

УДК 624.075
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>
 EDN: WVVQNT
 Научная статья



УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЯСОВ АНТЕННЫХ ОПОР

Ю. В. Краснощеков^{1*}, М. Ю. Заполева²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»

²ООО СМУ-175 «Радиострой»

г. Омск, Россия,

uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>

m18kras@spartak.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7123-6457>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье решаются вопросы устойчивости сжатых поясов решетчатой конструкции как систем в виде неразрезных стержней, состоящих из элементов-панелей. В настоящее время расчетная длина сжатых элементов установлена нормами проектирования для расчета устойчивости без учета изменчивости, обусловленной влиянием многочисленных случайных и системных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения. И, самое главное, не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций. Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

Материалы и методы. Показано, что значения коэффициента расчетной длины установлены нормами с запасом, обусловленным, в частности, обеспечением надежности конструктивных систем сжимаемых элементов. Предлагается рассматривать расчетную длину сжатых элементов как случайную величину. Решается задача по вероятностной оценке свободной (расчетной) длины центрально сжатого элемента как параметра критической силы потери устойчивости. Приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования. Для оценки изменчивости показателей устойчивости ставится задача проведения экспериментальных исследований, в частности, с измерением частот колебаний натурных конструкций. Управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

Выводы. Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями коэффициента расчетной длины путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации). При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством и инструментом совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антенная опора, решетчатая конструкция, стержневая система, устойчивость элементов металлических конструкций, коэффициент расчетной длины, вероятностный расчет.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 17.10.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Устойчивость поясов антенных опор // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 936-948. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-936-948>

© Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю., 2022



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

EDN: WVVQNT

STABILITY OF ANTENNA SUPPORT BELTS

Yuriy V. Krasnoshchekov^{1*}, Maria Y. Zapoleva²

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>

²ООО SMU-175 «Radiostroy»

Omsk, Russia,

m18kras@spartak.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article deals with the issues of stability of compressed belts of lattice construction, as systems in the form of continuous rods consisting of panel elements. Currently, the estimated length of compressed elements is established by design standards for calculating stability without taking into account variability due to the influence of numerous random and systemic factors. This approach does not encourage the improvement of design solutions, the quality of their execution and the control of the structure. And most importantly, it does not allow to realize the reserves of the bearing capacity of structures laid down by the norms. The purpose of this study is to identify and substantiate the reserves of the bearing capacity of antenna supports of a lattice structure according to the criterion of stability of compressed belts.

Materials and methods. It is shown that the values of the calculated length coefficient are set by norms with a margin, due, in particular, to ensuring the reliability of structural systems of compressible elements. It is proposed to consider the estimated length of compressed elements as a random variable. The problem of probabilistic estimation of the free (calculated) length of a centrally compressed element as a parameter of the critical force of loss of stability is solved. The possible normative and calculated values of the calculated length coefficient are given, ensuring the reliability of the calculation of compressed antenna support belts, adopted in the current design standards. To assess the variability of stability indicators, the task is to conduct experimental studies, in particular, with the measurement of vibration frequencies of full-scale structures. By controlling the variability indicators of the calculated length coefficient, it is possible to regulate not only reliability, but also the load-bearing capacity reserves provided for by design standards.

Conclusions. The proposed approach to the calculation of stability allows to control the calculated values of the calculated length coefficient by controlling statistical variability (coefficient of variation). If there are available methods for measuring indicators, the approach described in the article to calculating compressed elements for stability can be an effective means and tool for improving design solutions, the quality of their execution and control of the structure.

KEYWORDS: antenna support, lattice structure, rod system, stability of elements of metal structures, coefficient of design length, probabilistic calculation.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 17.10.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Krasnoshchekov Yuriy V., Zapoleva Maria Y. Stability of antenna support belts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 936-948. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

© Krasnoshchekov Y. V., Zapoleva M. Y., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. В настоящее время расчетная длина сжатых элементов решетчатых конструкций установлена нормами проектирования для расчета устойчивости без учета изменчивости величины коэффициента расчетной длины, обусловленной влиянием многочисленных случайных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения. И, самое главное, не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций. Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

2. Предлагается рассматривать расчетную длину сжатых элементов как случайную величину. Решается задача по вероятностной оценке свободной (расчётной) длины центрально сжатого элемента как параметра критической силы потери устойчивости. Приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования. Основная проблема реализации такого подхода заключается в оценке изменчивости коэффициента расчетной длины. Дана оценка влияния на этот параметр изменчивости внешних воздействий и прочности стали. Для уточнения характеристик изменчивости показателей устойчивости ставится задача проведения экспериментальных исследований, в частности, с измерением частот колебаний натурных конструкций. Управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины, можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

3. Установлено, что расчетные значения коэффициента расчетной длины μ приняты нормами с запасом, обусловленным как минимум необходимостью обеспечения надежности конструктивных систем сжимаемых элементов. Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями коэффициента расчетной длины путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации). При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством и инструментом совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

ВВЕДЕНИЕ

Антенные опоры – распространенный вид инженерных сооружений связи. Несущая система антенных опор выполняется обычно в виде башни или мачты с оттяжками. Изначально предпочтение отдавалось более экономичным по расходу материалов мачтам, но при наличии проблем с площадью застройки применяют башни [1, 2].

В настоящее время в связи с развитием систем сотовой связи осуществляется широкомасштабное строительство и реконструкция существующих металлических антенных опор. В условиях рыночной экономики возрастает конкурентоспособность сооружений, требующая поиска и применения нетрадиционных подходов при проектировании вновь возводимых объектов и необходимость оценки несущей способности с учетом фактического состояния реконструируемых сооружений.

Башни и стволы мачтовых опор различного назначения, как правило, проектируют в виде пространственных решетчатых конструкций, представляющих системы стержневых элементов (рисунок 1). Основными элементами являются многоярусные пояса, сжатые или растянутые от действия собственного веса и ветровой нагрузки, а также распорки и раскосы, выполняющие опорную функцию для неразрезных систем поясов.

