

1. ТКР EN 1993-1-5-2009 (02250). Еврокод 3. Проектирование стал'ных конструкций. СHаст' 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. – Минск : МАiS, 2014. – 51 с..
2. Martynov, Yu. S. Predel'nye sostoyaniya ekspluatatsionnoj prigodnosti, svyazannye s poterej mestnoj ustojchivosti stenki ot dejstviya kasatel'nyh napryazhenij / Yu. S. Martynov, V. V. Nadol'skij // Metallicheskie konstrukcii. – 2013. – № 2(19). – S. 93–101.
3. Martynov, Yu.I. Limit state design of slender steel webs associated with the shear buckling / Yu.I. Martynov, V.V. Nadolski // Vestnik BrGTU. – 2016. – № 1(97): Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 171–173.
4. Tur V.V. Konceptiya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osnove chislennyh modelej soprotivleniya / V.V. Tur, V.V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – №6 (104) – S.78-90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
5. Nadol'skij V.V. Ocenka raschetnogo znacheniya nesushchej sposobnosti stal'nyh elementov, proektiruemyh na osnove chislennyh modelej / V.V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18. – Vyp. 3. – S. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
6. Nadol'skij V. V. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovykh usilij /V. V. Nadol'skij, V.I. Podymako // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – №2 (100) – S.26-43., doi: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.
7. Nadol'skij V. V. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gofrirovannoj stenкой metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki. /V. V. Nadol'skij, A.I. Vihlyayev // Vestnik MGSU. – 2022. – T. 17. – Vyp. 6. – S. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
8. ТКР EN 1993-1-1-2009* Еврокод 3. Проектирование стал'ных конструкций. СHаст' 1-1. Обshchie pravila i pravila dlya zdaniy. – М: МАiS, 2014. – 88 с..
9. Nadol'skij V.V. Opyt normirovaniya vetrovoj nagruzki dlya territorii Respubliki Belarus': predystoriya i sovremennoe sostoyanie / V. V. Nadol'skij, YU.S. Martynov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – Seriya F: Prikladnye nauki.,” no. Stroitel'stvo. – 2019. – № 8. – S. 64–73.
10. Tur, V. V. Veroyatnostnye modeli vetrovogo vozdejstviya dlya klimaticheskikh uslovij Respubliki Belarus'/ V. V. Tur, V. V. Nadol'skij, A.V. CHernoivan // Vestnik BrGTU. – 2017. – № 1(97): Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 167–171.
11. SN 2.01.04-2019 Vozdejstviya na konstrukcii. Obshchie vozdejstviya. Snegovye nagruzki. – М: МАiS. data vvedeniya 2020.09.08.
12. ТКР EN 1991-1-7-2009 (02250) Еврокод 1. Vozdejstviya na konstrukcii. СHаст' 1-7. Обshchie vozdejstviya. Osobyе vozdejstviya. – М: МАiS..
13. Rudol'f, V. S.; Kudryashov, V. A.; Nadol'skij, V. V. Sopostavlenie normiruemykh znachenij snegovykh nagruzok s mnogoletnimi meteonablyudenyami dlya opredeleniya strategii bezavariyjnoj ekspluatatsii / V. S. Rudol'f, V. A. Kudryashov, V. V. Nadol'skij //,” no. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – №1(133). – S. 72-84. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-72-84.
14. Tur, A.V. Soprotivlenie izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri vnezapnom prilozhenii nagruzki: diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / A. V. Tur. – Brest, 2012. – 228 s.

