

7. Andreev-Tverdov, A. I. Formirovanie kompetencij, neobhodimyh dlja razrabotki konstruktorskoj dokumentacii u studentov tehniceskikh universitetov / A. I. Andreev-Tverdov [ i dr. ] // Pedagogika. Voprosy teorii i praktiki. – 2017. – № 3 (7). – S. 10-13.

8. Martishkin, V. V. O sovershenstvovanii prepodavaniya inzhenernoj grafiki v uslovijah XXI veka / V. V. Martishkin, Je. M. Fazlulin, O. A. Jakovuk // Izvestija MGTU «MAMI». – 2007. – № 2 (4). – S. 308-315.

9. Skripnik, A. V. Tehnologii informacionnogo modelirovanija v vodohozhajstven-nom proektirovanii / A.V. Skripnik, L.A. Behovyh // Vestnik nauchno-metodicheskogo soveta po prirodobustrojstvu i vodopol'zovaniju. – Moskva: Ros-sijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet-Moskovskaja sel'skohozhajstven-naja akademija im. K.A. Timirjazeva. – 2019. – № 15. – S. 39-43.

10. Taratenkova, M. A. Innovacionnye tehnologii v proektirovanii i modelirovanii inzhenernyh vodohozhajstvennyh sistem / M. A. Taratenkova, S. V. Andrejuk, I. A. Adamov // Vodohozhajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhajushhej sredy : sb. nauchn. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 26-27 oktjabrja 2023 g. / Brest.gos. tehn. un-t ; redkol.: A. A. Volchek [i dr.] ; nauch. red. A. A. Volchek, O. P. Meshik, S.V. Andrejuk – Brest :BrGTU, 2023. – S. 150-155.

11. Gatilo, V. A. Proektirovanie inzhenernyh sistem zhizneobespechenija s ispol'zovanijem tehnologii informacionnogo modelirovanija / V.A. Gatilo i dr. // Inzhenerno-jeologicheskie aspekty i perspektivy razvitija sistem vodosnabzhenija i vodootvedenija: sb. nauchn. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 28 marta 2024 g. / Brest. gos. tehn. un-t ; redkol.: A.A. Volchek [i dr.] ; nauch. red. A.A. Volchek, O.P. Meshik, S.V. Andrejuk. – Brest: BrGTU, 2024. – S. 157-162.

12. Mazur, Ju. V. Metodika primenenija informacionno-tehnologicheskogo obespechenija uchebnogo processa po plavaniju / Ju. V. Mazur // Olimpijskij sport: pedagog. nasledie D.P. Korkina i rol' lichnosti trenera v stanovlenii sportsmena : Materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkah provedenija mezhdunar. turnira po vol'noj bor'be, posvjashh. pamjati zaslužh. trenera SSSR D.P. Korkina, Jakutsk, Rossija, 10 oktjabrja 2019 g. / Pod obshh. red. M.G. Kolodeznikovoj. – Jakutsk, Rossija: Izd. dom SVFU, 2019. – S. 83-90. – EDN UG SCHL.

13. Mazur, Ju. V. Organizacija praktiko-orientirovannogo obuchenija po discipline «Plavanie i metodika prepodavaniya» s ispol'zovanijem avtomaticheskoy obuchaju-shhej sistemy / Ju. V. Mazur // Jeksperimental'naja i innovacionnaja dejatel'nost' - potencial razvitija otrasli fizicheskoj kul'tury i sporta : materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. : v 2 t., Chajkovskij, 18–19 sentjabrja 2020 g., Tom 2. – Chajkovskij: Chajkovskij gos. in-t fizicheskoj kul'tury, 2020. – S. 44-47. – EDN MUVCAD.

14. Arhipenka, D. Plavaem tjechnichna / D. Arhipenka. – «Nastaŭnickaja gazeta»: Redakcionno-izdatel'skoe uchrezhdenie «Izdatel'skij dom «Pedagogicheskaja pressa». – 25.05.2022. – <https://nastgaz.by/plavaem-technichna/>.