Пояса выполняют из труб круглого или прямоугольного сечения, уголкового или специального гнутого профиля и расчленяются на панели длиной l . Несущая способность каждой панели сжатых поясов определяется из расчета на устойчивость и характеризуется расчетной длиной l_{ef} и радиусом инерции сечения i . Пространственную решетчатую конструкцию с поясами из труб или спаренных уголков допущено рассматривать как систему плоских, и для определения расчетной длины панели используются указания по проектированию плоских ферм. В общем случае обычно принимают $l_{ef} = l$. Расчетная длина панели из одиночных уголков зависит от структуры решетки и принимается в большинстве случаев, согласно СП «Стальные конструкции», равной l .

Известно, что расчетная длина сжатых элементов зависит от условий закрепления их концов и вида нагрузки (рисунок 2), является основным параметром местной устойчивости элементов пояса и определяется по формуле

$$l_{ef} = \mu l, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расчетной длины.

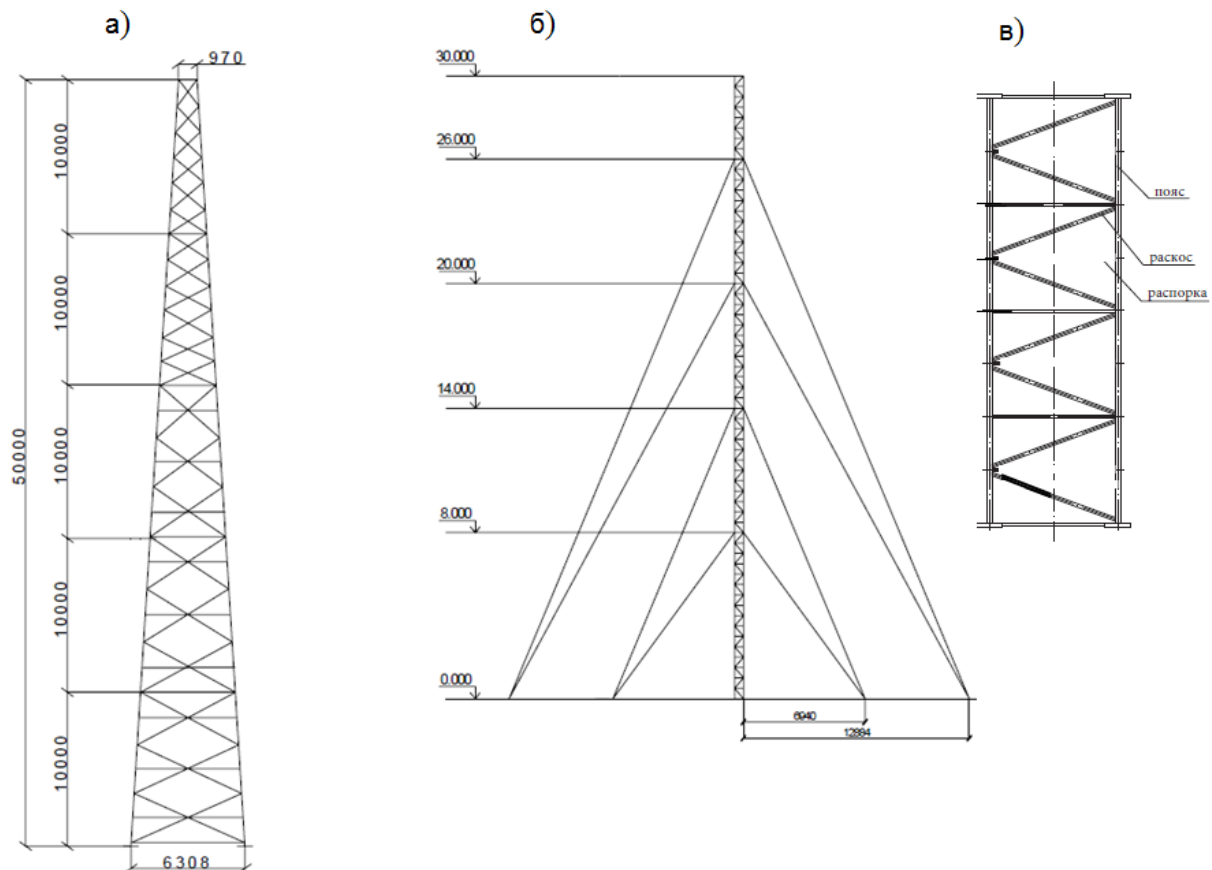


Рисунок 1 – Примеры конструктивных решений башни и мачты
 а – башня; б – мачта; в – вариант типовой секции ствола мачты
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Examples of tower and mast design solutions:
 a) tower; b) mast; c) a variant of a typical section of the mast trunk
 Source: compiled by the author.

Применительно к пространственным решетчатым конструкциям расчетная длина панели из одиночных уголков принимается в зависимости от типа пространственной решетки и способа крепления элементов решетки к поясу при значениях μ от 0,64 до 1. Если пояса из труб или спаренных уголков рассматривать как неразрезанный стержень постоянного сечения с различными усилиями в панелях, то из

предположения шарнирного сопряжения элементов решетки коэффициент μ определяется по эмпирической формуле

$$\mu = (0,17\alpha^3 + 0,83) \geq 0,8, \quad (2)$$

где α – отношение усилия, соседнего с максимальным, к максимальному усилию в панелях; при этом $1 \geq \alpha \geq 0,55$.

