

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК [UDC] 624.04

DOI 10.17816/transsyst20239120-33

© К.А. Васильев, Г.А. Аверченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАЗВИТИЮ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В своей статье авторы подчеркивают основные принципы с точки зрения устойчивости, припоминают основные исходные предпосылки и результаты расчленения на этапах проектирования и вычисляют основные до формулирования условий надежности с точки зрения предельной восприимчивости способности и предельного состояния по отклонению к естественной эксплуатации. Далее авторы уделяют внимание различению проблем нагрузки от проблемной реакции конструкции на расчеты и теоретические и экспериментальные расчеты, требуемые для трансформации нагрузок на расчеты. Авторы подчеркивают, что сначала необходимо полностью владеть т.н. «первым значением применения» теории надежности, ограниченно выявленного использования пластических резервов, учета истории реакции, пока не выполняются предпосылки использования метода предельных оснований, основанные на высокой степени теории надежности.

Ключевые слова: предельное состояние, металлические конструкции, несущая способность, прочность металлоконструкций, условия надежности.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Building structures, buildings and structures

© К.А. Vasilev, G.A. Averchenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

REMARKS ON THE DEVELOPMENT OF THE LIMIT STATE METHOD IN THE FIELD OF METAL STRUCTURES

In their article, the authors emphasize the basic principles from the point of view of sustainability, recall the basic initial prerequisites and the results of the dismemberment at the design stages and calculate the main ones before formulating the conditions of reliability from the point of view of the ultimate susceptibility of the ability and the maximum state of deviation to natural operation. Further, the authors pay attention to distinguishing between the problems of the load from the problematic reaction of the structure to calculations and

theoretical and experimental calculations required to transform loads on calculations. The authors emphasize that first it is necessary to fully own the so-called. The “first value of the application” of the theory of reliability, limitedly identified use of plastic reserves, accounting for the history of reaction, until the prerequisites for the use of the maximum foundation method based on a high degree of reliability theory are performed.

Key words: limit state, metal structures, bearing capacity, strength of metal structures, reliability conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Метод предельных состояний (далее – ПС), внедренный в области металлоконструкций около пятнадцати лет назад, в последнее время получил повышенное внимание в Чехословакии. Необходимость разобраться с различными неясностями и противоречиями в применении этого метода как с точки зрения основных правил, а также терминологии, определений и связей с областью теории нагружения или проектирования моделей, так и с точки зрения разработки спецификаций привели также к проведению конференции с международным участием и к анализу результатов работы конференции, а также последовавших дискуссий, которые кратко изложены ниже.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Применение метода ПС для металлоконструкций

1.1. Вклад метода ПС. В первую очередь, основным вкладом ПС можно считать комплексное представление об общеэквивалентных условиях надежности с точки зрения различных критериев несущей способности и работоспособности, а в дальнейшем использование математическо-статистических и вероятностных моделей для формулировки этих условий. метод в отличие от ранее существовавшего метода допускаемых напряжений. Метод ПС позволяет включить в одну базовую схему как эластичную, так и пластическую конструкцию, статический и динамический отклик, ограничение эксплуатационной пригодности и т.д. [1–4].

1.2. Метод экстремальных значений. В чехословацких спецификациях настоящая интерпретация метода ПС основана на так называемом методе экстремальных значений иногда называют теорией надежности «первого уровня», характеризуемой с точки зрения несущей способности путем сравнения определенных наиболее неблагоприятные значения нагрузки-воздействия при заданной минимальной несущей способности, с точки зрения эксплуатационной пригодности путем сравнения «средней» нагрузки-воздействия со значениями, ограничивающими работоспособность и работоспособность конструкции.

Можно ожидать, что метод, основанный на экстремальных значениях, еще долго будет служить формулировке условий надежности, даже если теоретические модели надежности разрабатываются и для методов более высоких уровней. Переходу к методам более высоких уровней должно предшествовать полное овладение практические применения первого уровня в спецификациях, а также в практике проектирования в полном объеме.