УДК 624.014

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

***В. В. Надольский**, к. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства, Брестский государственный технический университет,
Брест, Беларусь, e-mail: Nadolski@mail.ru*

Реферат

Компьютерные модели в области проектирования строительных конструк-

ций находят все большее применение. Ряд областей применения является традиционным. Но существуют также относительно новые области применения, для которых компьютерные вычислительные модели являются очень перспективными с позиции экономического и технологического развития строительной отрасли. К этим направлениям можно отнести оценку поведения и значений несущей способности конструктивных элементов и узлов. Статья посвящена описанию этапов разработки компьютерной вычислительной модели для оценки несущей способности строительной конструкции. Этапы разработки компьютерной модели условно разделены на основные и вспомогательные. Разработка компьютерной модели начинается с формулировки концептуальной и математической моделей с последующим возможным пересмотром этих моделей во время верификации и валидации, а заканчивается количественной оценкой неопределенности результатов моделирования и оценкой расчетных значений несущей способности.

Ключевые слова: концептуальная модель, математическая модель, верификация, валидация, отклик конструкции, компьютерное моделирование, численные модели сопротивления.

STAGES OF DEVELOPMENT OF A COMPUTER COMPUTATIONAL MODEL FOR ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF STEEL STRUCTURES

V. Nadolski

Abstract

Computer models are increasingly being used in the field of structural engineering. A number of the applications are traditional. But there are also relatively new areas of application for which computer computational models are very promising from the standpoint of economic and technological development of the construction industry. These areas include the assessment of the behavior and values of the bearing capacity of structural elements and assemblies. The article is devoted to the description of the stages of development of a computer computational model for assessing the bearing capacity of a building structure. The stages of developing a computer model are conditionally divided into basic and auxiliary ones. The development of a computer model begins with the formulation of conceptual and mathematical models, followed by a possible revision of these models during verification and validation, and ends with a quantitative assessment of the uncertainty of the simulation results and an assessment of the calculated values of the bearing capacity.

Keywords: conceptual model, mathematical model, verification, validation, response, computer modeling, numerical models of resistance.

Введение

Компьютерные модели в области проектирования строительных конструкций находят все большее применение. Ряд из областей применения являются традиционными. К ним можно отнести компьютерные модели для определения усилий в строительных конструкциях и узлах и для определения параметров моделей несущей способности, таких как критические силы потери устойчивости [1, 2]. Но существуют также относительно новые области применения, для которых

компьютерные вычислительные модели являются очень перспективными с позиции экономического и технологического развития строительной отрасли. К этим направлениям можно отнести оценку поведения и значений несущей способности конструктивных элементов и узлов [3-5]. Применение компьютерного моделирования для оценки поведения конструктивного элемента становится общедоступным для проектирования как в связи с простотой создания таких моделей, так и с универсальностью этих моделей. Статья посвящена описанию этапов разработки компьютерной вычислительной модели для оценки несущей способности строительной конструкции. Данная статья разработана в развитие исследования [6] и дополняет его в части этапов разработки компьютерной модели.

Основные этапы. Этап 1. Концептуальная модель

Разработка компьютерной модели начинается с формулировки концептуальной модели. Концептуальная модель является идеализированным представлением поведения объекта моделирования. Разработка концептуальной модели включает в себя формулирование представления объекта моделирования, основанное на механическом и физическом понимании, и выбор степени упрощений, которые приведут к результатам с достаточной точностью для предполагаемого использования этой модели.

Формулировка концептуальной модели важна для всего процесса разработки модели, поскольку на этом этапе принимается (делается) много фундаментальных допущений, которые влияют на интерпретацию результатов моделирования. Эти допущения включают идеализации поведения материала, геометрии, условий закрепления и т. д. Важным шагом в разработке концептуальной модели является определение того, какие физические явления будут оказывать влияние на поведение (отклик, реакцию) объекта моделирования [7]. Определение основных физических явлений помогает гарантировать, что компьютерная модель в достаточной степени отражает задействованную механику и не тратит усилия на моделирование физических явлений, которые не влияют на интересующие характеристики поведения. В качестве примера рассмотрим следующий случай: моделирование конструкции выполнено для оценки прогибов при проверке предельных состояний эксплуатационной пригодности в упругой стадии. В этом примере пластичность материала, коэффициент демпфирования будет иметь низкий приоритет, поскольку они не влияют на рассматриваемую характеристику поведения конструкции. Разработка концептуальной модели также требует знания диапазона условий эксплуатации объекта моделирования, так как окружающая среда может влиять на выбор параметров при моделировании (например, при повышенных температурах эксплуатации необходимо учитывать термическое разупрочнение стали).