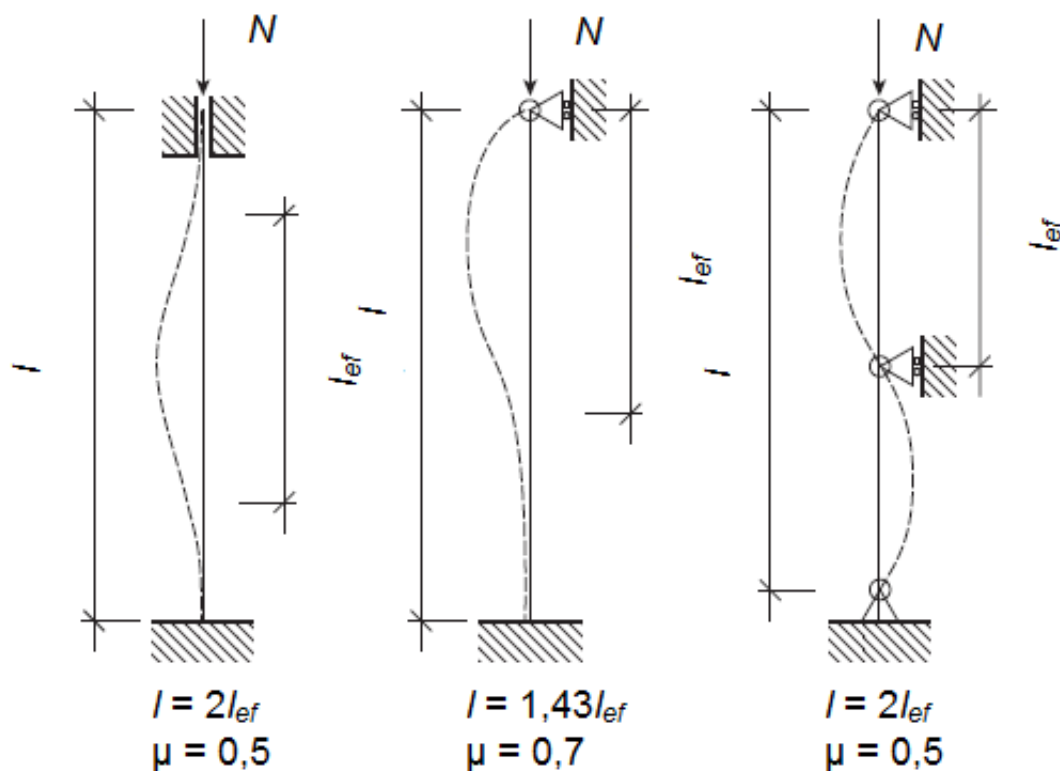


Рисунок 2 – Основные формы потери устойчивости центрально сжатых стержней
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The main forms of loss of stability for centrally compressed rods
Source: compiled by the author.

Зависимость расчетной длины панели от числа панелей в неразрезном поясе в нормах проектирования напрямую не отмечена. Однако в косвенном виде такая зависимость просматривается. Например, в сооружении с элементами из одиночных уголков и структурой решетки по рисунку 1, в при отсутствии распорок в пределах длины расчетного участка l_m , которая принята равной длине двух панелей l , исходят из условия потери устойчивости в двух смежных панелях одновременно. При этом расчетная длина участка принимается $l_{ef} = \mu l_m$ и $\mu = 0,64$. Такая же ситуация складывается по причине возможности потери устойчивости в разных плоскостях конструкций с не совмещенными в смежных гранях узлами.

Таким образом, в настоящее время расчетная длина сжатых элементов решетчатых конструкций установлена нормами без учета изменчивости величины коэффициента расчетной длины, обусловленной влиянием

многочисленных случайных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения и не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций.

Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

До внедрения метода расчета по предельным состояниям решались только вопросы общей устойчивости радиомачт и радиобашен (антенных опор). В расчетах конструкция ствола мачты рассматривалась как шарнирно-сочлененный многопролетный стержень, который может потерять устойчивость только из-за недостаточного учета податливости оттяжных опор.

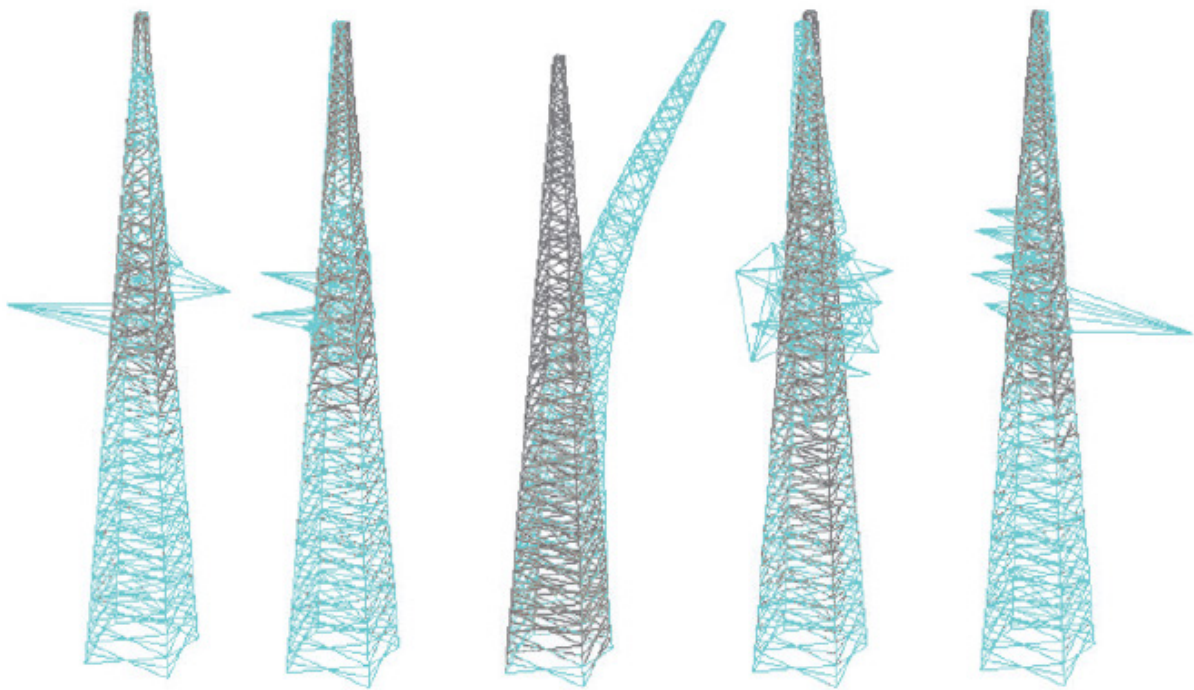


Рисунок 3 – Первые пять форм потери устойчивости [сноска 3]

