

УДК 624.074

История башенных сооружений: прошлое и настоящее

Д. В. Веремеев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Веремеев Д. В. История башенных сооружений: прошлое и настоящее // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 177–195. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-177-195

Аннотация

Цель: произвести аналитический обзор существующей литературы и систематизацию по назначению в различных эпохах существования для башенных сооружений, а также выделить достижения человечества в направлении развития стальных решетчатых башен, используемых в качестве опор под радиоэлектронное оборудование, за последние 130 лет. **Методы:** использовался метод аналитического обзора эволюции башенных сооружений с начальных этапов развития общества с описанием векторов развития и целесообразности возведения данных сооружений с последующим выводом современных тенденций, в особенности направленных на развитие стальных башенных сооружений, используемых под опору радиотехнического оборудования. **Результаты исследований:** проанализированы различные обзорно-аналитические исследования, позволяющие сделать выводы о назначении сооружений в прошлом и выявить общемировой вектор развития башенных сооружений в различных культурах. Проведены комплексная оценка, анализ и формализация информации, представленные в виде сжатого обзора. Помимо этого, проведен комплексный анализ развития конструкций стальных решетчатых башен в отечественной науке периода СССР, а также отражены современные тенденции развития стальных решетчатых башен. Итогом данной работы является обобщение мировых и отечественных исследований, направленных на аккумулирование знаний о происхождении и векторах будущих тенденций развития башенных сооружений. **Практическая значимость:** произведено аккумулирование с анализом существующих знаний об истории развития башенных сооружений и их назначении в хозяйственно-бытовой деятельности человека в различные эпохи. Представлен систематизированный ряд современных тенденций развития стальных башенных сооружений, используемых под опоры радиотехнического оборудования, с целью определения направления будущих исследований.

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, стальные решетчатые башни, история башенных сооружений, эволюция башенных сооружений, башенные сооружения

Исторически сложилось, что башенные сооружения являются неотъемлемой составляющей человеческого бытия. В различные периоды существования человека башни использовались и используются в различных направлениях хозяйственной деятельности.

Так, начало использования первых башенных сооружений, по различным данным, начинает исчисляться 8000 годом до н. э., что продемонстрировано в Ancient architecture [1]. Цель строительства данных сооружений сводилась к использованию их в качестве жилых, оборонительных и др., но основными направлениями были религиозное и в качестве символа силы. Так, первыми подобными сооружениями являются менгиры и различные каменные строения, представленные

на рис. 1 и описанные в статье «Башни: исторический экскурс» [2]. К наиболее древним и сохранившимся башням, выложенным из необработанного камня, можно отнести башню в Иерихоне, оцениваемую исследователем G. W. Bromley [3] на период эпохи неолита. Иерихонская башня имеет коническую форму и обладает размерами в ширину у основания 9 м и уменьшается до 7 м, высота башни составляет 8,5 м. Данная башня являлась частью стены фортификационного сооружения. Стоит отметить, что как представленная, так и другие типы древних башен в большинстве своем не подпадают под каноничное определение башенных сооружений, но тем не менее исследователи относят данные сооружения именно к башням.

*a**б*

Рис. 1. Первые башенные сооружения:

a — Менгир Шан-Долан; *б* — Иерихонская башня (источники:
a — SaraGlop/Shutterstock/FOTODOM, *б* — Geothea/Shutterstock/FOTODOM)

В Древнем Египте начиная с 3000 лет до н. э. у входов в храмовые комплексы стали появляться обелиски. Данные конструкции имели символический характер и культурную роль, что подмечается в статье «Солнечный луч как инструмент проектирования архитектурной формы» [4]. Схожие конструкции представлены и в других культурах и продолжали сохранять свое назначение.

В эпоху существования Древней Месопотамии около 4000 лет до н. э. стали появляться зиккураты, представляющие собой ступенчатые башни в виде параллелепипеда и обладающие многофункциональностью. Так, их обычно использовали в качестве храмов, сочетающих свою функцию с обсерваторией. Данный факт был отмечен в книге «Великие цивилизации Междуречья. Древняя Месопотамия: Царства Шумер, Аккад, Вавилония» [5]. Так крупнейший зиккурат в городе Уре, представленный на рис. 2, имел размеры в плане 62,5 x 43 м и высоту 15 м.