Представляющие интерес характеристики поведения – это характеристики поведения физического объекта, которые компьютерная модель должна предсказать для предполагаемого использования. Они могут включать такие характеристики, как максимальное растягивающее усилие в болтах, максимальное значение прогиба, максимальное значение напряжений. Во время развития концептуальной модели лучшими инструментами, доступными для идентификации ключевых физических явлений, является инженерный опыт и суждение. Документация с обоснованием того что включено или исключено из концептуальной модели, является важной частью надлежащей разработки компьютерной модели. Следует обратить внимание, что после того, как компьютерная модель раз-

работана, для исследования важности физического явления можно использовать анализ чувствительности. Построение таблицы идентификации и ранжирования явлений может быть полезным для идентификации ключевых физических явлений в соответствии с их важностью для интересующих характеристик поведения. В таблицу сводят список физических явлений, а также ранжирование (например, высокое, среднее, низкое) важности каждого явления для интересующих характеристик поведения системы. Кроме того, таблица также может включать качественное суждение относительно способности существующих компьютерных моделей или разрабатываемых компьютерных моделей точно описывать физические явления. Эта информация полезна для определения приоритетов, какие физические явления необходимо дополнительно исследовать.

Основные этапы. Этап 2. Математическая модель

Разработка математической модели состоит из определения математических описаний механики и физики, представленной в концептуальной модели. В математической модели принципы механики, поведение материала, свойства взаимодействия, нагрузки и граничные условия приведены к уравнениям и математическим выражениям. Например, если модель материала учитывает только упругие деформации, то математическая модель напряжений будет $\sigma = E \varepsilon$, где E – модуль упругости материала, ε – относительные деформации. Например, если условия закрепления должны учитывать жесткость опоры на изгиб, то математическая модель жесткости будет представлена константой или графиком.

Описание математической модели позволяет определить входные параметры модели, такие как характеристики материала, приложенные нагрузки и т. д. Затем интересующая область может быть выражена в терминах этих параметров. Например, область применения может ограничиваться диапазоном прикладываемых нагрузок.

Основные этапы. Этап 3. Компьютерная (вычислительная) модель

Компьютерная (вычислительная) модель – это численная реализация математической модели. Исследования по формализации требований и принципов создания компьютерной модели представлены в следующих работах [8–11].

Инженер должен понимать концептуальную и математическую модели, чтобы учитывать влияние, обусловленное допущениями и математическими упрощениями, на результаты моделирования. Без этого понимания трудно установить, является ли компьютерная модель подходящей или неподходящей для предполагаемого использования. Для примера, инженер должен учитывать тип граничных условий, которые должны быть наложены в задачах потери устойчивости, поскольку результаты потери устойчивости чувствительны к условиям закрепления, используемым в модели.

Примером концептуальной модели является классическая балка Бернулли – Эйлера с предположениями о линейно упругом поведении и плоских сечениях. Эта концептуальная модель может быть описана с помощью дифференциального уравнения для получения математической модели. Дифференциальные уравнения могут быть решены с помощью различных численных алгоритмов. Обычно в компьютерном моделировании они решаются с использованием метода конечных элементов. С указанием физических параметров и параметров дискретизации создается компьютерная модель.

Основные этапы. Этап 4. Верификация и валидация

Оценка достоверности компьютерных моделей и обеспечение точности этих моделей осуществляется посредством верификации и валидации [6, 12, 13]. Верификация направлена на исключение программных ошибок и оценку численных погрешностей и должна предшествовать валидации, которая направлена на оценку применимости и точности (погрешности и неопределенности) модели путем сравнения расчетов с эталонными (экспериментами) данными. Т. е. верификация и валидация – это процессы, с помощью которых генерируются доказательства и, таким образом, устанавливается достоверность того, что компьютерная модель обладает достаточной точностью и уровнем детализации для их предполагаемого использования [6].