Figure 3 – The first five forms of stability loss [footnote 3]

Радиобашню представляли в виде консольного стержня, потеря устойчивости сжатого пояса которого не может произойти, так как считалось, что этому препятствует решетка башни. Существовало мнение, что в вопросе об устойчивости радиобашен опыт их эксплуатации убедительнее теоретических исследований [3].

Требования к расчетным параметрам конструктивных элементов антенных сооружений с момента издания специального нормативного документа¹ для объектов связи как дополнение к главе СНиП «Стальные конструкции» практически не изменились, несмотря на значительный объем в основном теоретических исследований, выполненных, в том числе за последнее время. Расчетные длины элементов башни определялись и определяются в настоящее время как для плоских конструкций ферм.

Авторами работы [4] при расчете решетчатых башен традиционных форм и соотноше-

ний между жесткостями элементов допускается рассматривать в виде пространственной стержневой системы с шарнирными узлами соединений элементов.

Син Вань Сян решал задачу для определения упругих пространственных деформаций сжатых поясов решетчатых ферм как многопролетных в двух плоскостях систем с учетом начальных несовершенств [5]. Задача решается в несколько этапов. Сначала выполняется деформационный расчет пояса по неразрезной схеме и определяется наиболее загруженная панель, а затем осуществляется переход к эквивалентной однопролетной модели и проверка пространственной устойчивости пояса и отдельных панелей с общепринятыми условиями закрепления. Выявлены 15–30% резервов пространственной устойчивости отдельных панелей по сравнению с результатами расчета по нормам проектирования. Экспериментальная проверка результатов исследования не проводилась.

¹ Указания по проектированию металлических конструкций антенных сооружений объектов связи. СН 376-67. М.: Стройиздат, 1968. 26 с.

Подобное исследование применительно к башенным конструкциям выполнял А. А. Артёмов² [6]. При расчете по реализованной им расчетной методике получено увеличение несущей способности поясов антенных опор из одиночных уголков на 15–20%. По мнению автора, эффект достигнут за счет учета реальной жесткости узловых соединений элементов. Основанием этого являются результаты экспериментального исследования жесткости заделки концов стержня в зависимости от многочисленных факторов. Выявлено, что реальная жесткость далека от «шарнирной» и принимает средние значения по отношению к абсолютной заделке.

В монографии [7] описан метод расчета общей и местной устойчивости сжатых упругопластичных и хрупких стержневых элементов конструкций. Метод позволяет отказаться от понятия расчетной длины, благодаря чему, по мнению автора, расчет становится менее трудоемким и более точным.

В статье [8] приведены результаты анализа конструктивной формы антенных опор и разработан типовой ряд оптимальных решений.

Задача о потере устойчивости высотных сооружений часто сводится к задаче о поиске собственных частот или форм колебаний. В книге³ приведены результаты моделирования башни с целью оценки влияния различных отказов на общую устойчивость башенного сооружения (рисунок 3). Анализируя показатели запаса общей устойчивости, можно сделать вывод о незначительном влиянии на них отказов из-за потери местной устойчивости отдельных элементов.

Оценке влияния крутильной жесткости узлового соединения балка-стойка на несущую способность, устойчивость и долговечность конструкции из тонкостенных элементов посвящена статья [9]. Результаты, полученные в ходе натурных испытаний с упрощенным вариантом конструкции, сравнивались с данными компьютерного моделирования.

По результатам расчета мачт с дефектом в виде отклонения угла крепления оттяжек от

проектного положения отмечена возможность снижения несущей способности до 25% [10].

Диссертация А. Р. Олуромби посвящена изучению напряженно-деформированного состояния стальных труб⁴ [11]. Натурные испытания труб показали, что на несущую способность существенное влияние оказывают характер и величина начальных несовершенств стенок труб. Результаты испытаний отличаются от расчетных данных по нормам проектирования.

В работах [12, 13] для расчета НДС конструкций башенных сооружений сплошнотенчатых и решетчатых сечений и их узлов рекомендуются методы компьютерного моделирования, позволяющие получать достоверные сведения о прочности и устойчивости сооружений и принимать оптимальные их характеристики. В статье [14] приведены результаты сравнения расчета башни по ПБК SCAD Office и Лира-САПР.

Исследована устойчивость решетчатой колонны с учетом промежуточных упругих опор и переменного продольного усилия [15].

В [16, 17] выполнен анализ работы башен под нагрузкой с оценкой влияния различных типов решетки.

В статье [18] выполнен анализ влияния на устойчивость стержней из стальных труб случайных факторов: начальной кривизны (максимальной стрелки и формы погиби), расцентровки и остаточных напряжений, возникающих при изготовлении.

В монографии [19] приведено решение задачи по определению эффективной длины панели верхнего пояса фермы с постоянным поперечным сечением в зависимости от числа панелей n . Исходя из предположения распределения сжимающих усилий в поясе по параболе, получено выражение для коэффициента эффективной длины наиболее напряженной панели (при $n = 3 \dots 10$):

$$\mu = \sqrt{1 - 5/4n}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что при увеличении n коэффициент μ стремится к единице. Сде-

² Артёмов А. А. Устойчивость стержневых элементов, работающих в составе решетчатых конструкций / Автореферат кандидатской диссертации. М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2004. 25 с.

³ Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс»: учебник для вузов / А.Р. Туснин, В.А. Рыбаков, Т.В. Назмеева [и др.]; под общ. ред. А.Р. Туснина. М.: Издательство «Перо», 2020. 436 с.

⁴ Олуромби А. Р. Напряженно-деформированное состояние прямошовных и спиральношовных труб из сталей повышенной и высокой прочности при сжатии с изгибом / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2020. 162 с.

лан вывод, что сжатый пояс, элементы которого в пределах практических расчетов спроектированы одинаково безопасно, должен быть рассчитан так, как если бы они были шарнирно соединены в узлах.

В результате обзора исследований конструкций и методов расчета устойчивости антенных опор установлено:

- основной объем исследований посвящен совершенствованию конструктивных решений антенных опор на основе нормативных требований к металлическим конструкциям;
- теоретические исследования общей и местной устойчивости решетчатых опор связаны с разработкой новых методов расчета, позволяющих реализовать резервы несущей способности конструкций, выполненных с учетом норм проектирования, и получить экономический эффект;
- традиционные обследования технического состояния сооружений ограничиваются фиксацией дефектов и повреждений без расчетной оценки их влияния;
- экспериментальные исследования проводятся методом компьютерного моделирования; не обнаружено сведений по исследованию натуральных конструкций или их моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Условием потери устойчивости центрально сжатых элементов являются деформации изгиба вследствие повышенной гибкости и (или) влияния многочисленных случайных факторов [18]. Поэтому для анализа устойчивости применимы вероятностные методы [20]. Решается конкретная задача по вероятностной оценке свободной (расчетной) длины центрально сжатого элемента l_{ef} необходимого параметра критической силы N_{cr} .

Расчет по критерию устойчивости обычно сводится к проверке условия

$$N \leq N_{cr}. \quad (4)$$

Для анализа исходим из предпосылки критической силы по формуле Эйлера, положенной в основу методик расчета отечественных и европейских норм проектирования [21]:

$$N_{cr} = \pi^2 EI / (\mu l)^2. \quad (5)$$

Отметим, что формула (5) определяет значение N_{cr} как критическую силу двухшарнирного сжатого стержня длиной μl . По мнению Блейха, значение коэффициента μ должно быть больше единицы, так как значение $\mu =$

1 соответствует предельному значению, которое не может быть превышено [20].

В дальнейшем анализе исходим из представления μ как случайной величины $\tilde{\mu}$, вероятностные характеристики которой зависят от изменчивости прочности стали и внешних воздействий. В вероятностных расчетах характеристики изменчивости прочности стали (среднее значение $\bar{R}_y$ и коэффициент вариации v_R) можно оценить из совместного решения уравнений для нормативного и расчетного значений сопротивления стали

$$\begin{aligned} R_{yn} &= \bar{R}_y(1 - 1,64v_R) \\ \text{и } R_y &= \bar{R}_y(1 - 3v_R). \end{aligned} \quad (6)$$

Например, для стали С345 получено $\bar{R}_y = 385 \text{ Н/мм}^2$ и $v_R = 0,033$ (0,06). Основными вероятностными характеристиками коэффициента также являются среднее значение и коэффициент вариации. При условии нормального распределения случайной величины расчетное значение определяется по формуле

$$\mu = \bar{\mu}(1 + \beta v_\mu). \quad (7)$$

Знак (+) в формуле означает, что для обеспечения необходимой надежности, которая характеризуется коэффициентом β , расчетное значение μ по сравнению со средним значением $\bar{\mu}$ следует увеличивать.

Для расчета элементов антенных опор на устойчивость расчетное значение μ следует назначать с необходимой обеспеченностью.

Реальные сведения об изменчивости случайной величины $\tilde{\mu}$ можно получить из анализа возможных (допускаемых) и обнаруженных при обследовании дефектов и повреждений, характеризующих отклонения фактического состояния конструкции от предусмотренного проектом, стандартами и нормами.

По нормированной (расчетной) величине μ , заданным значениям β и v_μ , можно из (7) определить среднее $\bar{\mu}$. Например, если принять обеспеченность расчетного значения равным 0,99865, которому соответствует $\beta = 3$, то при $v_\mu = 0,1 \dots 0,3$ (значения, характерные для изменчивости ветровой нагрузки [22]) имеем $\bar{\mu} = 0,77 \dots 0,53$ (значительно меньше $\mu = 1$).

Оценить влияние изменчивости $\tilde{\mu}$ можно из соотношения расчетных значений для отдельных элементов длиной l и элементов, являющихся частью конструктивной системы. Для этого рассмотрим сжатый пояс башни или ствола мачты как систему последовательно соединенных элементов-панелей (рисунок 4).

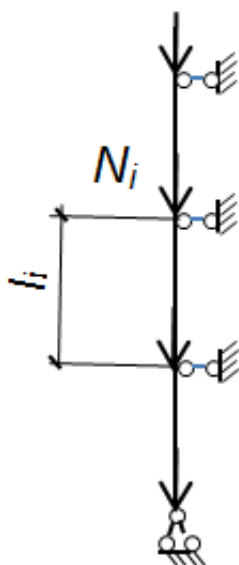


Рисунок 4 – Расчетная схема сжатого пояса
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Calculation scheme of the compressed belt
Source: complied by the author.

При последовательном соединении элементов разрушение происходит по наиболее слабому из них. Применительно к сжатым поясам отказ одного или даже нескольких панелей к разрушению не приводит, так как башня или ствол мачты являются статически неопределимыми системами, но нормальная эксплуатация сооружения будет нарушена. Поэтому рассматриваемое предельное состояние можно отнести ко 2-й группе предельных состояний с характеристиками безопасности системы $\beta = 1,64$, соответствующими вероятности неразрушения $P_s = 0,95$ при условии, что несущая способность подчиняется нормальному закону распределения. Надежность такой системы будет меньше надежности каждого элемента. Если все панели имеют одинаковые распределения несущей способности, то для системы из n элементов можно написать

$$P_s = (1 - P_f)^n, \quad (8)$$

где P_f – вероятность отказа одного элемента.