1.3 Загрузка и ее последствия. Современная концепция представления данных о нагрузке в спецификациях может быть оспорена многочисленными комментариями. Если установлены предпосылки к четкой формулировке условий надежности и соответствующих критериев несущей способности и работоспособности, то в спецификации должны быть включены такие характеристики нагружения, которые вообще необходимы для определения истории воздействия нагрузки, описывающие реакцию конструкции в течение всего срока службы, а именно с точки зрения всех важнейших критериев таких как спектр диапазонов напряжений для критерия усталости [5–8]. Особое внимание следует уделить разнице между нагрузкой – явлением, независимым от конструкции, на которую она воздействует, и реакцией конструкции на нагрузку, описываемой, например, историей напряжения или деформации, ускорением или другими переменными, входящими в условия надежности с точки зрения несущей способности и работоспособности при определении размеров конструкций и их элементов.

1.4 Теоретические и экспериментальные модели. Для определения реакции конструкции необходимо использовать различные теоретические и/или экспериментальные модели. Развитие этих моделей, дающих все более точное представление о реальном поведении конструкции, вместе с совершенствованием компьютеров позволяют учитывать влияние несовершенств, неоднородностей, сложного действия нагрузки и других переменных при анализе конструкции. Однако даже самое совершенное применение модели не заменяет условия надежности в ПС грузоподъемности или работоспособности.

Модели позволяют определить лишь те характеристики реакции, которые входят в индивидуальные условия в соответствии с их содержанием. Необходимо следить за тем, чтобы уровень расчетных моделей соответствовал уровню входных переменных и предпосылок.

2. ПС грузоподъемности

2.1 В целом. В отношении ПС несущей способности конструкция должна быть спроектирована и оценена таким образом, чтобы она была способна выдерживать установленные наиболее неблагоприятные воздействия нагрузки, не теряя при этом своей способности надлежащим образом выполнять свою функцию в течение требуемого срока службы. Определения наиболее неблагоприятных значений воздействия нагрузки, а

также определения минимальной несущей способности основаны либо на статистическом анализе рассматриваемых случайных величин для выбранного квантиля, либо на полувероятностном подходе и, возможно, на детерминистическом подходе квалифицированная оценка, соответствующая опыту, и т.д. По мере расширения знаний о случайных величинах, приведенные определения должны выводиться с возрастающей точностью в соответствии с теорией надежности.

ПС грузоподъемности исследуют по характеру отдельных условий надежности по установленным наиболее неблагоприятным последствиям нагружения, выраженным, например, предельной величиной напряжения или деформации, диапазоном напряжений спектр и др. (Табл. 1).

С учетом характера достижения несущей способности металлоконструкций, отдельных условий надежности и критериев их можно включить в основные группы, определенные в чехословацких технических условиях, действующих в целом для всех строительных конструкций. Проектируемое сооружение должно удовлетворять всем в общем равнозначным условиям несущей способности, причем не всегда заранее ясно в процессе определения размеров, какое из условий будет решающим для расчета сооружения [9–11].

В следующем тексте ПС несущей способности разбиты на группы, при этом постоянно подчеркивается специфика отдельных условий и критериев, действующих для металлоконструкций. Различие между отдельными условиями надежности состоит, с одной стороны, в механизме достижения несущей способности, с другой - в характеристиках реакции конструкции на нагрузки, которые необходимо вводить в условия надежности.

2.2 Стабильность положения (Табл. 1, СС-I). Условие устойчивости положения служит для обеспечения надежности конструкции, ее элементов от опрокидывания, подъема или смещения в опорах и т.п.

В современных случаях этот ПС оценивается в первую очередь для экстремальных значений воздействия нагрузки, а именно с точки зрения как максимальных, так и минимальных значений.

2.3 Прочность (Табл. 1, СС-II). Несущая способность определяется в случае прочностного критерия по отношению либо к теории первого порядка - простая прочность, либо к теории второго порядка - прочность устойчивости (и ко всем другим задачам, рассматривающим равновесие на деформируемой конструктивной системе). Далее - можно рассмотреть упругий, а также упругопластический диапазон структурной реакции.

2.3.1 Простая прочность (Табл. 1, СС-IIa). Оценка простой прочности основана на определении такого уровня расчетной несущей способности, при котором исключается не только полное разрушение с заданными экстремальными воздействиями нагрузки при работе (разрушение растяжного стержня, стыка и т.п.), но и возникновение такие постоянные

или полные упруго-пластические деформации, которые следует рассматривать как неприемлемые в отношении долговременной работы конструкции. Здесь речь идет об оценке критериев, отличных от критериев деформации в группе предельных состояний работоспособности.