Рис. 2. Зиккурат в Уре (реконструкция)
(источник: Javier Jaime/Shutterstock/FOTODOM)

В эпоху существования царства эллинистического Египта башенные сооружения стали приобретать более практичный функционал. Наиболее известным представителем башенных сооружений того периода является Александрийский маяк, предположительно представлявший трехъярусную башню высотой от 110 до 180 м и служивший людям в качестве маяка до VII века н. э., что описано в книге *A history of lighthouses* [6].

Как уже было отмечено ранее, башни использовались в качестве составляющих фортификационных сооружений с древних времен, однако значительное развитие башенные сооружения получили именно в период Средневековья. Так, практически на всем евразийском континенте стали появляться разного рода крепости, кремли, а также замки. Исполнение подобных сооружений было разное и зависело от степени знаний о фортификации. Материалы, из которых строились данные сооружения, были различны и использовались от простых, таких как дерево и камень, к более сложным, выполненным из кирпича. Стоит отметить, что развитие данных сооружений происходило параллельно с развитием вооружений, что приводило к отказу от деревянных конструкций и возрастанию толщины каменных стен. Полная информация о фортификационной науке была представлена в книгах «Английский замок. Средневековая оборонительная архитектура» [7], а также в многотомнике Ф. А. Брокгауза, И. А. Ефрона [8]. Примерами подобных сооружений являются Троицкая башня высотой 76,35 м без учета звезды и Венсенский замок с центральной башней высотой 52 м, представленные на рис. 3, а, б. При этом в период с XVI по XVIII век происходило активное развитие артиллерийских вооружений, в связи с чем крепости башенного типа становились неэффективными, и это привело к отказу от них, что подмечается в статье «Строительство крепостей при Петре I» [9]. Но от башенных сооружений не отказались,

и в период Ренессанса строительство продолжилось, но в качестве украшения замков. В таком качестве башенные сооружения прошли еще ряд эпох, что отражено в книге *Towers: a History Survey* [10].

Стоит также отметить специфику башенных сооружений на Северном Кавказе. Здесь данные сооружения стали также появляться в период Средневековья и при этом подразделяться на жилые и боевые, выполненные преимущественно квадратными в плане. Жилые башни представляли собой отдельно стоящие конструкции, расположенные на монолите. Боевые башни были схожи с европейскими, однако их размеры были достаточно стесненными, и крепость состояла из одной башни. Размеры же данных башен могли достигать 5 м в основании и высоты до 25 м. Данные факты описаны в статьях С. Ш. Насуханова и С. Г. Шеина [11, 12].

Немаловажными башенными сооружениями в истории человечества стали ветряные мельницы, требуемые для помола зерна, а также башни, используемые в качестве маяка. Так, ветряные мельницы получили особую распространенность в период Средневековья, что представлено в работе Ж. Е. Кайсарова [13]. При этом башенные маяки стали особенно распространяться с XVI века, что представлено в Большой советской энциклопедии [14], однако наиболее важной вехой для строительства маяков с 1820 года стало создание линзы Френеля. Стоит отметить, что высоты некоторых маяков достигали 77 м, например маяк Ла Лантерна, построенный в 1543 году.

Большое влияние на развитие башенных сооружений оказали мировые религии, такие как христианство, буддизм и ислам. Каждая из представленных религий обладает либо храмовыми комплексами, либо частями храмовых комплексов, имеющими в основе своей конструкции башенные формы. Более подробно данная тематика раскрыта в книге К. О. Ларионова [15]. Так, самым высоким в мире храмом с металлическим шпилем в XIX веке можно назвать здание Петропавловского собора, продемонстрированного на рис. 3, в. При этом металлический шпиль воздвигли в 1858 году на замену деревянного, и таким образом полная высота Петропавловского собора составила 122,5 м, что представлено в статье «Петропавловский собор» [16]. До 1952 года это было самое высокое здание в России. Стоит отметить, что огромный вклад в разработку металлического шпиля внес Д. И. Журавский совместно с А. С. Рехневским и П. П. Мельниковым. Важность вклада Журавского отмечена в книге «Математики. Механики» [17].