Например, если система состоит из 20 одинаковых элементов, то согласно (8) $P_f = 1 - \sqrt[20]{0,95} = 0,002561$. По таблицам интеграла вероятности получим характеристику безопасности элемента $\Phi(\beta) = 0,5 - 0,002561 = 0,4974$ и $\beta = 2,8$. По формуле (7) при $v_\mu = 0,1$ для системы имеем отношение $\mu/\bar{\mu} = 1,164$, для элемента $\mu/\bar{\mu} = 1,28$. Это означает, что расчетное значение коэффициента μ для от-

дельного элемента должно быть в $1,28/1,164 = 1,1$ раза больше, чем для системы в целом. Так, если для отдельного элемента (панели) для системы (пояса) $\mu = 1$, то для системы, рассмотренной в примере, $\mu = 1/1,1 = 0,9$.

Таким образом, из рассмотренного примера следует, что расчетные значения μ установлены нормами с запасом, обусловленным как минимум необходимостью обеспечения надежности конструктивных систем сжимаемых элементов.

В таблице 1 приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования.

Нормативное значение случайной величины коэффициента расчетной длины предлагается принять с обеспеченностью 0,95 как для прочностных характеристик материалов несущих конструкций из предположения распределения по нормальному закону.

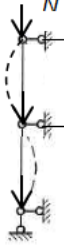
Для конструкций по схеме 1 таблицы 1 в качестве нормативного значения принята минимально допустимая величина, в некоторых расчетных ситуациях $\mu_n = 0,8$. Для оценки надежности при известном значении коэффициента вариации v_μ можно оценить среднее значение $\bar{\mu}$. Например, при $v_\mu = 0,1$ получаем $\bar{\mu} = 0,8/(1 + 1,64 \cdot 0,1) = 0,7$. Среднее значение $\bar{\mu} = 0,7$ соответствует усредненной величине, характеризующей форму потери устойчивости по идеализированным схемам (см. таблицу 1). Такое решение соответствует условию неразрезности пояса при свободном повороте относительно одной из опор.

Расчетная схема потери устойчивости принята традиционной для многопролетных систем и соответствует рекомендованной нормами проектирования. Значение $\mu = 1,0$ для этой формы потери устойчивости получается умножением нормативного значения на коэффициент надежности $\gamma_\mu = 1,25$, учитывающий не только вероятностную изменчивость случайной величины $\bar{\mu}$, но и изменчивость формы потери устойчивости.

На схемах 2 и 3 приведены данные для конструкций с разными длинами панелей в смежных плоскостях: в одной плоскости длина панели l , в смежной плоскости – $l_m \geq 2$. Формы потери устойчивости в отдельных плоскостях приняты одинаковыми. Значения параметров $\bar{\mu} = 1,0$ и $\mu_n = 1,164$ (при $v_\mu = 0,1$) для этих схем приняты одинаковыми с вероятностью 0,05 одновременной потери устойчивости пояса на длине l_m двух смежных панелей.

Таблица 1
Коэффициенты расчетной длины сжато-изогнутых стержней
Источник: составлено авторами.

Table 1
Coefficients of the estimated length for compressed-curved rods
Source: compiled by the author.

Элементы пояса	μ_n	μ
1. Трубы, спаренные уголки, одиночные уголки с совмещенными в смежных гранях узлами	 $\bar{\mu}(1 + 1,64v_\mu)$	 $\gamma_\mu \mu_n; \gamma_\mu = 1,25$
2. Одиночные уголки с совмещенными в смежных гранях узлами	 $\bar{\mu}(1 + 1,64v_\mu)$	 $\gamma_\mu \mu_n; \gamma_\mu = 1,25$
3. Одиночные уголки с не совмещенными в смежных гранях узлами (по рисунку 1,в)	 $\bar{\mu}(1 + 1,64v_\mu)$	 $\gamma_\mu \mu_n; \gamma_\mu = 1,1$ или $\bar{\mu}(1 + 3v_\mu)$

В схемах 2 и 3 отличаются коэффициенты γ_μ , значения которых приняты из условия равенства расчетного значения μ при $v_\mu = 0,1$ величине, установленной нормами. Так, для 2-й схемы получаем $\mu = 1,25 \cdot 1,164 = 1,46$ и расчетная длина панели $l_{ef} = 1,46l$ или, учитывая, что $l = l_m/2$, имеем $l_{ef} = 0,73l_m$ (это выражение соответствует потери устойчивости при отказе пояса на длине l_m) как установлено нормами. Для 3-й схемы получаем $\mu = 1,1 \cdot 1,164 = 1,28$ и расчетная длина панели $l_{ef} = 0,64l_m$ как и установлено нормами.

Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации), если

появится возможность измерения μ . Коэффициент вариации v_μ реальной конструктивной системы можно получить также из анализа дефектов в каждом поясе, установленных в процессе обследования технического состояния. Основой методики такого обследования могут быть сведения о дефектах и повреждениях элементов, а также способах их получения, изложенные в справочнике⁵ и различных публикациях [11, 23].

Используя подобие форм устойчивости и собственных колебаний конструкций, можно производить непосредственные измерения частот колебаний в лабораторных условиях и на натурных конструкциях аппаратно-приборным диагностическим комплексом для экспе-

⁵ Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В.В. Кузнецова) М.: Изд-во АСВ, 1999. 528 с.

риментального определения основных динамических характеристик «Стрела-П». Данный прибор используют, в частности, для оценки степени заделки элементов на опорах по формам собственных колебаний.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возрастающая потребность в антенных опорах заставляет искать эффективные конструктивные решения и методы расчета сооружений. В процессе поиска неизбежно возникает критическое отношение к нормам проектирования, общие положения которых иногда представляются недостаточно обоснованными, взятыми априорно. Подобная ситуация сложилась с установленными нормами расчетными длинами сжатых элементов для расчета на устойчивость элементов решетчатых конструкций.