2.3.2 «Устойчивая» (теория второго порядка) прочность (Табл. 1, СС-IIa). Долгое время явления устойчивости рассматривались как самостоятельные ПС - в исходном виде их сущности объектом рассмотрения была «идеальная» конструкция без исходных геометрических или физических несовершенств, а несущая способность выводилась из нагрузки при возникновении, бифуркации равновесия. Следование реальным структурам, а также лабораторная проверка и улучшение исходных предпосылок неизбежно привели к признанию противоречия между приведенным выше идеализированным понятием стабильности и реальным поведением. Одной из основных причин противоречия является неизбежное наличие начальных несовершенств, сменивших явление внезапного прогиба постепенным более или менее монотонным нарастанием деформации стержней или пластин/стенок, поясов, оболочек/ с самого начала нагружения. Тогда тип разрушения очень похож на тип разрушения при достижении простой прочности, но разница заключается в скорости деформации. ПС отождествляют с достижением расчетной прочности в наиболее подверженном воздействию месте и/или с достижением допустимых упругих или упругопластических деформаций местных или полных, при этом в расчете необходимо использовать теорию второго порядка.

«Стойкость устойчивости» обычно связывают с экстремальным значением монотонно возрастающей нагрузки, что, однако, не имеет общего характера, особенно при динамическом отклике.

2.4 Инкрементальное обрушение (Табл. 1, СС-III). При использовании пластических резервов несущая способность может быть связана с превышением допустимых остаточных деформаций в случаях, когда критерий приспособляемости не выполняется. Именно увеличение упругопластических деформаций по критерию прочности соответствует истории нагружения.

2.5 Малоцикловая усталость (Табл. 1, СС-IV). В тех случаях, когда истории нагружения соответствуют пластические инверсии в отдельных частях конструкции, необходимо оценивать состояние надежности с точки зрения малоцикловой усталости. Отклик на нагрузку должен выражаться числом и величиной пластических реверсий за весь срок службы, а критерием является прочность при малоцикловой усталости, определяемая в данном случае для конкретного материала допустимым числом циклов альтернативной пластификации, определенной степени, например, согласно закону Мэнсона-Коффина.

2.6. Многоцикловая усталость (Табл. 1, СС-V). В случае значительного временного отклика кумуляция усталостных повреждений в основном связана с зарождением и распространением усталостных трещин. Условие надежности с точки зрения многоциклового усталости включает в себя характеристики отклика, выраженные, например, спектром напряжений в исследуемой местности за время жизни конструкции. Наиболее неблагоприятные эффекты нагрузки определяются крайними значениями реакции, такими как «экстремальный спектр». Критерий не зависит от расчетной прочности материала, а основан на зависимости для многоциклового усталости, определяемой, например, кривыми S–N, установленными по результатам эксперимента для выбранного квантиля [12–14]. Связь между характеристикой наиболее неблагоприятного отклика и прочностью при многоциклового усталости должна выражаться в зависимости от решающих переменных с точки зрения механизмов кумуляции усталостных повреждений, различающихся, например, в стальных канатах, композитных профили, тонкостенные профили и др.

2.7 Хрупкое разрушение (Табл. 1, СС-VI). В районе строительных конструкций зданий, мостов и т.п. появляются повреждения в виде хрупкого разрушения; элемент поврежден быстро распространяющейся трещиной без предварительного предупреждения. ПС повреждения через разрушение оценивается условием надежности, которое включает, с одной стороны, реакцию на нагружение, выраженную напряжениями, скоростью нагружения, температурой и т. д., с другой – свойства материала, дефекты и другие несовершенства конструкции. конструкция, остаточные напряжения и т.д. Хрупкое разрушение может появиться даже при очень малой нагрузке по сравнению с критерием прочности.

2.8 Дополнительные примечания (Табл. 1, СС-VII). Приведенное выше перечисление ПС в общем случае не является полным.

Значительное снижение надежности может происходить и при сочетании перечисленных выше отдельных условий - например, элемент конструкции удовлетворяет как условию малоциклового усталости, так и условию многоциклового усталости, но два соответствующих вида повреждения не являются независимыми: альтернативные пластификации может значительно ускорить разрушение от многоциклового усталости. Аналогичным образом риск повреждения может значительно возрасти в конструкциях, подвергающихся одновременно многоциклового усталости и напряжению, приводящему к хрупкому разрушению.