Вспомогательные этапы. Этап А. Обновление модели

Разработчик модели может обнаружить, что компьютерная модель нуждается в обновлении (корректировка, изменение, исправление, доработка) для достижения желаемой точности или учета новых требований. В общем смысле, существует два класса возможных обновлений математических и компьютерных моделей. Первый класс обновлений охватывает обновления параметров в математической или компьютерной модели, которые определяются путем калибровки компьютерной модели по экспериментальным данным (т. е. параметры материала, коэффициенты демпфирования для линейной вибрации или коэффициенты трения). Второй класс обновлений охватывает обновления концептуальной модели для улучшения описания механики или физики, чтобы можно было достичь лучшего согласования с экспериментальными данными. Два класса обновлений обсуждаются ниже.

Этап А.1. Обновления параметров модели

Калибровка модели применяется для подгонки компьютерных результатов в лучшее соответствие с измеренными значениями характеристики поведения. Например, процесс калибровки устраняет наиболее распространенные причины трудностей с моделированием в задачах конструктивной динамики – податливость в соединениях, потерю энергии/демпфирование, неопределенные граничные условия, которые должны быть представлены в виде простых механических моделей – откалиброваны таким образом, чтобы глобальное поведение компьютерной модели соответствовало экспериментальным данным.

Однако калибровка модели определяет только пригодность модели к подгонке, но не ее прогностическую способность. Модель, откалиброванная по экспериментальным данным, не гарантирует точных прогнозов во всем диапазоне предполагаемого использования. Данные, используемые для калибровки модели, должны оставаться независимыми от данных, используемых для оценки прогностической способности, т. е. для валидации. Тип эксперимента, используемый для определения значений неизвестных или неопределенных входных параметров модели, обычно называется «калибровочный эксперимент». Калибровочный эксперимент отличается от валидационного эксперимента. Целью калибровочного эксперимента является генерирование значений или вероятностных распределений для входных параметров модели при определенных типах экспериментальных условий. В отличие от калибровочных экспериментов, эксперименты по валидации разрабатываются и выполняются для обеспечения независимой, объективной оценки прогностической способности компьютерной модели.

Реальность моделирования такова, что с учетом ограничений по стоимости

и срокам, калибровка модели часто выполняется после того, как была проведена первоначальная валидационная оценка и не было достигнуто приемлемое значение точности. То есть разработчик модели находит набор значений параметров, который обеспечивает приемлемое соответствие с данными валидационного эксперимента, но только после того, когда не удается достичь этого согласия с прогнозом. К сожалению, для последующей оценки прогностической способности по-прежнему необходима последующая валидация на основании других независимых экспериментов.

Этап А.2. Обновление концептуальной модели.

Необходимость обновления концептуальной модели возникает, когда некоторые характеристики поведения не согласуются с соответствующими характеристиками выходных данных компьютерной модели и различия не связаны с разумными неопределенностями в параметрах компьютерной модели. Обновления концептуальной модели затрагивают пересмотр математической и компьютерной моделей.

Примерами неточностей концептуальной модели являются: неподходящая модель поведения материала; предположения о сцеплении контактирующих поверхностей, когда в реальности между деталями образуется зазор; предполагаемые жесткие граничные условия, которые, как оказывается, имеют значительные деформации и т. д.

Вспомогательные этапы. Этап Б. Анализ чувствительности

Одним из способов, помимо интуиции и опыта, идентификации важных явлений, является проведение анализа чувствительности. Исследование чувствительности включает *«незначительные изменения входных параметров и определяет, какие входные параметры имеют решающее значение и должен ли этот входной параметр быть определен с более высокой точностью или назначен консервативно»* [5]. Для стальных конструкций особую важность приобретает анализ чувствительности к несовершенствам, который показывает является ли результат компьютерной вычислительной модели чувствительным к выбранному типу, форме и величине несовершенства. Важно понимать, что результаты анализа чувствительности являются такими же результатами модели, как и значения интересующей характеристики поведения, поэтому к ним применяется идентичная логика, т. е. чувствительность модели должна в конечном итоге быть предметом верификации и валидации, как и основные параметры, представляющие интерес.