УДК 624.014

## **КРИТЕРИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ**

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

### **Реферат**

Очень важное место в проектировании строительных конструкций занимает вопрос назначения критериев предельных состояний. Используемые в настоящей практике критерии не могут быть в полной мере применены к проектированию на основе компьютерных численных моделей. Критерии должны быть однозначно выражены в точных терминах и значениях строительной механики

и в форме «понятной» компьютеру. В исследовании предлагается применять единый критерий для всех предельных состояний, выраженный в виде нулевого градиента – «отклика» (зависимости «нагрузка – перемещение»). Можно утверждать, что критерий нулевого отклика имеет хорошую физическую достоверность. Большим преимуществом критерия нулевого отклика является его общность. Он одинаково подходит для конструкций из любых материалов и для всех форм (видов) отказа. Критерий нулевого отклика работает во всех этих случаях и избавляет от необходимости искать какие-либо дополнительные формулировки. Также формулировка критерия предельных состояний на основе понятия «отклик» позволяет оценить степень их опасности. Для этого достаточно определить значение «отклика» элемента конструкции в состояниях, следующих за предполагаемым предельным.

**Ключевые слова:** критерий предельного состояния, отклик конструкции, компьютерное моделирование, численные модели сопротивления, метод предельных состояний, метод предельных поведений.

## **CRITERIA OF LIMIT STATES FOR THE DESIGN OF STEEL STRUCTURES BASED ON COMPUTER NUMERICAL MODELS**

**V. Nadolski**

### **Abstract**

A very important place in the design of building structures is occupied by the issue of assigning criteria for limit states. The criteria used in current practice cannot be fully applied to design based on computer numerical models. The criteria must be unambiguously expressed in precise terms and values of structural mechanics and in a form that is "understandable" to a computer. In the study, it is proposed to apply a single criterion for all limit states, expressed as a zero gradient of "response" (load–displacement curve). It can be argued that the zero response criterion has good physical validity. The great advantage of the zero response criterion is its generality. It is equally suitable for structures made of any materials and for all forms (types) of failure. The zero response criterion works in all these cases and eliminates the need to look for any additional formulations. Also, the formulation of the criterion of limit states based on the concept of "response" allows us to assess the degree of their danger. To do this, it is enough to determine the value of the "response" of the structural element in the states following the assumed limit.

**Keywords:** limit state criterion, design response, computer modeling, numerical resistance models, limit state method, limit behavior method

### **Введение**

Очень важное место в основных принципах проектирования по методу предельных состояний занимает вопрос о назначении критериев предельных состояний. Критерии предельных состояний должны быть взаимосвязаны с рассматриваемыми расчетными ситуациями и предельными состояниями (в том числе с учетом уровня нагрузок и частоты их изменения для проверок предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности),

соответствовать функциональным требованиям к конструкциям. Следует позаботиться о том, чтобы все соответствующие режимы отказа учитывались либо непосредственно с помощью анализа, либо с помощью дополнительных проверок. Примерами дополнительных проверок могут служить проверки сварного шва, болтов и т. д. В качестве наиболее распространенных критериев предельных состояний несущей способности для стальных конструкций выступают:

– достижение предела текучести (используется в большинстве расчетных моделей сопротивления стальных конструкций);

– достижение предельного значения деформаций (нормативные документы дают мало четких указаний по этому вопросу, за исключением [1], который регламентирует предельные деформации равные 5 %, однако строгого обоснования этого значения нет);

– упругая потеря устойчивости стенки, гибкость стенки, «дыхание стенки» как критерий проверки выносливости или эксплуатационной пригодности (с практической или эстетической точки зрения) [2; 3];

– дополнительные проверки накопленных пластических деформаций или повторной текучести, которые важны в случае переменной или циклической нагрузки.

Однако перечисленные критерии не могут быть применены для численных моделей [4, 5]. Одна из причин – это то, что достижение некоего уровня напряжений (например, предела текучести) или деформаций (например, пластических) будет сильно зависеть от наличия концентраторов и качества конечно элементной сетки [6, 7]. Можно дополнить эти критерии размером области развития напряжений или деформаций, однако автоматизация такого процесса представляется очень сложной. Вторая причина – это то, что такие фразы, как «упругая потеря устойчивости стенки», «дыхание стенки», «выдерживать все действия и воздействия, которые могут возникнуть во время выполнения и использования», «обеспечивать работу», «чрезмерное перемещение» и т. д., не имеют смысла с точки зрения строительной механики. Критерии должны быть однозначно выражены в точных терминах и значениях строительной механики и, соответственно, в форме «понятной» компьютеру, именно это обеспечивает ясность требований.