В металлических конструкциях реологические свойства материала обычно выражены слабо. Лишь в некоторых случаях (сталь при более высоких температурах, составные железобетонные конструкции, соединения трения и т. д.) необходимо учитывать зависимость деформации от времени и соответствующую предысторию.

2.9 Характеристики нагрузки и реакции. В Табл. 1 четко представлены характеристики нагрузки и отклика, необходимые для оценки переносимости в соответствии с индивидуальными условиями от СС-1 до СС-VII. Существующее расположение значений и данных по нагрузке, касается прежде всего условия прочности СС-I. Убедиться, что нормативы нагружения соответствуют комплексности условий надежности по Табл. 1, необходимо постепенно дополнять эти спецификации данными, которые (при использовании соответствующих теоретических или экспериментальных моделей) позволяют определить характеристики отклика, необходимые для проверки условий надежности от СС-I до СС-VII.

3. ПС исправности

3.1 В целом. Металлоконструкции должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать не только нагрузки по ПС несущей способности (см. раздел 2), но и удовлетворять требованиям эксплуатации и работоспособности при обычных эксплуатационных нагрузках и их воздействиях. Некоторые ограничения работоспособности в отношении комфорта человека, работы механизмов и т. д. уже включены в технические условия. В качестве критериев рассматриваются допустимые ускорения, деформации, повороты и т. д.

Понятно, что в группе ПС работоспособности эффекты нагружения оцениваются иначе, чем эффекты, заложенные в условия надежности с точки зрения несущей способности. Приведем краткую характеристику условий надежности с точки зрения работоспособности металлических конструкций.

3.2 Классификация ПС по исправности. В Табл. 2 представлены основные группы ПС по эксплуатационной пригодности, общие для всех металлоконструкций. Добавлена группа SA-V, относящаяся к шуму, создаваемому работой конструкции.

Необходимо подчеркнуть, что определение входных воздействий нагружения и критериев при формулировке условий надежности по работоспособности конструкции в общем случае весьма индивидуально - оно зависит от функции, назначения, требований пользователя, защиты от повреждения технологического оборудования и т.д. - и поэтому соответствующие нормы в проектных заданиях могут быть сформулированы лишь частично качественно и количественно.

В Табл. 2 условия надежности по работоспособности классифицированы на группы по влиянию на комфорт человека, на здание, машины или другое технологическое оборудование.

3.3 Загрузка и отклик с точки зрения удобства обслуживания. В качестве репрезентативных эффектов нагружения по отношению к ПС работоспособности часто упрощенно рассматривают эффекты нагрузки (отклика), соответствующие «средней» рабочей нагрузке. Как правило,

необходимо предусмотреть взаимосвязь между нагрузкой и фактическим критерием работоспособности в рамках конкретного проекта (например, по согласованию с пользователем), так как «текущая» эксплуатационная нагрузка и соответствующие эффекты могут в отношении функциональных требований соответствовать интенсивности нагрузки, значительно отличающейся от рабочей нагрузки. Заметим, что сама рабочая нагрузка в расчет не входит, для определения размеров следует использовать расчетные значения, с одной стороны по условиям грузоподъемности, а с другой стороны по эксплуатационной пригодности, где временно обычно предписывается коэффициент нагрузки 1,0. Однако это значение может быть постепенно заменено в будущем значениями меньше или больше 1,0, в соответствии с характером дела.

3.4 Условия надежности (Табл. 2).

3.4.1 Комфорт человека (SA-I, SA-V);

Критерии делятся:

- по допустимому ускорению движения, выражающему допустимую динамическую реакцию на нагрузку (горизонтальная и вертикальная вибрация и др.);
- по допустимой деформации (эстетический и психологический эффект);
- по допустимому уровню шума, создаваемого работающей конструкцией, и т.д.

Некоторые критерии представлены, например, в гигиенических нормативах, в стандартах на проектирование металлоконструкций; часто предельные значения должны устанавливаться разработчиком по согласованию с пользователем, разработчиком оборудования и т. д.;

3.4.2 *Защита от повреждения строительного оборудования (SA-II).* Воздействие нагрузки не должно вызывать повреждений перегородок, стекол, потолков и других частей здания, при этом необходимо учитывать текущие неблагоприятные статические, а также динамические воздействия нагрузки и адекватно сформулированные критерии;

3.4.3 *Эксплуатация технологического, машинного и др. оборудования сооружения (SA-III).* Текущие эксплуатационные воздействия, как статические, так и динамические, не должны достигать таких значений, которые могут нарушить работу и функционирование оборудования, поддерживаемого конструкцией.