Первые самонесущие стальные решетчатые башни стали появляться с начала XIX века, основным драйвером строительства которых послужило увеличение производства чугуна и кованого железа в промышленных масштабах. Наиболее известным представителем является Эйфелева башня, особенностью которой была ее высота, составляющая 330 м, а также ее функциональность: так, с самого начала в ней были установлены лифты, открыты театр и ресторан. Другой особенностью было то, что данная башня была клепаной и состояла из 2,5 млн клепок, что потребовало от



Рис. 3. Наиболее высокие башни Средневековья:

а — Троицкая башня; *б* — Венсенский замок; *в* — Петропавловский собор
(источники: *а* — Viacheslav Lopatin/Shutterstock/FOTODOM,
б — UlyssePixel/Shutterstock/FOTODOM, *в* — Vladimir Usharov/Shutterstock/FOTODOM)

проектировщиков дополнительной разработки детализировочных чертежей. Так, для строительства всей Эйфелевой башни потребовалось разработать 3269 чертежей, на которых были показаны 18 038 деталей. При этом основным этапом развития стальных решетчатых башен стало создание радио, что послужило важнейшим фактором в развитии конструкций башенных сооружений. Данный факт не обошел стороной и Эйфелеву башню, которую использовали в том числе в качестве радиостанции, что отмечено в книге *Communication structures* [18].

В Российской империи строительство большей части башенных сооружений производилось на основе разработок В. Г. Шухова и некоторое время продолжалось в СССР. Главной особенностью башен Шухова является гиперплоидное очертание, что описано в книге В. П. Мишина [19]. При этом стоит отметить, что данные башенные сооружения достигали высоты 160 м и были выполнены из швеллеров в связи с отсутствием более подходящих профилей. Данный факт был подмечен в книге Ю. И. Кудишина [20]. Однако первыми стальными решетчатыми башнями, используемыми под опору радиотелеграфной связи, в Российской империи были башни, построенные в 1912 году под архангельском фирмой «Артур Коппель» и разработанные фирмой «Крупп». Они представляли собой три отдельно стоящие 75-метровые стальные решетчатые башни, что описано в книге «Радиовещание: прошлое, настоящее, будущее» [21] и статье А. А. Брыксенкова [22], а также в ЕКБ «Русский север» [23].

В Советском Союзе оригинальные конструкции башен стали появляться с 1930 года, при этом данные башни выполнялись из уголков [20]. В последующем по результатам различных научных исследований, проводимых организацией «Стальконструкция» совместно с Наркоматом связи и ЦАГИ, было выявлено, что использование труб в качестве элементов конструкции является наиболее целесообразным, что описано в книге Г. А. Савицкого [24]. В последующем эти данные оказали глобальное влияние на отечественную сферу высотного строительства. Так, на основе полученных данных в 1942 году были построены первые радиобашни высотой 205 м в Куйбышеве (ныне — Самара) с поясами, выполненными из труб, которые обладали наилучшими экономическими показателями. Так, с целью оптимизации конструктивной схемы эти башни выполнялись с применением предварительно напрягаемой решетки, которая совместно с поясами, выполненными из труб, давала экономический эффект по массе 40 % и экономию в стоимости 38 % в сравнении с аналогичной башней из уголков, что продемонстрировано в книге Н. С. Стрелецкого [25]. Еще одним методом оптимизации являлось выполнение поперечного сечения в виде трехгранного основания, обладающего на 10 % большей экономичностью перед четырехгранным, что отмечено в ряде работ Г. А. Савицкого, Е. И. Беленя, В. Ф. Павловского [26–28]. Очертание данной башни было выполнено в виде усеченной пирамиды. В ходе подобной оптимизации удалось снизить массу башни вдвое в сравнении с ранее изготавливаемыми четырехгранными башнями из уголков, что описано в книге под редакцией Ю. И. Кудишина [20]. Стоит отметить, что, несмотря на ряд перечисленных преимуществ трехгранных башен, они также имеют и ряд недостатков, такие как неудобство изготовления конструкции в особенности из уголков, что представлено в статьях А. Г. Юрьева [29] и Ю. И. Кудишина [20], а также меньшая несущая способность перед крутящим моментом в сравнении с четырехгранной, что подмечено в книге «Металлические конструкции» [30]. Несмотря на отличные результаты, полученные при создании башен, выполненных из труб, в ряде случаев проектные организации возвращались к башням, выполняемым из более дешевых уголков в связи с высокой насыщенностью разнообразного радиотехнического оборудования, которое обладает высокими показателями сопротивления воздушному потоку, нивелирующего потенциал высоких аэродинамических качеств башен, выполняемых из труб.

