

УДК 624.046.5/624.014

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-42-50

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук, доц. **В.В. НАДОЛЬСКИЙ**
(Брестский государственный технический университет)
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4211-7843>

Выполнен обзор и анализ процедур верификации и валидации компьютерных вычислительных моделей с целью предоставить концептуальную основу и руководство по реализации применительно к проектированию строительных конструкций. Представлено описание процедур верификации программного обеспечения компьютерного моделирования и компьютерных вычислительных моделей. Сформулированы основные этапы валидации для подтверждения применимости, прогностической способности и установления характеристик метрики точности компьютерных моделей. На основе анализа расчетного значения несущей способности сделан вывод о количестве экспериментов, необходимых для валидации не апробированных компьютерных моделей. В исследовании акцент сделан на описании процедур верификации и валидации для компьютерных моделей новых конструктивных решений и не стандартизированных параметров моделей. Однако приведенные здесь рекомендации также подходят и для более изученных конструктивных решений, при этом масштаб деятельности по верификации и валидации может быть уменьшен.

Ключевые слова: верификация, валидация, компьютерная модель, математическая модель, компьютерное моделирование.

Введение. Компьютерное моделирование играет все более важную роль в проектировании и оценке функционирования конструктивных систем [1–10]. Сложные и новые конструктивные элементы являются примерами, которые становятся все более и более зависимыми от компьютерных моделей и результатов моделирования для прогнозирования их функционирования, безопасности и надежности. Хотя важные решения принимаются на основе компьютерной модели, достоверность, или правдоподобие, этих моделей и результатов моделирования часто не подвергается сомнению со стороны широкой общественности, включая службы заказчиков, эксплуатирующие организации, строителей, изготовителей и, как ни странно, многих представителей органов экспертизы и проектного сообщества.

На чем основано это доверие? На сегодня существует общая склонность доверять «продвинутым» компьютерным моделям, особенно если их результаты представлены в разноцветных графических, анимационных изображениях. В большей степени это доверие основано «на вере» в знания и способности ученых и инженеров, которые разрабатывают, используют и интерпретируют модели. По этой причине все большую важность приобретают исследования в этой области – исследования по требованиям и принципам создания [11–16], по проверкам (верификации и валидации) и определению точности компьютерных моделей, а также по обеспечению надежности принятых решений с учетом неопределенностей компьютерного моделирования и базисных переменных [17; 18]. Также важность приобретает необходимость разработки нормативных документов в этой области, в том числе как инструмента помощи и защиты разработчиков компьютерных моделей, ведь от их решений сильно зависит риск обрушения строительных конструкций, следовательно, они несут постоянную ответственность за обеспечение достоверности результатов своего моделирования.

Помощь в решении проблемы достоверности результатов моделирования оказывают такие процедуры, как верификация и валидация [19–24]. С 2017 года в Российской Федерации начала выходить серия ГОСТов Р 57700, посвященных компьютерному моделированию. Так, согласно ГОСТу Р 57700.21-2020 «Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения», установлены следующие определения терминов верификация и валидация:

– проверка корректности компьютерного моделирования (*верификация* модели): совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение соответствия компьютерной реализации модели ее исходной математической или информационной модели.

– проверка адекватности компьютерной модели (*валидация* модели): совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение ее адекватности объекту моделирования.

По сути, «верификация» – это процесс сбора доказательств того, что компьютерная реализация математической модели и связанное с ней решение верны, а «валидация» – это процесс сбора доказательств того, что были выбраны соответствующие математические модели для ответа на интересующие вопросы. Желаемым результатом верификации и валидации является подтверждение модели для ее предполагаемого использования с точки зрения демонстрации прогностической способности и точности (установления численных характеристик точности), а также определение ограничений, налагаемых на применимость модели. На основании валидации компьютерной модели должны быть установлены статистические характеристики метрики точности моделирования, которая в дальнейшем наравне с изменчивостью базисных переменных должна быть учтена при обеспечении надежности проектируемой конструкции [17; 21].

Цель этого исследования – предоставить общий язык, концептуальную основу и руководство по реализации процессов верификации и валидации. Одной из основных задач является адаптация терминов и определений, принятых в отечественных нормативных документах ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения», ГОСТ Р 57700.21-2020 и зарубежных AIAAG-077-1998 «Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations», ASME V&V 10-2006 «Guide for verification and validation in computational solid mechanics», применительно к оценке несущей способности строительных конструкций. В исследовании акцент сделан на описание процедур верификации и валидации для компьютерных моделей новых конструкций. Однако приведенные здесь рекомендации также подходят и для более изученных конструкций, при этом масштаб деятельности по верификации и валидации может быть уменьшен.

Верификация. Процесс верификации оценивает соответствие компьютерной модели математической модели и оценивает численную точность компьютерной модели. Верификация предшествует валидации и состоит из двух основных составляющих: верификации программного обеспечения компьютерного моделирования и верификации компьютерной вычислительной модели.

Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования – это процесс устранения ошибок и ограничения погрешностей в численном алгоритме решения и его компьютерном коде при любых обстоятельствах, при которых будет применяться программное обеспечение. Верификация программного обеспечения фокусируется на математической корректности и конкретных реализациях дискретных алгоритмов решения. Однако кроме численной верификации программного обеспечения необходимо гарантировать поддержание качества, т.е. исключение ошибок в процессе выпуска и установки программного обеспечения, и затронуть такие вопросы, как контроль версий, конфигураций, архитектуры программного кода [25; 26]. Верификация программного обеспечения является зоной ответственности его разработчиков и поставщиков. При верификации программного обеспечения создают компьютерные модели для набора тестовых задач с известными «точными» решениями. Эти задачи обычно имеют гораздо более простую геометрию, нагрузки и граничные условия, чем реальные задачи.

Верификация компьютерной вычислительной модели сосредоточена на оценке погрешности, связанной с особенностями дискретизации (размер сетки, нерегулярность сетки и/или разные временные шаги, тип конечного элемента) и численного решения (тип решателя и его настройки) для конкретной модели. Также важной задачей верификации модели является анализ влияния дискретизации на поведение моделируемого объекта. Например, недостаточно качественная сетка в задачах потери устойчивости может исказить формы потери устойчивости [17]. Качество сетки напрямую влияет на точность и надежность численного решения. Поэтому основной этап верификации связан с анализом плотности сетки (дискретизации) [20]. В большинстве случаев для оценки этой погрешности требуется использование компьютерной вычислительной модели с разными размерами сетки, типами конечных элементов и настройками решателя. Так как предположение о гладкости решения (т.е. отсутствие сингулярности и разрывов) лежит в основе большей части существующих теоретических методов оценки этой погрешности [27–30], а это, как правило, не выполняется, то для практического применения получил распространение эмпирический подход к оценке погрешности на основе наблюдаемых скоростей сходимости. Опыт свидетельствует, что эмпирический подход надежнее, когда используется более трех размеров сеток и когда рассматриваются не точечные значения, а интегральные показатели. Исследования показывают, что если решения находятся в режиме асимптотической сходимости, то смещение от конвергентного значения не вызывает искажений в поведении элемента и стандартное отклонение погрешности моделирования практически не изменяется [17].

При верификации модели создают компьютерную модель, которая будет применяться для решения рассматриваемой задачи, т.е. с геометрией, нагрузками и граничными условиями, типичными для практических задач. Верификация модели дает количественную оценку точности (погрешности) конкретного численного решения по крайней мере относительно условного конвергентного значения несущей способности, а также должна быть дополнена инженерным суждением (критическим анализом полученных результатов) [20; 21].

Валидация. Валидация должна подтвердить/определить область применимости (использования по назначению), прогностическую способность, устранить ошибки и установить характеристики точности (погрешности и неопределенности) компьютерных результатов, в том числе с учетом экспериментальных неопределенностей. Это достигается путем сравнения результатов моделирования с эталонными данными. Для валидации перво-степенным является сравнение характера поведения(отказа) с эталонным поведением, т.е. данное сравнение направлено на оценку применимости (адекватности) модели и исключение грубых ошибок моделирования [31; 32]. Валидация начинается с выбора метрик, показывающих соответствия между результатами моделирования и эталонными данными. Метрика валидации предоставляет математическую меру разницы между двумя результатами. Чаще всего в качестве метрики применяют отношение максимальной нагрузки к эталонному значению. Однако может потребоваться метрика для измерения не точечных результатов, а для анализа поведения, например, предельного графикам нагрузка-перемещение.

Следующим этапом является оценка статистических характеристик метрики точности (неопределенностей и погрешностей) моделирования для предполагаемого использования, чтобы впоследствии учесть их при обеспечении надежности [17]. Вердикт о валидации не имеет смысла без указания значений характеристик точности моделирования, так как невозможно выработать стратегию обеспечения надежности [21]. Разработчик модели должен дать общую количественную оценку точности (погрешности и неопределенности) результатов моделирования. Погрешности обусловлены преднамеренными упрощениями, такими как размер конечных элементов,

диаграмма деформирования стали, установленная погрешность численного решения и т.д. Неопределенности обусловлены внутренней изменчивостью физических параметров модели или недостатком знаний о параметрах или о концептуальной модели.

Для строительных конструкций можно выделить две крайние ситуации. Первая характеризуется наличием хорошо изученных видов конструкций, для которых существуют формульные классические модели сопротивления (позволяющие получить не только значение несущей способности, но и поведение элемента под нагрузкой) и накоплен достаточный опыт их применения. В этом случае валидация может косвенно быть подтверждена на основании общепринятых формульных моделей и общепризнанных знаний о поведении элемента (хотя нерешенным вопросом остается оценка характеристик точности). Концептуально данный случай соответствует текущей ситуации для подтверждения валидации (адекватности, применимости) формульных моделей сопротивления, т.е. когда инженер на базе знаний и опыта подтверждает область применения формульной модели. Однако применение компьютерных моделей также целесообразно и эффективно для неизученных видов конструкций, в результате чего может возникнуть вторая крайняя ситуация. В данном случае ситуация ничем не отличается от сложившейся практики исследований новых конструкций, когда проводят теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых разрабатывается и подтверждается модель.