Предел статических деформаций, а также динамического отклика должен определяться разработчиком оборудования и/или пользователем в отношении чувствительности, безотказности и т. д. При формулировке условия надежности в отношении работоспособности следует необходимо учитывать временное использование сооружения (постоянное или эпизодическое, служебное и т. д.);

3.4.4 *Газонепроницаемость и водонепроницаемость (SA-IV)*. В бассейнах, корпусах реакторов и т. п. работоспособность может зависеть от герметичности винтовых, заклепочных или сварных соединений и/или от конструктивного расположения деталей. При оценке необходимо принять во внимание, какие последствия нагрузки должны быть подтверждены критериями газо- или водонепроницаемости [15];

3.4.5 *Снижение шума (SA-V)*. Условие эксплуатационной пригодности с точки зрения шума, создаваемого работающей конструкцией, может применяться, например, в случае мостов с коробчатыми балками в городских районах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения дальнейшего развития метода ПС металлоконструкций можно выделить следующие выводы:

Тип вероятностного метода. Можно сделать вывод, что применительно к развитию и особенно к практическим применениям метода ПС в области металлоконструкций методика проектирования и оценки еще долгое время будет основываться на так называемой теории надежности первого уровня, т.е. по методу экстремальных значений. Этот метод должен быть разработан в отношении всей комплексной системы условий надежности и критериев как несущей способности, так и работоспособности, прежде чем можно будет ввести в стандарты теорию надежности более высокого уровня.

Загрузка и реакция. Условия надежности с точки зрения ПС несущей способности, а также работоспособности включают, вообще говоря, значения и характеристики реакции конструкции на нагрузку, выраженные в истории напряжения или деформации, в ускорении и т.д. Величины нагрузки - явления, вообще не зависящего от конструкции, на которую она действует, - вообще говоря, не включаются в определение размеров и оценку напрямую, а только через теоретические или экспериментальные модели, позволяющие определять статический или динамический и упругий или упруго-пластический отклик. Спецификации в отношении нагрузки и проектирования конструкций должны постепенно дополняться данными, информацией и значениями, необходимыми для определения реакции с точки зрения всех критических условий несущей способности и эксплуатационной пригодности (Табл. 1, 2).

Условия надежности. При определении размеров металлоконструкций должен быть обеспечен комплекс эквивалентных условий надежности по несущей способности и эксплуатационной пригодности. По характеру достижения несущей способности в металлоконструкциях можно указать основные условия надежности,

представленные в Табл. 1. Аналогично можно классифицировать условия надежности по показателям работоспособности (Табл. 2).

Задача проектировщика состоит в том, чтобы учесть весь набор условий и достичь условий, имеющих решающее значение для определения размеров, путем исключения.

При дальнейшей разработке норм, правил и т.п. на проектирование металлоконструкций, в том числе нормативов нагружения, комплекс условий и критериев, представленных в Табл. 1, 2 следует учитывать.

Применение теории надежности. При определении наиболее неблагоприятных воздействий нагрузки и минимальной грузоподъемности с точки зрения ПС грузоподъемности, а также средних воздействий нагрузки и критериев с точки зрения ПС работоспособности следует руководствоваться теорией вероятностей, статистикой и т. д. все больше занятых. Из-за сложности затрагиваемых проблем, отсутствия данных и т. д. определения все еще часто основаны на детерминированной оценке, на опыте и т. д. По мере совершенствования методов проектирования и соответствующих спецификаций необходимо дополнять информацию на критических случайных величинах после соответствующего анализа.