С 1951 года в СССР стали активно развиваться радио- и телевизионные сети (РТС) после объявления директивы XIX Съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951–1955 годы¹. Требовалось обеспечить покрытие сигнала данной сети на всей территории Союза, в связи с чем различными институтами прорабатывались наиболее экономичные типы конструкций для

¹ Директивы XIX Съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951–1955 годы [Текст]: (3-й пункт порядка дня Съезда): Проект ЦК ВКП(б). М.: Правда, 1952. 32 с.

массового строительства. Так, были разработаны РТС башни проекта 3803 КМ и 34084 КМ, получивших распространение более чем в 80 городах СССР. Высота данных сооружений начиналась с отметки 180 м и могла достигать 250 м и более [28]. Данные башни имеют четырехгранное основание и выполнены с панелью в виде кресторомбической решетки, состоящей из поясов и распорок, выполненных из трубчатых элементов, тогда как раскосные элементы выполнялись из предварительно напрягаемой круглой стали. Однако существовало некоторое количество подобных башен в ином исполнении конструкции со шпренгельной верхней частью, представляющей собой небольшой участок мачты и горизонтальных рей, оттяжки которой прикреплялись к стволу башни. При этом ствол башни выполнялся исключительно из труб.

В процессе развития и расширения стального высотного строительства развивались и различные направления отечественной науки, при этом стоит отметить, что многие проекты выполнялись в условиях секретности, в связи с чем ряд разработок был весьма самобытен. Так, основными направлениями развития науки стали строительная механика, технология строительного производства, аэродинамика, теория проектирования экономичных конструкций и, конечно, развитие строительных конструкций, а именно металлических. Объем накопленных знаний в данных дисциплинах позволил разработать ряд важных и грандиозных проектов башен, расположенных в столицах и крупных городах СССР. Так, наиболее уникальными стальными башенными сооружениями, используемыми под опоры радиотелевизионного оборудования, являются такие башни, как киевская, высота которой составила 385 м и вес 2700 т без учета фундамента; ташкентская, высота которой составила 375 м; тбилисская башня высотой 274,5 м; ереванская высотой 311,7 м; санкт-петербургская высотой 326 м; башня «Коктобе» (Алма-Ата), высота которой составила 371,5 м и основной особенностью является способность выдерживать сейсмическое воздействие до 10 баллов по шкале MSK-64, конструктивно-компоновочная схема которой преимущественно определена обликом, что представлено в диссертации Б. В. Остроумова [31]. Все представленные сооружения являются уникальными и имеют в своей основе большое количество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). При этом процесс разработки некоторых технологий, использованных при строительстве некоторых из представленных сооружений, был представлен в книге А. В. Перельмутера [28, 32].

Таким образом, огромный скачок в развитии отечественного стального башенного строительства произошел в период СССР. Следует отметить значительный вклад некоторых авторов, труды которых остаются фундаментальными в данной области строительных конструкций, таких как А. В. Перельмутер, Г. А. Савицкий, Б. В. Остроумов, Б. Г. Коренев, М. П. Кондра, А. Г. Соколов [33], Н. К. Снитко [34], В. Ф. Павловский и многие другие.

Тем не менее история не стоит на месте и количество научных знаний о стальных башенных сооружениях, используемых под опоры радиотехнического оборудования, продолжает увеличиваться. На данный момент можно выделить три основных вектора развития стальных решетчатых башен, такие как оптимизация стальных решетчатых башен, развитие методик расчета нагрузок и воздействий и их влияния на надежность сооружения, разработка наиболее эффективных башенных узлов.

1. Для оптимизации стальных решетчатых башен по критериям металлоемкости применяются различные методы, начиная от конструктивных и заканчивая прогрессивными методами расчета в строительной механике с применением ЭВМ.

Так, конструктивными методами оптимизации занимались А. В. Шевченко [35], а также команда проектного института под управлением Б. В. Остроумова, разработавших ряд опор сетчатой конструкции [36, 37]. Например, новая телебашня КРТЦ в Перми высотой 275 м и радиотелевизионная башня «Октод» высотой 258 м. Также развитие конструктивной формы приведено в работах И. Р. Бадертдинова и Л. С. Сабитова [38, 39] и некоторых иностранных авторов J. Szafran, A. I. Diaconita и др. [40, 41].