Также возможны более благоприятные ситуации, например, когда существуют упрощенные модели (полученные/подверженные на основании эксперимента), имеющие принципиально более узкую область применения, нежели полноценные компьютерные модели. Как правило, формульные модели целенаправленно упрощены для простоты использования, и поэтому могут только подтвердить некоторое значение несущей способности на графике деформирования, но не дают никакой гарантии правильности решения на всех этапах деформирования. При этом принципиальные зависимости результатов моделирования от параметров модели сохраняются, однако полноценную процедуру валидации невозможно выполнить только на основании этих знаний и опыта, и, соответственно, требуются экспериментальные данные.

Как итог вышеприведенных рассуждений валидация может быть выполнена на основании:

- экспериментальных данных, что позволяет проверить применимость и точность модели (наиболее правильный путь, но и более затратный);
- формульных моделей сопротивления (необходимо знать и понимать основы модели и статистические характеристики погрешности), но при этом должен быть стандартизированный набор параметров компьютерной модели, чтобы можно было оценить характеристики точности.

Валидация на основе экспериментальных данных заключается в качественном и количественном сравнении результатов моделирования и экспериментальных результатов, полученных на основе надлежащим образом спланированных экспериментов. В большинстве случаев оценка прогностической способности компьютерной модели во всем диапазоне ее предполагаемого использования не может основываться исключительно на существующих данных. Эксперименты могут иметь множество целей, следовательно, набор измерений во многих экспериментах может отличаться от измерений, необходимых для валидации модели. Существующие данные могут не в полной мере отражать предполагаемое использование модели, а также часть данных может понадобиться при калибровке компьютерной модели во время ее разработки. В таких случаях требуются новые валидационные эксперименты. Задача состоит в том, чтобы определить и провести серию экспериментов, которые обеспечат достаточно строгую валидацию модели. Если модель предсказывает результаты эксперимента, то она считается валидированной для использования по назначению.

Для валидационного эксперимента все входные (геометрия испытываемого объекта, начальные и граничные условия, приложенные нагрузки) и выходные (характеристики поведения) параметры модели должны быть описаны как можно более полно и точно. В идеале экспериментальные данные должны обеспечить как можно больше информации и оставить как можно меньше неизвестных параметров, требуя минимального количества предположений со стороны разработчика валидируемой компьютерной модели. Подробное описание условий испытаний помогает разработчику модели понять связь между выходными данными эксперимента и выходными данными модели. В некоторых случаях разработчику модели может потребоваться создать модель, включающую такие части, как испытательное оборудование или измерительные приспособления, чтобы более точно спрогнозировать результаты.

Когда некоторые значимые параметры не измерялись, разработчик модели может выполнить несколько вычислений для сравнения с экспериментами, изменяя значения этих параметров. Однако разработчик модели не может слишком произвольно выбирать значение этих параметров. Если результаты моделирования с использованием реалистичных диапазонов параметров находятся в согласии с экспериментом, тогда модель может быть заявлена валидированной. Выбор количества измерений должен быть основан в первую очередь на представляющих интерес характеристиках поведения. По возможности эти характеристики следует измерять напрямую, а не получать из других измерений. Например, если интересующей характеристикой является деформация, то, вероятно, лучше использовать тензометрический датчик вместо измерений перемещений.

В большинстве случаев неопределенностью валидационных экспериментов пренебрегают, однако это допущение должно быть тщательно проанализировано. Один из подходов уменьшения неопределенностей – дополнительные испытания для разных образцов. В этом случае разброс может быть обусловлен различиями

в геометрии образцов, свойствах материала, в установке образцов для испытания, в датчиках, в установке датчиков (местоположение и ориентация) и в сборе данных. Другой подход заключается в повторении эксперимента с использованием того же образца. Этот подход может быть применен, если стоимость эксперимента высока или доступность экспериментальных образцов ограничена. Также этот подход может быть полезен для разделения влияния факторов. Еще один подход для получения резервных измерений заключается в размещении аналогичных датчиков в симметричных местах (если эксперимент обладает достаточной симметрией) для оценки разброса. Данные этих датчиков также могут быть применены для подтверждения ожидаемой симметрии.

Набор параметров компьютерной вычислительной модели, подтвержденный в процессе верификации и валидации, должен последовательно применяться во время решения рассматриваемой проблемы.