Таблица 1. Предельные состояния несущей способности и соответствующие условия надежности

| Предельные состояния | Индикация | Описание загрузки | Условия надежности по грузоподъемности | |
|------------------------|----------------|---|--|---|
| | | | Описание ответа | Критерий грузоподъемности |
| Стабильность положения | СС-I | Экстремальное (самое высокое и самое низкое) значение | Экстремальные эффекты (самый высокий и самый низкий) | Безопасность ($> 1,0$) от потери устойчивости положения |
| Прочность | СС-Па СС-Пб | Экстремальные значения нагрузки с учетом их одновременного возникновения, динамической реакции конструкции и т.п. | Напряжения или деформации, соответствующие экстремальным нагрузкам, включая динамическую реакцию и т. д. | Расчетная прочность, допускаемые местные или полные деформации, допускаемые относительные пластические деформации и др. |
| Встряска | СС-III | История загрузки, в том числе предельные значения нагрузок | История упругопластических деформаций, соответствующая истории нагружения | встряска критерий |
| Малоциклова | СС-IV | История из | Количество и | Критерий |

| Предельные состояния | Индикация | Описание загрузки | Условия надежности по грузоподъемности | |
|-------------------------|-----------|---|--|---|
| | | | Описание ответа | Критерий грузоподъемности |
| я усталость | | загрузки | ассортимент пластиковых разворотов | Мэнсона-Гроба, Серенсена и др . |
| Многоцикловая усталость | СС-V | История из загрузки | Спектр диапазонов напряжений и т. д. | S – N кривые и т.д. |
| Хрупкое разрушение | СС-VI | Экстремальные значения, скорость загрузки, окружающая среда и т. д. | Стресс, скорость загрузки и реакция, температура и т. д. | Расчетное значение K_{IC} для данного материала и т. д. |
| Комбинации | СС-VII | Что касается частного случая | По частному случаю | |

Таблица 2. Предельные состояния и условия надежности в отношении работоспособности металлоконструкций

| Условия надежности по предельным состояниям работоспособности металлических конструкций | | | |
|---|---|---|---|
| Индикация | Требование | Эффекты нагрузки | Критерий |
| СА-I | Человеческий комфорт | Эффекты «средней» нагрузки (или нагрузки, соответствующей обычной требуемой функции), характеризующиеся деформацией, ускорением и т. д. | Допустимая деформация, допустимое ускорение и т. д. |
| СА-II | Сокращение или ограничение ущерба от строительных добавок | | |
| СА-III | Обеспечение требуемой работы машин, технологического и др. оборудования | | |
| СА-IV | Газонепроницаемость и водонепроницаемость | Индивидуально в зависимости от характера конструкции и условий эксплуатации см. Гигиенические правила | |
| СА-V | Ограничение шума, вызванного работой конструкции | | |

РЕКОМЕНДАЦИЯ К ПЕЧАТИ

Кандидат военных наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Алексеев Сергей Викторович рекомендует статью Васильева К.А., Аверченко Г.А. «Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций» к публикации.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д. Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 118–125. [Yushkov VS, Kychkin VI, Barmin ND. Realizaciya diagnostiki i remonta mostovykh sooruzhenij. *Vestnik MGSU*. 2016;(6):118-125. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26210458>
2. Зубко О. В. Виды предельных состояний металлических сварных конструкций при эксплуатации при проведении экспертизы промышленной безопасности // Проблемы современной науки и образования. – 2015. – № 10(40). – С. 46-49. [Zubko O. V. Types of limit states of metal welded structures during operation during the examination of industrial safety. *Problems of modern science and education*. 2015;10(40):46-49. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24238808>
3. Редькин А.Н. Определение надежности металлических конструкций при ограниченной информации по критерию несущей способности // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4(33). – С. 274-280. [Redkin AN. Determination of the reliability of metal structures with limited information according to the criterion of bearing capacity. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012;4(33):274-280. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18793396>
4. Аверченко Г.А., Баланин А.П., Борисов В.А., и др. Использование жесткой нити в качестве несущего элемента покрытий больших пролетов / В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерностроительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – 2021. – С. 227–229. [Averchenko GA, Balanin AP, Borisov VA, et al. Ispol'zovanie zhestkoj niti v kachestve nesushhego jelementa pokrytij bol'shikh proletov. V sbornike: Nedelja nauki ISI. Materialy vserossijskoj konferencii v 3-h chastjah. Inzhenerno-stroitel'nyj institut Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta Petra Velikogo. 2021:227-229. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294823>
5. Черных А.Г. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 150. [Chernykh AG. Methods for studying the joints of wooden structures on claw dowels. *Modern problems of science and education*. 2013;(2):150. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21285503>
6. Соколов С.А. Методика прогнозирования разрушения сварных металлических конструкций подъемно-транспортных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 12. – С. 22-28. [Sokolov SA, Plotnikov DG. The method of predicting the destruction of welded metal structures of lifting and transport machines. Repair. Recovery. Modernization. 2015;(12):22-28. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25097248>
7. Луцко Т.В. Введение норм на проектирование и расчет крановых металлоконструкций // Современное промышленное и гражданское