В свою очередь различными методами строительной механики оптимизацию стальных решетчатых башен проводили такие авторы, как С. В. Ключев, Л. Ш. Ахтямова [42, 43], а также авторы статьи *Trihedral lattice towers optimization with a limitation on the resonant vortex excitation occurrence* [44]. Большую распространенность данные методы получили у иностранных авторов, например, таких как K. D. Tsavdaridis и др., P. Hofer и E. Wehrle, J.-Y. Fu и др. [45–47].

2. Развитие более реалистичных методов определения нагрузок и воздействий является важной составляющей расчета как зданий, так и сооружений. Долгое время методы расчета резонансных вихревых возбуждений в нормативной документации не были описаны, при этом отечественные нормативные документы требовали производить расчет на резонанс [48]. Во многом данное положение изменилось за счет методики расчета квазистатической составляющей резонансной нагрузки, разработанной П. Н. Никитиным [49] с учетом данных, полученных Б. В. Остроумовым. В свою очередь, обеспеченностью надежности стальных решетчатых башен занимались такие авторы, как А. И. Каракозова [50], Т. А. Зиннуров [51] и А. А. Петров [52]. Данная проблема также актуальна и в других странах. Так, исследованиями влияния различных типов нагрузок занимались следующие авторы и различные коллективы: Q. Xie и др., P. Huang и др., D. Zhang и др., W. Zhang и др., P. Wu и др., H.-N. Li и др., B. He и др., I. Fernández Lorenzo и др., I. Derina и др. [53–60]. Это только малая часть авторов, занимающихся проведением экспериментов влияния различных типов нагрузок и воздействий на стальные решетчатые конструкции, в том числе с применением моделей в натурную

величину. Помимо этого, для ряда стран особенно остро стоит вопрос строительства башенных конструкций в условиях сейсмического воздействия. Авторами М. М. Kassem и др., L. Tian и др., Z. Fu и др., H. Pan и др. и С. Li и др. [61–65] проводятся всевозможные численные и натурные эксперименты, направленные на повышение надежности решетчатых башен.

3. Не менее важной проблемой разработки различных сооружений, в том числе и башенных, является корректность передачи усилий с одного элемента на другой через узловой в соответствии с предполагаемой расчетной схемой. Помимо этого, узел должен соответствовать требованиям проверок по первому и второму предельному состоянию, а также требованиям минимальной металлоемкости, технологичности и скорости монтажа. Так, разработкой узлов соединения элементов башенных конструкций занимались следующие авторы: И. Л. Кузнецов и др., И. З. Гатиятов и др., Л. С. Сабитов [66–68], а также различные авторы за рубежом, например, такие как H. Yan и др., T. Zhao и др., L. An и др., A. M. Taha и др., R. Ma [69–74] и многие другие.

По итогу работы можно представить следующие выводы:

1. Был проанализирован большой объем обзорно-аналитической информации, который позволяет определить назначение башенных сооружений в различных исторических эпохах до настоящего времени.

2. Представлены новые данные о строившихся ранее стальных решетчатых башнях под опору радиотехнического оборудования, информация о которых не отражена в отечественной литературе по металлическим конструкциям.

3. Продемонстрированы основные особенности развития стальных решетчатых башен, используемых под опору радиотехнического оборудования в отечественной науке.

4. Отображен значимый вклад советских ученых в развитие как мировой, так и отечественной науки.

5. Обозначены основные современные тенденции развития стальных решетчатых башен как в России, так и во всем мире, продемонстрированные в виде ряда статей, подтверждающих данную гипотезу.

Библиографический список

1. Lloyd S., Wolfgang Müller H. Ancient architecture. Milano: Electa Editrice, 1986. 192 p.
2. Соколова М. В. Башни: исторический экскурс // Современные проблемы сервиса и туризма. 2013. № 3. С. 9–17.
3. Bromiley G. W. International Standard Bible Encyclopedia: A–D. Michigan: Wm. B. Eerdmans Publishing, 1995. 1006 p.
4. Павлов Н. Л. Солнечный луч как инструмент проектирования архитектурной формы // Светотехника. 2018. № 6. С. 37–44.