Анализ чувствительности, выполняемый до валидации компьютерной модели (но не до верификации), может дать важную информацию о характеристиках этой компьютерной модели и помочь в разработке экспериментов. Однако, как и в случае инженерного суждения, или первоначальной расстановки приоритетов, непроверенная чувствительность модели может быть неверной по величине или даже по знаку. Таким образом, к анализу чувствительности модели необходимо возвращаться после любого пересмотра модели.

Основные этапы. Этап 5. Количественная оценка неопределенности моделирования

Валидация компьютерной модели должна учитывать неопределенности, связанные как с результатами моделирования, так и с экспериментальными данными. Все существенные источники неопределенности должны быть идентифицированы и обработаны для количественной оценки их влияния на вычис-

ления, сделанные с помощью модели [3, 14]. На основании валидации компьютерной модели должна быть установлена неопределенность моделирования, которая в дальнейшем наравне с изменчивостью базисных переменных должна быть учтена при обеспечении надежности проектируемой конструкции [5, 14]. Полезно классифицировать неопределенности как неустраняемые и устраняемые.

Неустраняемая неопределенность (также называемая «изменчивость», «случайная неопределенность») относится к внутренним изменениям моделируемой физической системы. Этот тип неопределенности существует всегда и является неотъемлемым свойством. Примерами неустраняемой неопределенности являются изменчивость геометрии, свойств материалов. Присущая физическим параметрам модели изменчивость обычно определяется на основании статистических исследований, например, для предела текучести или, в отдельных случаях, для компонента (например, для несущей способности болта на сдвиг). Если никаких прямых испытаний не проводится, оценка неопределенности из-за изменчивости физических параметров должна основываться на предыдущем опыте и инженерных суждениях. Неустраняемая неопределенность должна учитываться с помощью методов теории надежности. Изменчивость выходных данных моделирования из-за неопределенности базисных переменных можно установить на основе сгенерированной псевдослучайной выборки, такими методами как Монте-Карло или латинский гиперкуб, или методами, представленными в исследовании [15].

Устраняемая неопределенность (также называемая «неопределенность знания, познания», «эпистемологическая неопределенность») относится к недостаткам, возникающим в результате отсутствия полной информации или знаний. Двумя важными источниками устраняемой неопределенности являются статистическая неопределенность и неопределенность концептуальной модели. Статистическая неопределенность возникает из-за использования ограниченных выборок. Например, если среднее значение свойства материала рассчитывается только на основе двух или трех измерений, то среднее значение будет содержать статистическую неопределенность, которую можно уменьшить посредством дополнительных измерений. Неопределенность концептуальной модели относится к неопределенности, связанной с допущениями моделирования. Например, такими как допущение о постоянстве модуля упругости, тогда как в действительности его значение меняется со временем, температурой или скоростью нагружения. В целом неопределенность концептуальной модели чрезвычайно трудно определить количественно.

Основные этапы. Этап 6. Документация по разработке модели

Последним обязательным этапом является составление отчетной документации, которая должна содержать пояснения о концептуальной, математической, компьютерной моделях, процессов верификации, валидации и результатов моделирования, в том числе значения характеристик точности, и описание подходов проверки предельных состояний и обеспечения надежности. В документации по валидации должны быть представлены не только аргументы за или против принятия модели для использования по назначению, но и рекомендуемые пределы ее использования. Должны быть указаны эталонные данные, которые были положены в основу валидации соответствующей компьютерной модели. Должны быть объяснены идеализации и ограничения, присутствующие в экспериментах. Обоснована применимость данных валидации более низкого

уровня, т. е. данных о валидации параметров модели или компонентов модели. Модель может иметь приемлемую точность в ограниченной области. В таких случаях необходимо зафиксировать область применения. Должен быть определен диапазон конфигураций конструкций, условий нагружения, материалов и т. д., для которых ожидается, что прогнозы будут иметь установленную точность. Уверенность в прогнозах модели снижается по мере отклонения условий применения от условий, использованных в процессе валидации. Документация также облегчает повторное использование базы знаний и проверенных параметров модели.