### **Единый критерий предельных состояний для проектирования стальных конструкций на основе компьютерных численных моделей**

Для всех предельных состояний единый критерий предельного состояния может быть записан в виде нулевого градиента зависимости «нагрузка – перемещение», т. е.  $\delta P/\delta f = 0$  или  $\Delta P/\Delta f = 0$ . Далее в тексте используются термины «отклик», «реакция». Можно утверждать, что критерий нулевого отклика имеет хорошую физическую достоверность. Это обстоятельство имеет первостепенное значение. Большим преимуществом критерия нулевого отклика является его общность. Он одинаково подходит для конструкций из любых материалов и для всех форм (видов) отказа. Нулевой «отклик» элемента возникает при хрупком разрушении, при «текучести» (увеличении деформаций и перемещений при постоянном уровне нагрузки), при различных видах потери устойчивости. Часто бывает трудно провести различие между проблемами локальной (устойчивость частей сечения, устойчивость формы сечения) и глобальной (устойчивость элемента) устойчивостью тонкостенных или холодноформованных

элементов металлических конструкций и т. д. Критерий нулевого отклика работает во всех этих случаях и избавляет от необходимости искать какие-либо дополнительные формулировки.

Формулировка критерия предельных состояний на основе понятия «отклик» позволяет **оценить степень их опасности**. Для этого достаточно определить значение «отклика» элемента конструкции в состояниях, следующих за предполагаемым предельным (стадия после рассматриваемой точки на кривой деформирования). Следовательно, использование понятия «отклик» позволяет формировать критерии проверки живучести. Помимо величины максимальной несущей способности (сопротивления), т. е. максимального значения нагрузки на кривой деформирования, способность элемента сохранять свою работоспособность в случае перегрузки сильно влияет на результирующую надежность. Поэтому необходимо учитывать не только максимальную величину сопротивления, но и судить о том, каково поведение (график деформирования) для конкретного режима отказа.

Если «отклик»  $< 0$  за точкой предельного состояния (рисунок 1, кривая А точка 1, кривые В и С точка 3), то это означает, что нагрузка, вызвавшая такое предельное состояние, после ее достижения не может восприниматься (сопротивляться) конструкцией. Этот отказ является катастрофическим и самым опасным. Для такого состояния показатель надежности должен быть максимальным или вероятность отказа должна быть минимальной. Как правило, возникновение этих предельных состояний всегда угрожает безопасности людей.

Если «отклик»  $= 0$  или  $\approx 0$  на некотором промежутке после точки предельного состояния (рисунок 1, кривые В и С, между точками 1 и 2), то конструкция сохраняет способность воспринимать (сопротивляться) предельную нагрузку. Такое предельное состояние менее опасно, так как его достижение может быть обнаружено по появившимся большим деформациям или перемещениям. Этот вид отказа характерен для растянутых и изогнутых элементов из пластичных материалов с горизонтальной областью текучести и т. д. Как правило, возникновение этих предельных состояний затрудняет эксплуатацию конструкции (значительные пластические деформации, перекосы и т. д.).

Возможен случай, когда отклик положительный за точкой предельного состояния «отклик»  $> 0$  (рисунок 1, кривые В и С, точка 1). Такое предельное состояние следует назвать «условным», потому что не наблюдается резкого разрушения элемента или системы, однако дальнейшее увеличение нагрузки недопустимо по тем или иным требованиям (появление значительных деформаций, структурных изменений в материале и т. д.). Необходимо стремиться к проектированию таких конструкций, проявляющих так называемое пластичное поведение при предельной нагрузке. Следует отметить, что устоявшаяся практика проектирования стальных конструкций основана на таком поведении, и оно выгодно как с точки зрения упрощения процесса проектирования, так и с точки зрения повышения надежности конструкции. Для пластичной конструкции перед разрушением могут произойти значительные прогибы, которые предупреждают о разрушении. Пластичные конструкции также обладают большей способностью поглощать энергию при ударных нагрузках, возможностью перераспределения усилий при отказе части сечения элемента или элемента конструкции.