На примере компьютерной конечно-элементной модели, применяемой для оценки изгибающего момента консольной балки, рассмотрим различия в понятиях верификации и валидации. Верификация связана с проверкой соответствия между математической и численной моделью исследуемого объекта. Математическая модель (аналитическое решение) для изгибающего момента $M = qL^2/2$ – в случае распределенной нагрузки, или FL – в случае сосредоточенной. Численная модель – стержневая (для поставленной задачи наиболее оптимальна), пластинчатая (вероятнее всего избыточная) или объемная (абсурдно избыточная) – приносит погрешности за счет дискретизации решения, типа конечного элемента и т.д. Валидация связана с проверкой соответствия между реальным объектом и компьютерной моделью. В реальности закрепление обладает конечной жесткостью, что вносит неопределенности, поэтому в процессе валидации можно выяснить, в какой степени применение полностью жесткого закрепления балки отражает реальное поведение.

Достоверность результатов компьютерного моделирования повышается с увеличением количества доступных эталонных данных для валидации. Для новых конструктивных решений и не стандартизированных параметров компьютерной модели в качестве эталонных данных могут выступать только результаты физических испытаний. Учитывая то, что физические испытания несут значительные финансовые и временные затраты, возникает вопрос о минимально достаточном количестве экспериментов для оценки точности компьютерной модели. Для ответа на этот вопрос проанализируем влияние количества экспериментальных образцов на неопределенность и расчетное значение несущей способности.

Рассмотрим базовый случай, когда среднее значение и стандартное отклонение метрики точности компьютерной модели вычисляются на основании сравнения с n результатами экспериментов, при этом значение коэффициента $k_{n,p}$, учитывающего уровень надежности, статистическую неопределенность и наличие предварительной информации о значении стандартного отклонения генеральной совокупности, вычисляется в предположении «стандартное отклонение неизвестно» [21]. Данный случай возможен при n равном 4 и более экспериментальных результатов, так как при меньшем количестве статистическая неопределенность стандартного отклонения очень большая или его просто невозможно вычислить. Для количественного примера примем, что вычисленный по n результатам физических испытаний коэффициент вариации метрики точности компьютерной модели составляет 5%, 7%, 9% или 11%, что соответствует большинству практических задач [17; 31–34]. Неопределенность несущей способности из-за изменчивости базисных переменных примем 7% как наиболее усредненный показатель [18; 35–38]. Значения коэффициента надежности представим в следующем виде:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \mu_\theta \cdot \mu_r / R_d, \quad (1)$$

где $\mu_r \approx r_{\min}(\underline{X}_m)$ – значение несущей способности, полученное на основе численной модели при средних значениях базисных переменных;

μ_θ – среднее значение метрики точности моделирования;

R_d – расчетное значение несущей способности, вычисленное согласно исследованию [21].

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

Второй случай рассмотрим в предположении, что наибольшее значение коэффициента вариации априорно известно, тогда значения коэффициента надежности вычислим при коэффициенте $k_{n,p}$ для случая «стандартное отклонение известно» [21]. На основании исследований [17; 31–34] можно предположить наиболее консервативные значения параметров метрики точности. Исследования показывают, что для моделей стальных конструкций коэффициент вариации V_θ не превышает 12%. При больших значениях коэффициента вариации V_θ происходит явное отклонение от поведения валидируемого образца и такие модели не проходят валидации.

Дополнительно, чтобы учесть уверенность в оценивании среднего значения μ_θ и коэффициента вариации V_θ метрики точности с каждым новым результатом валидации, фактически вычисленные значения параметров будем обновлять Байесовским методом уточнения статистических характеристик [39]. В качестве предварительной (априорной) информации для статистических характеристик примем наиболее консервативные значения, равные $V_\theta' = 12\%$ и $\mu_\theta' = 0,95$; $n' = 1,0$; $v' = 1,0$. Тогда с помощью уравнений (25–28), приведенных в работе [18], можно обновить значения V_θ и μ_θ . Соответственно, среднее значение метрики точности компьютерной модели вычисляется на основании сравнения с экспериментальными данными, а стандартное отклонение принимается консервативным на основании априорной информации с обновлением по количеству экспериментальных результатов,

и значение коэффициента $k_{n,p}$ вычисляется в предположении «стандартное отклонение известно» [21]. Таким образом, выполнена оценка верхнего значения коэффициентов надежности $\gamma_{R,верх}$ (см. рисунок 1). Аналогичным образом вычислено нижнее значение коэффициента надежности $\gamma_{R,ниж}$, но для расчета коэффициент вариации принят равным 5% (см. рисунок 1).

Как видно из представленных результатов исследования, для проектирования новых конструктивных решений на основе компьютерных вычислительных моделей необходимо по крайней мере 4 результата валидации. При этом при характерных статистических характеристиках метрики точности для стальных конструкций наибольший эффект за счет увеличения количества валидации возникает в диапазоне от 4 до 6 результатов. В отдельных случаях возможна валидация на основе 2 и 3 экспериментальных результатов, но тогда следует применять консервативные значения частных коэффициентов (по верхней границе), при этом прогностическая способность модели становится существенно зависимой от опыта и приобретает более интуитивный характер, чем математически обоснованный.