Заключение

Разработка компьютерной модели начинается с формулировки концептуальной и математической моделей с последующим возможным пересмотром этих моделей во время верификации и валидации, а заканчивается количественной оценкой неопределенности результатов моделирования и оценкой расчетных значений несущей способности. Этапы разработки компьютерной модели условно разделены на основные и вспомогательные.

К основным этапам разработки компьютерной модели относятся следующие:

Этап 1. Концептуальная модель.

Этап 2. Математическая модель.

Этап 3. Компьютерная вычислительная модель.

Этап 4. Верификация и валидация.

Этап 5. Количественная оценка неопределенности моделирования

Этап 6. Документация по разработке модели.

К вспомогательным этапам относятся:

Этап А. Обновление модели.

Этап Б. Анализ чувствительности.

В ближайшее время наиболее приоритетными направлениями исследований являются:

– указание и научное обоснование рекомендуемых параметров компьютерных моделей;

– разработка процедур оценки точности моделей с последующим нормированием статистических характеристик точности;

– разработка методических подходов по обеспечению надежности конструкций, проектируемых на основе компьютерных моделей.

Список цитированных источников

1. Надольский, В. В. Перспективные и необходимые направления развития нормативных документов в области проектирования стальных конструкций / В. В. Надольский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. статей XXII Междунар. науч.-методич. Семинара, Брест 29–30 сент. 2022 г. / БрГТУ; редкол. : С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2022 – С. 133–145 с.

2. Nadolski, V. On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako, M. Sýkora // Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, 2023. – Vol. 23/1. – P. 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.

3. Тур, В. В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления / В. В. Тур, В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6 (104) – С. 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.

4. Надольский, В. В. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки / В. В. Надольский, А. И. Вихляев // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.

5. 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.
6. Надольский, В. В. Верификация и валидация компьютерной вычислительной модели для проектирования строительных конструкций / В. В. Надольский // Вестник Полоцкого гос. ун-та. – 2024. – № 2. – С. 42–50. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-42-5.
7. Сальников, А. В. Верификация и валидация компьютерных моделей / А. В. Сальников, М. С. Французов, К. А. Виноградов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9 (750). – С. 100–115. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.
8. Надольский, В. В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов / В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 1 (1). – С. 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
9. Мартыненко, Т. М. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS / Т. М. Мартыненко, С. А. Пронкевич, И. М. Мартыненко, В. А. Максимович // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 147–151.
10. Фролов, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical / А. В. Фролов, М. В. Воронов, А. А. Медельцев [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. – 2022. – № 11. – С. 61–76.
11. Палаев, А. Г. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS / А. Г. Палаев, В. В. Носов, А. А. Красников // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12, № 5. DOI 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.
12. Темис, Ю.М. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД. / Ю. М. Темис, А. В. Соловьева, Ю. Н. Журенков [и др.] // Авиационные двигатели. – 2021. – № 1 (10). – С. 5–16. DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5.
13. Сальников, А. В. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. / А. В. Сальников, М. В. Гордин, Ю. Н. Шмотин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 4. – с. 60–72. DOI: 10.18698/ 0536-1044-2022-4-60-72.
14. Надольский, В. В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов / В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3 (107) – С.17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
15. Тур, В. В. Методы оценки коэффициента вариации несущей способности при проектировании конструкций на основе нелинейных конечно-элементных моделей / В. В. Тур, В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 4. – С. 64–74.