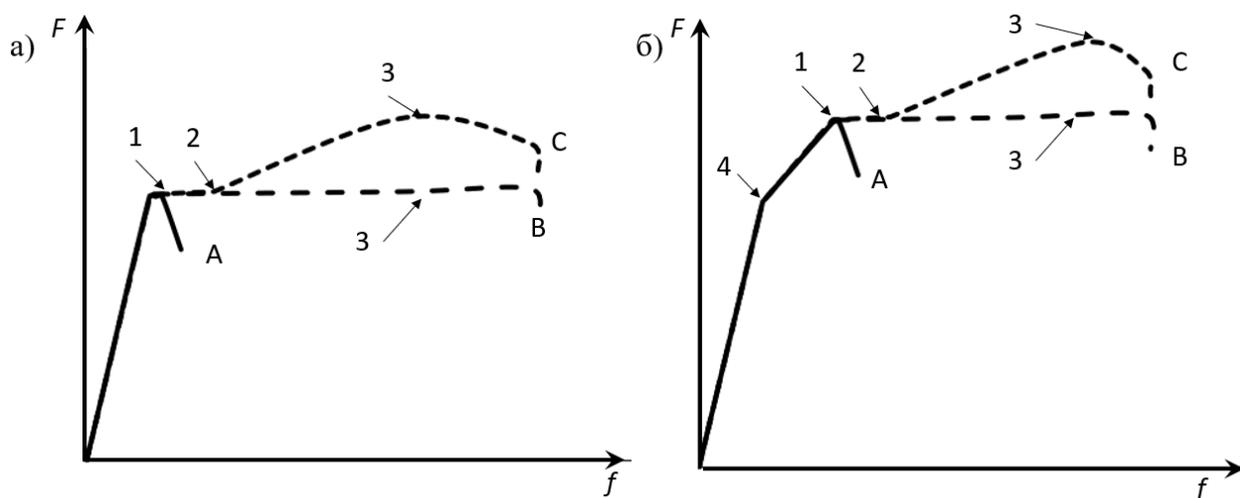


Рисунок 1 – Обобщенные идеализированные кривые деформирования стального элемента

Как видно, эта классификация может быть использована для различных уровней надежности. В EN 1990 написано, что конструкции, подверженные обрушению без предупреждения (хрупкое разрушение), должны иметь более высокий уровень надежности или такие формы отказа должны быть устранены с помощью проектных и строительных мер, но при нормировании вероятности отказа это требование не отражено.

Критерий отклика позволяет более корректно сравнивать элементы с точки зрения надежности или живучести. В ряде случаев попытки сравнить надежность (живучесть) при существующих подходах (это применимо как в детерминированной форме, так и в вероятностной форме) могут привести к неправильным интерпретациям. Например, рассмотрим две балки двутаврового сечения: первая балка «А» имеет сечение 1–2 класс в соответствии с [8], соответственно при проверках используется пластический момент сопротивления, а вторая балка «Б» имеет сечение 3 класса в соответствии с [8], соответственно при проверках используется упругий момент сопротивления. На рисунке 2 показана зависимость перемещений от приложенной нагрузки для двух рассмотренных балок, где  $F_{SLS}$  – уровень нагрузки, соответствующий проверке эксплуатационной пригодности (SLS), а  $F_{ULS}$  – уровень нагрузки, соответствующий проверке несущей способности (ULS).

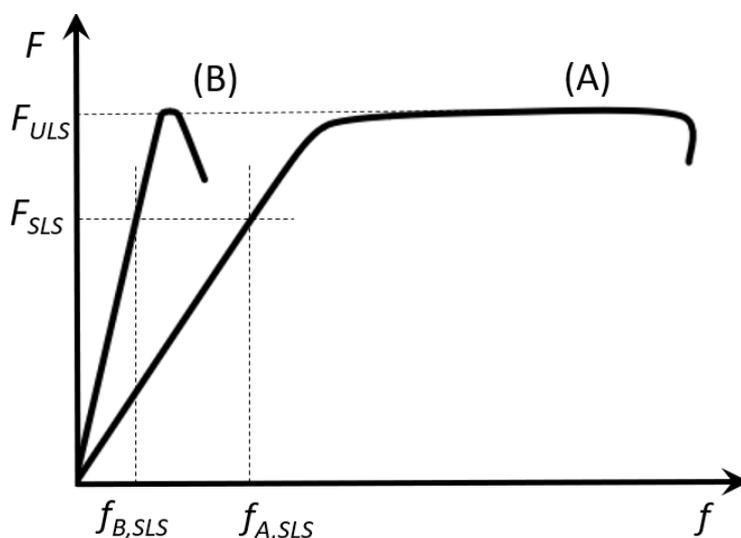


Рисунок 2 – Кривые деформирования в зависимости от класса сечения

При нагрузке, равной  $F_{SLS}$ , видно, что перемещение в первой балке  $f_{A,SLS}$  будет больше, чем во второй  $f_{B,SLS}$  (из-за того, что момент инерции для первого сечения будет меньше, чем для второго) и дополнительно  $f_{B,SLS} < f_{A,SLS} < f_{lim}$  (т. е. предельное состояние не превышено ни для одной из балок). Анализируя это выражение в рамках существующих подходов, можем сделать вывод, что балка «В» имеет больший запас, так как  $f_{B,SLS} < f_{A,SLS}$ , и, соответственно, более предпочтительна (в этом контексте ее иногда интерпретируют как более надежную, например, это общий вывод при оценке существующих конструкций на основании замеров перемещений).