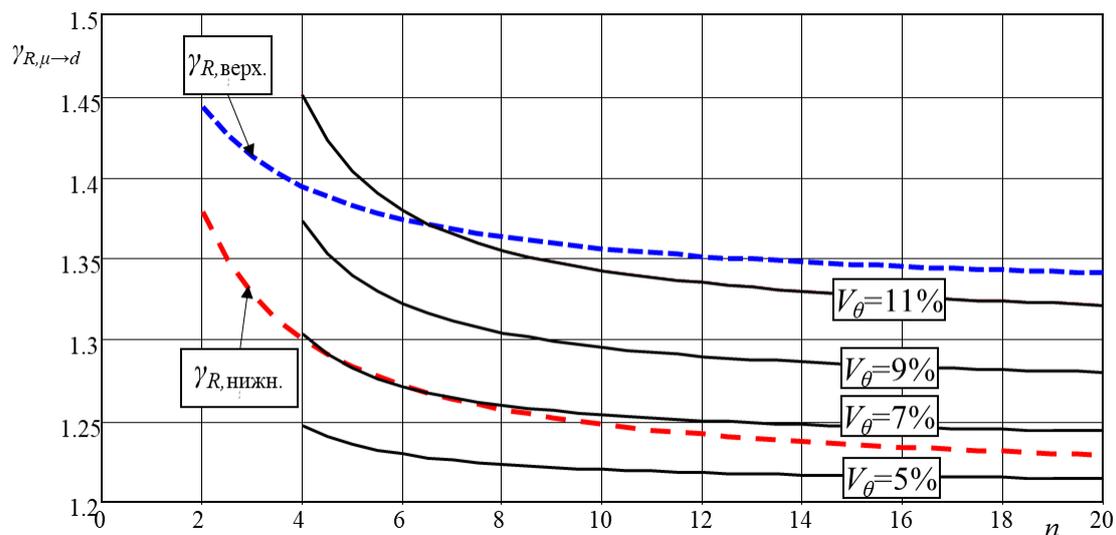


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента надежности от количества экспериментальных результатов

Заключение. В исследовании представлены принципы проверки и повышения достоверности моделей компьютерного моделирования для оценки несущей способности строительных конструкций. Основные результаты представлены ниже:

- *верификация программного обеспечения* направлена на устранение ошибок и ограничение до приемлемо низкого уровня погрешностей в численном алгоритме решения и компьютерном коде при любых обстоятельствах, при которых допускается применять программное обеспечение. Верификация программного обеспечения выполняется на основе сравнения с тестовыми задачами с известными аналитическими, полуаналитическими или высокоточными численными решениями. Разработчики и поставщики программного обеспечения должны брать на себя ответственность за верификацию программного обеспечения.

- *верификация компьютерной вычислительной модели* направлена на устранение ошибок и определение погрешностей, связанных с дискретизацией и численным решением для конкретной модели, набора ее параметров. Верификация модели выполняется главным образом на основании анализа сходимости или сравнения с результатами расчетов, полученными посредством других алгоритмов решения. Разработчик модели несет ответственность за верификацию модели. Верификация должна предшествовать валидации.

- *валидация* направлена на устранение ошибок и подтверждение применимости, прогностической способности (способность модели предсказывать поведение конструкции) компьютерной модели и на оценку ее точности. Валидация специфична для конкретной компьютерной модели для конкретного предполагаемого использования. Валидация выполняется на основании качественного (цель – подтвердить поведение) и количественного (цель – установить точность) сравнения с эталонными данными. В качестве эталонных данных могут выступать экспериментальные данные (главным образом для неизученных, новых конструктивных решений и их условий эксплуатации) или валидированные формульные модели сопротивления (главным образом для изученных конструктивных решений и их условий эксплуатации). Валидация на основании общепринятых формульных моделей и общепризнанных знаний о поведении элемента не может рассматриваться как универсальная стратегия, но может рассматриваться как дополнительная информация, требуя консервативных подходов к назначению параметров надежности. Валидация также является основой для оценки статистических параметров метрики точности (неопределенности и погрешности) моделирования и для дальнейшего назначения способа учета неопределенности при обеспечении проектной надежности;

– анализ количества экспериментов, необходимых для валидации не апробированных компьютерных моделей, показал, что для проектирования новых конструктивных решений необходимо по крайней мере 4 результата валидации, при этом наибольший эффект за счет увеличения количества валидации возникает в диапазоне от 4 до 6 результатов. В отдельных случаях возможна валидация на основе 2 и 3 экспериментальных результатов, но тогда следует вводить дополнительный консерватизм в значения частных коэффициентов, а прогностическая способность модели становится существенно зависимой от опыта и приобретает более интуитивный характер, чем математически обоснованный. Валидационные эксперименты напрямую вносят вклад в доверие к модели. Однако трудно количественно оценить потребность в новых экспериментах. Даже при наличии данных для валидации остается проблема в создании основы для количественной оценки прогностической способности модели для условий, отличных от валидационных экспериментов. Это может быть особенно проблематичным, когда данные экспериментов недостаточно репрезентативны или испытания невозможны.