- строительство. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 39-42. [Lutsko TV. Introduction of norms for the design and calculation of crane metal structures. *Modern industrial and civil construction*. 2006;2(1):39-42. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13088910>
8. Шутова М.Н., Евтушенко С.И., Гонтаренко Б.А., и др. Оценка технического состояния поврежденных металлических элементов конструкций / В сборнике: Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений: Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции, Краснодар. – 2019. – С. 88–101. [Shutova MN, Evtushenko SI, Gontarenko BA, et al. Assessment of the technical condition of damaged metal structural elements / In the collection: Modern equipment, methods of instrumental inspection and strengthening of buildings and structures: Collection of scientific articles on Materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar. 2019:88-101. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38568482>
 9. Югов А.М. Оценка несовершенств строительных металлических конструкций на основе теории нечетких множеств // Металлические конструкции. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 43-51. [Yugov AM. Estimation of imperfections of building metal structures based on the theory of fuzzy sets. *Metal constructions*. 2008;14(1):43-51. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13050069> Ссылка активна на: 27.02.2023.
 10. Гулаков В.С., Шушляков Р.С., Аверченко Г.А., и др. Снижение материалоемкости несущих конструкций временных сооружений для транспортного строительства / В сборнике: Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022 года. Том Часть 2. – 2022. – С. 5–7. [Gulakov VS, Shushlyakov RS, Averchenko GA, et al. Reducing the material consumption of load-bearing structures of temporary structures for transport construction. In the collection: ISI Science Week: Collection of materials of the All-Russian Conference, St. Petersburg. 2022:5-7. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48731847&pff=1>
 11. Зорина Е.А., Ким Д.У., Аверченко Г.А., Уколов С.А. Устойчивость конструкций автодорожных и железнодорожных мостов при вынужденных колебаниях стержневых систем // Путь навигатор. – 2021. – № 47(73). – С. 39–47. [Zorina EA, Kim DU, Averchenko GA, Ukolov SA. Ustojchivost' konstrukcij avtodorozhnyh i zheleznodorozhnyh mostov pri vynuzhdennyh kolebanijah sterzhnevyyh sistem. *Path Navigator*. 2021;(47(73)):39-47. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46208591>
 12. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Разработка перспективных (гибридных) конструкций пролетных строений мостов из сталей различной прочности // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 3. – 67 с. [Kartopol'cev VM, Kartopol'cev AV. Hybrid design of bridge span structures made of different strength steel. *Vestnik TGASU*. 2017;(3):67. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29345496>
 13. Алексеев С.В., Шевченко С.М., Трифонова А.А. Выявление наиболее надежных конструкций деформационных швов // Путь навигатор. – 2021. – № 46(72). – С. 36–43. [Alekseev SV, Shevchenko SM, Trifonova AA. Vyjavlenie naibolee nadezhnyh konstrukcij deformacionnyh shvov. *Path Navigator*. 2021;(46(72)):36-43. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45154681> Ссылка активна на: 27.02.2023.

14. Марутян А.С. Разработка и исследование управляемых металлических конструкций нового поколения // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 5(238). – С. 75–83. [Marutyán AS. Development and study of controlled metal structures of a new generation. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2011;(5(238)):75-83. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17088365>
15. Шульгин В.Н. Несущая способность и расчет металлических балок // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 3. – С. 11–17. [Shulgin VN. Bearing capacity and calculation of metal beams. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2009;(3):11-17. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16341933>

Сведения об авторах:

Васильев Кирилл Андреевич, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

Аверченко Глеб Александрович, ассистент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Information about the authors:

Kirill A. Vasilev, master's degree student;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

Gleb A. Averchenko, assistant;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Цитировать:

Васильев К.А., Аверченко Г.А. Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 20–33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33

To cite this article:

Vasilev KA, Averchenko GA. Remarks on the development of the limit state method in the field of metal structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):20-33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33