При нагрузке, равной  $F_{ULS}$ , обе балки достигают максимальной несущей способности, на основании чего можно сделать вывод, что они одинаково надежны.

Но, анализируя более подробно поведение этих двух балок, выводы, полученные ранее, ставятся под сомнение, и можно утверждать, что с точки зрения надежности (живучести) балка «А» является более предпочтительной, поскольку поведение после достижения проектного «предельного» состояния позволяет избежать внезапного отказа.

Как видно из представленных рассуждений, учет поведения элемента в определенный момент не всегда корректен. При этом эта практика широко распространена. В редких случаях анализируется поведение до достижения предельного состояния и после его наступления, потому что в нормах расчетные формулы оценивают только условно максимальное значение сопротивления.

Такой подход оправдан в большинстве случаев, однако **следующие аспекты заставляют перейти от анализа предельных состояний к анализу предельных поведений.**

1) Одним из важных ограничений применения существующих методов расчета является то, что воздействия, особенно климатические, определяют и нормируют на основе предыдущих наблюдений [9]. Хотя в ряде исследований предпринимаются попытки предсказать редкие (особые) воздействия на основе тенденций последних десятилетий, однако, как правило, эти прогнозы распространяются на ближайшие 5–10 лет и требуют постоянного пересмотра значительных нагрузок [10]. В то же время здания рассчитываются на 50 и более лет, что в целом ставит под сомнение принцип обеспечения надежности (целевой вероятности отказа) при заведомо неизвестных воздействиях. Попытки спроектировать здание для будущего сводятся к подтверждению их надежности за прошедший период времени. Описанная ситуация в значительной степени послужила стимулом для выделения особых значений снеговой нагрузки [11] и применения принципов ограничения отказа при особых нагрузках [12, 13]. Для восприятия особых воздействий особенно важным становится анализ поведения конструкции в состояниях после выхода из строя одного или нескольких элементов.

2) Все чаще обсуждается вопрос о том, что система частных коэффициентов определена для отдельного структурного (конструктивного) элемента, и попытки проанализировать и стандартизировать надежность для системы элементов пока не принесли ясности. Это опять же требует разработки новых методов анализа надежности (живучести) систем элементов, в том числе по числовым показателям. Примером может служить сравнение пространственной стальной

конструкции с ферменной конструкцией. Известно, что пространственные стальные конструкции обладают более высоким уровнем живучести (соответственно надежности) благодаря способности перераспределять нагрузки после выхода из строя ряда элементов, однако, с точки зрения материалоемкости, они обычно менее экономичны (требуют большего расхода материала), чем плоские фермы. И тогда, если сосредоточиться на существующих методах расчета, нет никакого математического способа разумно выбрать и обосновать использование пространственной структуры. Критерий отклика может использоваться как для анализа поведения отдельного элемента, так и для анализа поведения системы, в этом случае он может быть дополнен критерием предельных перемещений [14], когда предельная сила не может быть достигнута в результате больших перемещений.

Подводя итог рассуждений, можно сделать вывод, что универсальным критерием предельного состояния должна выступать кривая деформирования и анализ изменения поведения в точке условного назначаемого отказа и после достижения этой точки.

### **Заключение**

Возможность получения кривых деформирования стальных элементов посредством численных моделей, в отличие от обычных расчетов по нормативным зависимостям, сама по себе представляет очень большой интерес в теоретическом и практическом плане, и открывает новые возможности для понимания поведения элементов и дальнейшего учета этих особенностей для повышения надежности и экономичности. Информация, которую можно извлечь из этих графиков, имеет чрезвычайно важное значение. Несколько характеристик, заслуживающих особого внимания, например, область линейной стадии работы, точка потери устойчивости (бифуркации), изменение и потеря жесткости, предельная (максимальная) нагрузка, закритическая (стадия после потери устойчивости стенки) и запредельная (стадия после предельной (максимальной) нагрузки) стадии работы элемента (деформационная способность), стадия трансформацией работы отсека (горизонтальный участок на кривой или линейны наклонный).