References

1. Nadol'skij V.V. Perspektivnye i neobhodimye napravleniya razvitiya normativnyh dokumentov v oblasti proektirovaniya stal'nyh konstrukcij / V.V. Nadol'skij // Perspektivnye napravleniya innovacionnogo razvitiya stroitel'stva i podgotovki inzhenernyh kadrov, sbornik nauchnyh statej XXII Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminaru ; Brest 29–30 sentyabrya 2022 goda / BrGTU; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest, 2022 – S. 133-145 s.
2. Nadolski V. On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako, M. Sýkora // Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava. 2023. Vol. 23/1. pp. 12-19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
3. Tur V.V. Konceptiya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osnove chislennyh modelej soprotivleniya / V.V. Tur, V.V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – №6 (104) – S.78-90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
4. Nadol'skij V. V. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gofirovannoj stenкой metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki. /V. V. Nadol'skij, A.I. Vihlyayev // Vestnik MGSU. – 2022. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
5. Nadol'skij V.V. Ocenka raschetnogo znacheniya nesushchej sposobnosti stal'nyh elementov, proektiruemyh na osnove chislennyh modelej / V.V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – Т. 18. – Вып. 3. – С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
6. Nadol'skij V. V. Verifikaciya i validaciya komp'yuternoj vychislitel'noj modeli dlya proek-

tirovaniya stroitel'nyh konstrukcij / V. V. Nadol'skij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – 2024. – №2. – S. 42-50. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-42-5.

7. Sal'nikov A.V. Verifikaciya i validaciya komp'yuternyh modelej / A. V. Sal'nikov, M. S. Francuzov, K. A. Vinogradov [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. – 2022. – № 9(750). – S. 100-115. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

8. Nadol'skij V.V. Parametry chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov / V.V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2023. – № 1(1). – S. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.

9. Martynenko T. M. Analiz prochnosti uzlovyh soedinenij pri razlichnyh ispolneniyah konstrukcii na osnove modelirovaniya v srede ANSYS / T. M. Martynenko, S. A. Pronkevich, I. M. Martynenko, V. A. Maksimovich // Mekhanika. Issledovaniya i innovacii, no. – 2022. – № 15. – S. 147-151.

10. Frolov A.V. Modelirovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh soedinenij v ANSYS Mechanical / A. V. Frolov, M. V. Voronov, A. A. Medel'cev [i dr.] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. – 2022. – № 11. – S. 61-76.

11. Palaev, A. G. Modelirovanie raspredeleniya temperaturnyh polej i napryazhenij v svarnom soedinenii s primeneniem ANSYS / A. G. Palaev, V. V. Nosov, A. A. Krasnikov // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. – 2022. – T. 12, № 5, no. DOI 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.

12. Temis YU.M., Solov'eva A.V., ZHurenkov YU.N. i dr. Cifrovoj dvojniki ustanovki dlya ispytaniy centrobezhnogo kompressora malorazmernogo GTD. / YU. M. Temis, A. V. Solov'eva, YU. N. ZHurenkov [i dr.] // Aviacionnye dvigateli. – 2021. – № 1(10). – S. 5-16., DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5.

13. Sal'nikov A.V., Gordin M.V., SHmotin YU.N. i dr. Cifrovye dvojniki — platforma dlya upravleniya zhiznennym ciklom aviacionnykh DOI doi: 10.18698/ 0536-1044-2022-4-60-72.

14. Nadol'skij V.V. Statisticheskie harakteristiki pogreshnosti chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov / V.V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2023. – №3 (107) – S.17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.

15. Tur V.V. Metody ocenki koefficienta variacii nesushchej sposobnosti pri proektirovanii konstrukcij na osnove nelinejnyh konechno-elementnyh modelej / V. V. Tur, V. V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2024. – № 4. – S. 64–74.

УДК 624.15:692.115

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

П. С. Пойта, д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

Н. Н. Шалобыта, к. т. н., проректор по научной работе Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

Т. П. Шалобыта, к. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

Реферат

Данные инженерно-геологических изысканий в представляемых объемах и количественном определении отдельных характеристик грунтов недостаточны и не дают достоверной информации для проектирования фундаментов зданий и