на расчете независимых напряжений или деформаций от сетки конечного элемента, второй – на реализации скругления в местах расположения острых краев/углов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надольский, В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой / В.В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – Вып. 6. – С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863.
2. Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей / В.В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – Вып. 3. – С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.