Верификация и валидация усложняются отсутствием соответствующих тестовых решений и эталонных данных. Опасность заключается в том, что без надлежащей верификации любое отклонение в способности модели к прогнозированию не может быть связано ни с точностью реализации компьютерной модели (роль верификации), ни с неадекватным представлением физики, механики (роль валидации), особенно при малом количестве эталонных данных. Таким образом, чтобы компьютерное моделирование могло в дальнейшем эволюционировать в более надежную методику, существует потребность в создании баз данных для верификации и валидации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 80. – P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders / B. Kövesdi, J. Alcaine, L. Dunai et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 103. – P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako et al. // Proceedings of conference Modelling in Mechanics. – 2022. – P. 11–21.
4. On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako et al. // Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. – 2023. – Vol. 23(1). – P. 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
5. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research / S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2019. – Vol. 158. – P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment-shear interaction of stiffened plate girders – Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 85. – P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63. – P. 985–996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010.
8. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Приклад. науки. Стр-во. – 2018. – № 16. – С. 121–130.
9. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // Стр-во и реконструкция. – 2022. – № 6(104) – С. 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
10. 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, Iss. 3. – P. 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102.
11. Матвеев, А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных балок сложной формы // Решетневские чтения. – 2018. – Ч. 1. – С. 568–569.
12. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженер. вестн. Дона. – 2019. – № 4(55). – С. 54–63.
13. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Стр-во и реконструкция. – 2023. – № 1(1). – С. 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
14. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS / Т.М. Мартыненко, С.А. Пронкевич, И.М. Мартыненко и др. // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 147–151.
15. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical / А.В. Фролов, М.В. Воронов, А.А. Медельцев и др. // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2022. – № 11. – С. 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76.
16. Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12(5). – С. 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.
17. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Стр-во и реконструкция. – 2023. – № 3(107). – С. 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
18. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18(6). – С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863.
19. Бритов Г.С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2(63). – С. 75–82.
20. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9(750). – С. 100–115. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

21. Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18, вып. 3. – С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
22. Чарикова И.Н. Особенности математического моделирования балочных систем в интерактивной образовательной среде // Пром. и гражданское стр-во. – 2017. – № 11. – С. 112–116.
23. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД / Ю.М. Темис, А.В. Соловьева, Ю.Н. Журенков и др. // Авиаци. двигатели. – 2021. – № 1(10). – С. 5–16. DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5.
24. Цифровые двойники – платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей / А.В. Сальников, М.В. Гордин, Ю.Н. Шмотин и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 60–72. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72.
25. Борисов Е.А., Теплов А.В. Особенности проверки качества программного обеспечения // Наука через призму времени. – 2020. – № 1(34). – С. 27–29.
26. Караханова А.А., Маликова А.С. Рассмотрение принципов проведения тестирования программного обеспечения // Синергия Наук. – 2019. – № 41. – С. 264–270.
27. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Об апостериорной оценке нормы погрешности численного расчета на ансамбле независимых решений // Сиб. журн. вычисл. математики. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301.
28. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Оценка локальной погрешности аппроксимации по набору численных решений // Сиб. журн. вычисл. математики. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 343–358. DOI: 10.15372/SJNM20220401.
29. Белов А.Н., Туровцев В.В., Орлов Ю.Д. Оценка погрешностей численного решения торсионного уравнения Шреддингера в базисе функций Матье // Вычисл. технологии. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 33–43. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.003.
30. Гришанов А.Н. Метод определения апостериорных оценок погрешностей в расчетах композитных оболочек с применением многосеточных конечных элементов // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 16–25. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-16-25.
31. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Стр-во и реконструкция. – 2022. – № 2(100). – С. 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.
32. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестн. МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 6. – С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706.
33. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 199. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
34. Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties / L. Silva, C. Rebelo, D. Nethercot et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – Vol. 65(4). – P. 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
35. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products // Journal of Civil Engineering and Management. – 2009. – Vol. 15(3). – P. 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307.
36. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31. – P. 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
37. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 96. – P. 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065.
38. Kala Z., Kala J. Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements and Nonlinear Computation Methods // AIP Conference Proceedings. – 2011. DOI: 10.1063/1.3636974.
39. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // Вестн. МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 5. – С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607.

REFERENCES

1. Graciano, C. & Ayestarán, A. (2013). Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, (80), 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi, B., Alcaine, J., Dunai, L., Mirambell, E., Braun, B. & Kuhlmann, U. (2014). Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*, (103), 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Nadolski, V., Marková, J., Podymako, V. & Sýkora, M. (2022). Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics*, 11–21.
4. Nadolski, V., Marková, J., Podymako, V. & Sýkora, M. (2023). On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders. *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*, 23(1), 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
5. Kovacevic, S., Markovic, N., Sumarac, D. & Salatic, R. (2019). Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*, (158), 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur, F. & Beg, D. (2013). Moment-shear interaction of stiffened plate girders – Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*, (85), 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Estrada, I., Real, E. & Mirambell, E. (2007). General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal. *Journal of Constructional Steel Research*, (63), 985–996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010.
8. Nadol'skii, V.V. (2018). Raschet i konstruirovaniye flantsevogo soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh tsentral'nomu rastyazheniyu [Calculation and Construction of the Flange Connection of Rectangular Elements Subjected to the Axial Tension]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F: Priklad. nauki. Str-tvo [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied sciences]*, (16), 121–130. (In Russ., abstr. in Engl.).