Для всех предельных состояний единый критерий предельного состояния может быть записан в виде нулевого градиента «отклика» (зависимости «нагрузка – перемещение»), т.е.  $\delta P/\delta f = 0$  или  $\Delta P/\Delta f = 0$ . Он одинаково подходит для конструкций из любых материалов и для всех форм (видов) отказа. Критерий нулевого отклика работает во всех этих случаях и избавляет от необходимости искать какие-либо дополнительные формулировки. Также формулировка критерия предельных состояний на основе понятия «отклик» позволяет оценить степень их опасности. Для этого достаточно определить значение «отклика» элемента конструкции в состояниях, следующих за предполагаемым предельным. Следовательно, использование понятия «отклик» позволяет формировать критерии проверки живучести и надежности с позиции поведения элемента.

### **Список цитированных источников**

1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Пластинчатые элементы конструкций : ТКП EN 1993-1-5-2009 (02250). – Минск : МАиС, 2014. – Ч. 1–5. – 51 с.

2. Мартынов, Ю. С. Предельные состояния эксплуатационной пригодности, связанные с потерей местной устойчивости стенки от действия касательных напряжений / Ю. С. Мартынов, В. В. Надольский // *Металлические конструкции*. – 2013. – № 2 (19). – С. 93–101.

3. Martynov, Yu. I. Limit state design of slender steel webs associated with the shear buckling / Yu. I. Martynov, V. V. Nadolski // *Вестник БрГТУ*. – 2016. – № 1 (97) : Строительство и архитектура. – С. 171–173.

4. 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.

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. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий / В. В. Надольский, В. И. Подымако // *Строительство и реконструкция*. – 2022. – № 2 (100) – С. 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.

7. 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.

13. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1993-1-1-2009\*. – Минск : МАиС, 2014. – Ч. 1-1 – 88 с.

14. Надольский, В. В. Опыт нормирования ветровой нагрузки для территории Республики Беларусь: предыстория и современное состояние / В. В. Надольский, Ю. С. Мартынов // *Вестник Полоцкого гос. ун-та. – Серия F: Прикладные науки. Строительство*. – 2019. – № 8. – С. 64–73.

15. Тур, В. В. Вероятностные модели ветрового воздействия для климатических условий Республики Беларусь/ В. В. Тур, В. В. Надольский, А. В. Черноиван // *Вестник Брестского гос. технич. ун-та*. – 2017. – № 1 (97): Строительство и архитектура. – С. 167–171.

16. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки : СН 2.01.04-2019. – Введ. 2020.09.08. – Минск : МАиС, 2020.

17. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Особые воздействия : ТКП EN 1991-1-7-2009 (02250) – Минск : МАиС. – 2014. Ч. 1-7.

18. Рудольф, В. С. Сопоставление нормируемых значений снеговых нагрузок с многолетними метеонаблюдениями для определения стратегии безаварийной эксплуатации / В. С. Рудольф, В. А. Кудряшов, В. В. Надольский // *Вестник Брестского гос. технич. ун-та*. – 2024. – № 1 (133). – С. 72–84. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-72-84.

19. Тур, А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 / А. В. Тур. – Брест, 2012. – 228 с.

## References

1. ТКП EN 1993-1-5-2009 (02250). Evrokod 3. Proektirovanie stal'nyh konstrukcij. CHast' 1-5. Plastinchatye elementy konstrukcij. – Minsk : MAiS, 2014. – 51 s..

2. Martynov, Yu. S. Predel'nye sostoyaniya ekspluatacionnoj 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. Konceptsiya 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. – Т. 18. – Вып. 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 konechnyh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovyh 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 stenkoj metodom konechnyh 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\* Evrokod 3. Proektirovanie stal'nyh konstrukcij. CHast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy. – M: MAiS, 2014. – 88 s..

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. – M: MAiS. data vvedeniya 2020.09.08.

12. ТКР EN 1991-1-7-2009 (02250) Evrokod 1. Vozdejstviya na konstrukcii. CHast' 1-7. Obshchie vozdejstviya. Osobyе vozdejstviya. – M: MAiS..

13. Rudol'f, V. S.; Kudryashov, V. A.; Nadol'skij, V. V. Sopostavlenie normiruemyh znachenij snegovyh nagruzok s mnogoletnimi meteonablyudenyami dlya opredeleniya strategii bezavarijnoj 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 izgibaemyh zhelezobetonyh 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 конструкций 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.