Опыт проектирования и эксплуатации антенных опор, а также анализ исследований устойчивости свидетельствует о противоречивости принятых нормами расчетных схем для определения усилий, по которым проверяется прочность и устойчивость элементов неразрезных систем. Имеются данные о наличии серьезных запасов местной устойчивости, однако отсутствует методика реализации этих запасов, хотя бы для частных случаев. Представляется, что если расчетную длину сжатых элементов рассматривать как случайную величину, то управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

Предложенный в статье вариант нормируемых показателей случайной величины расчетной длины в виде системы коэффициентов следует рассматривать как пример, возможный для применения в частных случаях. Для разработки более общей методики необходимы детальные экспериментально-теоретические исследования показателей изменчивости коэффициента расчетной длины.

При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мельников Н. П. Антенные сооружения (Башни, мачты, радиотелескопы). М.: Знание, 1969. 48 с.
2. Краснощеков Ю. В. Эффективность антен-

ных опор, возводимых на ограниченной площади // Вестник СибАДИ. № 5 (27). 2012. С. 80–85.

3. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт. М.: Гос. изд-во по вопросам связи и радио, 1953. 275 с.

4. Павловский В. Ф., Кондра М. П. Стальные башни (Проектирование и монтаж). Киев. Будівельник, 1979. 198 с.

5. Син Вань Сян. Исследование пространственной формы потери устойчивости верхнего пояса стальной фермы // Труды молодых ученых. Часть 1. СПб: 1998. С. 68–72.

6. Грудев И. Д., Артёмов А. А. Прямой метод расчета сжатых элементов стальных конструкций в составе сооружения // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 6. С. 34–35.

7. Грудев И. Д. Несущая способность сжатых элементов стержневых конструкций. М.: НИУ МГСУ. 2012. 387 с.

8. Горохов Е. В., Васылев В. Н., Алёхин А. М., Ягмур А. А. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи // Металлические конструкции. 2010. Том 16, № 1. С. 41–50.

9. Атавин И. В., Казакова Ю. Д., Мельников Б. Е. [и др.] Влияние жесткости узлового соединения на механические характеристики стеллажа // Строительство уникальных зданий и сооружений. 8 (71). 2018. С. 1–12.

10. Закурдаева О. Н., Голиков А. В. Повреждаемость антенно-мачтовых сооружений сотовой связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 4 (67). 2018. С. 1–12.

11. Ведяков И. И., Конин Д. В., Олуромбе А. Р. К вопросу об использовании прямошовных труб из сталей повышенной прочности в строительных металлических конструкциях // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 3(18). С. 102–112.

12. Сабитов Л. С., Бадертдинов И. Р., Чепурненко А. С. Оптимизация формы поперечного сечения поясов трехгранных решетчатых опор // Строительство и архитектура. 2019. Т. 7, № 4. С. 5–8.

13. Зиганшин А. Д., Ахтямова Л. Ш., Сабитов Л. С. [и др.] Численное моделирование конструкций сооружений башенного типа в программных комплексах ANSYS и ЛИРА-САПР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 65–68.

14. Иоскевич А. В., Савченко А. В. Сравнение ПВК SCAD Office и Лира-САПР на примере расчета башни связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 10(25). 2014. С. 7–21.

15. Солодов Н. В., Пешкова Е. В. Исследование устойчивости стержней // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 25–27.

16. Голиков А. В., Михальченко Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2019. Т. 20, № 2. С. 163–173.

17. Голиков А. В., Михальченко Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). 53 с.

18. Кользеев А. А. Сравнительная оценка коэффициентов продольного изгиба сжатых стальных

стержней из труб // Известия ВУЗ. Строительство. 2011. № 3. С. 105–110.

19. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций / Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1959. 544 с.

20. Райзер В. Д., Кириллов Б. Б. Метод статистических испытаний в расчете антенно-мачтовых сооружений на устойчивость // Стр. мех. и расчет сооружений. 1989. № 6. С. 32–35.

21. Галай В. С. Устойчивость стальных центрально сжатых стержней в методиках СП 16.13330.2011 и EN 1993-1-1 // Alfbuild. 2019. С. 82–91.

22. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. < www.jcss.byg.dtn.dk>.

23. Давыдов И. И., Чабан В. П. Проблемы диагностики и подходы к расчету стальных конструкций антенно-мачтовых сооружений для мобильной связи. Днепропетровск: ПДАБА. 2008. № 10. С. 28–34.

REFERENCES

1. Melnikov N.P. *Antennnye sooruzheniya (Bashni, machty, radioteleskopy)* [Antenna structures (Towers, masts, radio telescopes)]. Moscow. Isdatelstvo «Znanie», 1969. 48 p. (In Russ.)

2. Krasnoshchekov Yu. V. Effektivnost antennnykh opor, vosvodimyykh na ogranichennoy ploshchadi [Efficiency of antenna supports erected on a limited area]. *Vestnik Sibadi*. 2012; 1 (27):80-85. (In Russ.)

3. Savitskiy G. A. *Osnovy rascheta radiomacht* [Basics of calculating radio masts]. Moscow. Gos. Isd-vo po voprosam svyazi i radio [State Publishing House on Communications and Radio]. 1953. 275 p. (In Russ.)

4. Pavlovskiy V. F., Kondra M. P. *Stalnye bashni (Proektirovaniye i montazh)* [Steel towers (Design and installation)]. Kiev. Budivelnik, 1979. 198 p. (In Russ.)

5. Sin Van Syan. Issledovanie prostranstvennoy formy poteri Ustoychivosti verkhnego poyasa stalnoy fermy [Investigation of the spatial form of the loss of stability of the upper belt of the steel truss]. *Trudy molodykh uchyonnykh. Chast 1*. Sankt Petersburg. 1998:68-72. (In Russ.)