9. Tur, V.V. & Nadol'skii, V.V. (2022). Kontseptsiya proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii na osnove chislennykh modelei soprotivleniya [The Concept of Design of Building Structures Based on Numerical Resistance Models]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(104), 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Perel'muter, A.V. & Tur, V.V. (2017). Gotovy li my pereiti k nelineinomu analizu pri proektirovanii [Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing?]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 13(3), 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Matveev, A.D. (2018). Metod mnogosetochnykh konechnykh elementov v raschetakh kompozitnykh balok slozhnoi formy [Multigrid finite element method in the calculations of composite beams of irregular shape]. In *Reshetnevskie chteniya: v 2 ch. Ch. 1*. Krasnoyarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva. (In Russ.).
12. Ustimenko, E.E. & Skachkov, S.V. (2019). Metod konechnykh elementov modeli tonkostennogo profilya s polkami ob"emnogo fasonnogo elementa. *Inzhener. vestn. Dona*, 4(55), 54–63. (In Russ.).
13. Nadol'skii, V.V. (2023). Parametry chislennykh modelei nesushchei sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Parameters of Numerical Resistance Models for Steel Elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 1(1), 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Martynenko, T.M., Pronkevich, S.A., Martynenko, I.M. & Maksimovich, V.A. (2022). Analiz prochnosti uzlovykh soedinenii pri razlichnykh ispolneniyakh konstruksii na osnove modelirovaniya v srede ANSYS [Strength Analysis of Junction Joints for Different Design Performances on the Basis of Simulation in the Ansys Software]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii*, (15), 147–151. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Frolov, A.V., Voronov, M.V., Medel'tsev, A.A., Sedova, K.A. & Shapovalov, P.A. (2022). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh soedinenii v ANSYS Mechanical [Modeling the stress-strain state of welded joints in ANSYS Mechanical]. *Izv. TulGU. Tekhn. nauki [Izvestiya TulGU. Technical science]*, (11), 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Palaev, A.G., Nosov, V.V. & Krasnikov, A.A. (2022). Modelirovanie raspredeleniya temperaturnykh polei i napryazhenii v svarnom soedinenii s primeneniem ANSYS [Simulating Distribution of Temperature Fields and Stresses in Welded Joint Using ANSYS]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov [Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products]*, 12(5), 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Nadol'skii, V.V. (2023). Statisticheskie kharakteristiki pogreshnosti chislennykh modelei nesushchei sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Statistical Characteristics of the Numerical Model Uncertainties for Steel Elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 3(107), 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Nadol'skii, V.V. (2023). Koeffitsienty nadezhnosti dlya nelineinykh modelei nesushchei sposobnosti balok s gibkoi stenкой Realiability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 18(6), 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Britov, G.S. (2013). Verifikatsiya, validatsiya i testirovanie komp'yuternykh modelei lineinykh dinamicheskikh sistem. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2(63), 75–82. (In Russ.).
20. Sal'nikov A.V., Frantsuzov, M.S., Vinogradov, K.A., Pyatunin, K.R. & Nikulin, A.S. (2022). Verifikatsiya i validatsiya komp'yuternykh modelei [Digital Simulation Verification and Validation]. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, 9(750), 110–115. (In Russ., abstr. in Engl.).
21. Nadol'skii, V.V. (2023). Otsenka raschetnogo znacheniya nesushchei sposobnosti stal'nykh elementov, proektiruemykh na osnove chislennykh modelei [Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 18(3), 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Charikova, I.N. (2017). Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya balochnykh sistem v interaktivnoi obrazovatel'noi srede. *Prom. i grazhdanskoe str-vo*, (11), 112–116. (In Russ.).
23. Temis, Yu.M., Solov'eva, A.V., Zhurenkov, Yu.N., Startsev, A.N., Temis, M.Yu., Yakushev, D.A., ... Drozhzhin, M.V. (2021). Tsifrovoy dvoynik ustanovki dlya ispytaniy tsentrobezhnogo kompressora malorazmernogo GTD [Digital twin of rig for testing of centrifugal compressor for small-scale gas turbine engine]. *Aviats. dvigateli [Aviation Engines]*, 1(10), 5–16. DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5. (In Russ., abstr. in Engl.).
24. Sal'nikov, A.V., Gordin, M.V., Shmotin, Yu.N., Nikulin, A.S., Makarov, P.V. & Frantsuzov, M.S. (2022). Tsifrovye dvoyniki – platforma dlya upravleniya zhiznennym tsiklom aviatsionnykh dvigatelei [Digital Twins – a Platform for Aircraft Engine Lifecycle Management]. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, 4(745), 60–72. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72. (In Russ., abstr. in Engl.).
25. Borisov, E.A. & Teplov, A.V. (2020). Osobennosti proverki kachestva programmnoho obespecheniya. *Nauka cherez prizmu vremeni*, 1(34), 27–29. (In Russ.).
26. Karakhanova, A.A. & Malikova, A.S. (2019). Rassmotrenie printsipov provedeniya testirovaniya programmnoho obespecheniya [Consideration of Principles of Testing the Software]. *Smergiya Nauk*, (41), 264–270. (In Russ., abstr. in Engl.).
27. Alekseev, A.K. & Bondarev, A.E. (2020). Ob aposteriorni otsenke normy pogreshnosti chislennogo rascheta na ansamble nezavysimykh reshenii [On a posteriori estimation of the approximation error norm for an ensemble of independent solutions]. *Sib. zhurn. vychisl. matematiki [Numerical Analysis and Applications]*, 23(3), 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. (In Russ., abstr. in Engl.).
28. Alekseev, A.K. & Bondarev, A.E. (2022). Otsenka lokal'noi pogreshnosti approksimatsii po naboru chislennykh reshenii [An estimation of point-wise approximation error using the set of numerical solutions]. *Sib. zhurn. vychisl. matematiki [Numerical Analysis and Applications]*, 25(4), 343–358. DOI: 10.15372/SJNM20220401. (In Russ., abstr. in Engl.).
29. Belov, A.N., Turovtsev, V.V. & Orlov, Yu.D. (2019). Otsenka pogreshnostei chislennogo resheniya torsionnogo uravneniya Shredingera v bazise funktsii Mat'e [Errors in the numerical solution of the torsion Schrödinger equation with Mathieu functions basis set]. *Vychisl. tekhnologii [Computational Technologies]*, 24(3), 33–43. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.003. (In Russ., abstr. in Engl.).
30. Grishanov, A.N. (2018). Metod opredeleniya aposteriornykh otsenok pogreshnostei v raschetakh kompozitnykh obolochek s primeneniem mnogosetochnykh konechnykh elementov [Method of Determining a Posteriori Error Estimation in Calculations of Composite Shells using Multigrid Finite Elements]. *Vestn. Astrakh. gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Astrakhan State Technical University]*, (4), 16–25. (In Russ., abstr. in Engl.).

31. Nadol'skii, V.V. & Podymako, V.I. (2022). Otsenka nesushchei sposobnosti stal'noi balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom deistvii lokal'nykh i sdvigovykh usilii [The evaluation of ultimate resistance of steel beams to combined shear and patch loading by finite element method]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2(100), 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43. (In Russ., abstr. in Engl.).
32. Nadol'skii, V.V. & Vikhlyaev, A.I. (2022). Otsenka nesushchei sposobnosti balok s gofirovannoi stenкой metodom konechnykh elementov pri deistvii lokal'noi nagruzki [Using the Finite Element Method to evaluate the Load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 17(6), 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706. (In Russ., abstr. in Engl.).
33. Fieber, A., Gardner, L. & Macorini, L. (2019). Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits. *Engineering Structures*, (199). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
34. Silva, L., Rebelo, C., Nethercot, D., Marques, L. & Simões, R. (2009). Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
35. Kala, Z., Melcher, J. & Puklický, L. (2009). Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(3), 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307.
36. Kala, Z. (2009). Sensitivity assessment of steel members under compression. *Engineering Structures*, (31), 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
37. Agüero, A., Pallarés, L. & Pallarés, F.J. (2015). Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression. *Engineering Structures*, (96), 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065.
38. Kala, Z. & Kala, J. (2011). Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements and Nonlinear Computation Methods. *AIP Conference Proceedings*. DOI: 10.1063/1.3636974.
39. Solov'eva, A.A. & Solov'ev, S.A. (2021). Issledovanie razvitiya modelei sluchainykh velichin v raschetakh nadezhnosti stroitel'nykh konstrukttsii pri nepolnoi statisticheskoi informatsii [A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 16(5), 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.03.2024

VERIFICATION AND VALIDATION OF A COMPUTER COMPUTATIONAL MODEL FOR THE DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

V. NADOLSKI
(Brest State Technical University)

A review and analysis of the verification and validation procedures of computer computational models has been performed in order to provide a conceptual framework and guidance on their implementation in relation to the design of building structures. The description of verification procedures for computer software and computer computational models is presented. The main stages of validation are formulated. The purpose of validation is to confirm the applicability, predictive ability and determination of the characteristics of the accuracy of computer models. Based on the analysis of the design value of the load-bearing capacity, a conclusion is made about the number of experiments required for validation for computer models. The study focuses on the description of verification and validation procedures for computer models of new design solutions and non-standardized model parameters. However, the recommendations given here are also suitable for more studied design solutions, while the scale of verification and validation activities may be reduced.

Keywords: verification, validation, computer model, mathematical model, computer modeling.