6. Grudev I. D., Artyomov A. A. Pryamoy metod rascheta szhatykh elementov stalnykh konstruktsey v sostave sooruzheniya [Direct method of calculation of compressed elements of steel structures in the structure]. Moscow. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2003; 6: 34-35. (In Russ.)

7. Grudev I. D. *Nesushchaya sposobnost szhatykh elementov sterzhnevyykh konstruktsey* [Bearing capacity of compressed elements of rod structures]. Moscow. NIU MGSU. 2012. 387 p. (In Russ.)

8. Gorokhov E. V., Vasylev V. N., Alyokhin A. M., Yagmur A. A. Analis konstruktivnoy formy antennnykh opor radioreleynoy svyazi [Analysis of the constructive form of radio relay antenna supports]. *Metallicheskie konstruktsey*. 2010; 1, volume 16: 41-50. (In Russ.)

9. Atavin I. V., Kazakova Yu. D., Melnikov B. E., etc. Vliyaniye zhyostkosti uzlovogo soedineniya na mekhanicheskie kharakteristiki stellazha [The effect of the stiffness of the nodal joint on the mechanical characteristics of the rack]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2018; 8(71):1-12. (In Russ.)

10. Zakurdaeva O. N., Golikov A. V. Povrezhdaemost antenno-machtovykh sooruzheniy sotovoy svyazi [Damage to antenna-mast structures of cellular communications]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2018; 4(67):1-12. (In Russ.)

11. Vedyakov I. I., Konin D. V., Olurombe A. R. K voprosu ob ispolzovanii pryamoshovnykh trub is staley povyshennoy prochnosti v stroitelnykh metallicheskiykh konstruktseyakh [On the issue of the use of straight-seam pipes made of high-strength steels in building metal structures]. *Vestnik NITS «Stroitelstvo»*. 2018; 3 (18):102-112. (In Russ.)

12. Sabitov L. S., Badertdinov I. R., Chepurnenko A. S. Optimizatsiya formy poperechnogo secheniya poyasov tryokhgrannykh reshetchatukh opor [Optimization of the cross-sectional shape of the belts of triangular lattice supports]. *Stroitelstvo i arkhitektura*. 2019; Vol. 7. No. 4: 5-8. (In Russ.)

13. Ziganshin A. D., Akhtyamova L. Sh., Sabitov L. S., etc. Chislennoe modelirovaniye konstruktsey sooruzheniy bashennogo tipa v programmnykh kompleksakh ANSYS i LIRA-SAPR [Numerical modeling of tower-type structures in ANSYS and LIRA-CAD software complexes]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*. 2021; No. 2: 65-68. (In Russ.)

14. Ioskevich A. V., Savchenko A. V. Sravnenie PVK SCAD Oficce i lira-SAPR na primere rascheta bashni svyazi [Comparison of PVC SCAD Office and Lira-CAD on the example of calculating the communication tower]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2014; 10(25). 2014: 7-21. (In Russ.)

15. Solodov N. V., Peshkova E. V. Issledovanie ustoychivosti sterzhney [Investigation of the stability of rods]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2015; 4: 25-27. (In Russ.)

16. Golikov A. V., Mikhachonok E. A. Opredeleniye ratsionalnoy konstruktivnoy formy bashen sotovoy svyazi [Determination of the rational constructive form of cellular towers]. *Vestnik Ros, un-ta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernye issledovaniya*. 2019; Vol. 20. No. 2: 163-173. (In Russ.)

17. Golikov A. V., Mikhachonok E. A., Melnikova Yu. A. Analis vliyaniya tipa reshetki na raspredeleniye usilyi v elementakh bashni [Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower elements]. *Inzhener. vestn. Dona*. 2019; No. 4 (55): 53. (In Russ.)

18. Kolseev A. A. Sravnitel'naya otsenka koeffitsientov prodol'nogo isgiba szhatykh stalnykh sterzhney is trub [Comparative evaluation of longitudinal bending coefficients of compressed steel rods from pipes]. *Isvestiya VUS. Stroitelstvo*. 2011; 3: 105-110. (In Russ.)

19. Bleykh F. Ustoychivost metallicheskiykh konstruktsey [Stability of metal structures / Trans. from English]. Moscow. Fizmatgiz, 1959. 544 p. (In Russ.)

20. Rayser V.D., Kirillov B.B. Metod statisticheskikh ispytaniy v raschete antenno-machtovykh sooruzheniy na ustoychivost [Method of statistical tests in the calculation of antenna-mast structures for stability]. *Str. mekh. i raschet sooruzheniy*. 1989; 6: 32-35. (In Russ.)

21. Galay V. S. Ustoychivost stalnykh tsentralno szhatykh sterzhney v metodikakh SP 16.13330.2011

I EN 1993-1-1 [Stability of steel centrally compressed rods in the methods of SP 16.13330.2011 and EN 1993-1-1]. *Alfabuild*. 2019: 82-91. (In Russ.)

22. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. < www.jcss.bygdtn.dk>.

23. Davydov I. I., Chaban V. P. *Problemy diagnostiki i podkhody k raschetu stalnykh konstruksiy any-enno-machtobykh sooruzheniy dlya mobilnoy svyazi* [Diagnostic problems and approaches to the calculation of steel structures of antenna-mast structures for mobile communications]. Dnepropetrovsk. PDABA. 2008; 10: 28-34. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Краснощечков Ю. В. Общая идея работы, разработка расчетной модели, написание статьи.

Заполева М. Ю. Постановка задачи, сбор и анализ материалов, выполнение расчетов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yuriy V. Krasnoshchekov. *The general idea of the work, development of a computational model, writing the article.*

Mariya Y. Zapolova. *Tasks statement, collecting and analyzing the material, performing calculations.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Краснощечков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции».

Заполева Мария Юрьевна – гл. инженер проекта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, Professor of the Building Structures Department.

Maria Y. Zapolova – Chief Engineer of the project.