5. Ру Ж. Великие цивилизации Междуречья. Древняя Месопотамия: царства Шумер, Аккад, Вавилония. М.: Центрполиграф, 2016. 448 с.
6. Beaver P. A history of lighthouses. New Jersey: The Citadel Press Secaucus, 1973. 182 p.
7. Гамильтон Томпсон А. Английский замок. Средневековая оборонительная архитектура / пер. с англ. А.Л. Андреева. М.: Центрполиграф, 2011. 448 с.
8. Брокгауз Ф. А. Энциклопедический словарь: в 86 т. Репр. изд. СПб.: ПОЛРАДИС, 1993.
9. Жаворонков А. Д. Строительство крепостей при Петре I // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2022. № 8 (72). С. 206–219.
10. Erwin H., Fritz L. Towers: a historical survey. New-York: Rizzoli, 1989. 343 p.
11. Насуханов С. Ш. Особенности средневековой башенной архитектуры чеченцев // Перспективы науки. 2020. № 11 (134). С. 293–298.
12. Шеина С. Г., Батаева П. Д., Батаева Х. М. Обзор опыта строительства, ремонта и восстановления памятников истории и культуры башенного типа // Наука, образование, инновации: материалы I Международного научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых (Грозный, 19 мая 2023 года). Грозный: Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН, 2023. С. 123–132.
13. Кайсарова Ж. Е. Культурно-исторические последствия использования возобновляемых источников энергии в эпоху Средневековья (в концепции Л. Мамфорда) // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 2. С. 268–269.
14. Большая советская энциклопедия / гл. ред. О. Ю. Шмидт. М.: Советская энциклопедия, 1926–1947.
15. Основы архитектуры и строительных конструкций: учебник для вузов / К. О. Ларионова [и др.]; под общ. ред. А. К. Соловьева. М.: Юрайт, 2024. 490 с.
16. Антонов В. В. Петропавловский собор // историко-культурный интернет-портал «Энциклопедия Санкт-Петербурга» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ensspb.ru> (дата обращения: 13.03.2024).
17. Боголюбов А. Н. Математики. Механики: библиогр. справ. Киев: Наук. думка, 1983. 639 с.
18. Smith V. W. Communication structures. London: Thomas Telford, 2007. 352 p.
19. Мишин В. П. Металлические конструкции академика В. Г. Шухова. М.: Наука, 1990. 112 с.
20. Металлические конструкции: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению «строительство» / Ю. И. Кудишин [и др.]; под ред. Ю. И. Кудишина. 13-е изд., испр. М.: Академия, 2011. 680 с.
21. Радиовещание: прошлое, настоящее, будущее: материалы VI научных чтений, посвященных Дню радио — празднику работников всех отраслей связи (23 апреля 2013 года) / Центральный музей связи им. А. С. Попова; отв. ред. О. В. Фролова. СПб.: Центральный музей связи им. А. С. Попова, 2013. 154 с.
22. Брыксенков А. А. История развития радиосвязи на Севере (уроки истории) // Полярные чтения на ледоколе «Красин». 2018. № 5. С. 144–157.

23. 28 сентября 2018 года — 105 лет со дня открытия (1913) первой на Севере радиотелеграфной станции, расположенной вблизи Архангельска (в 2 км от станции Исакогорка, на высоте 24 м над уровнем моря) (15-го — по ст. ст.) // ЭКБ «Русский Север» АОНБ им. Н. А. Добролюбова [Электронный ресурс]. URL: <https://ekb.aonb.ru> (дата обращения: 19.03.2024).
24. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. 111 с.
25. Курс металлических конструкций: утв. ВКВШ в качестве учебника для строит. вузов. М., Ленинград: Госстройиздат, 1940–1944 (Ленинград). Т. 3, ч. 3: Металлические конструкции специальных сооружений / Н. С. Стрелецкий. М., 1944. 502 с.
26. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт: статика и динамика. М.: Связьиздат, 1953. 276 с.
27. Беленя Е. И. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1975. 415 с.
28. Павловский В. Ф., Кондра М. П. Стальные башни // Проектирование и монтаж. Киев: Будівельник, 1979. 200 с.
29. Юрьев А. Г., Клюев С. В., Клюев А. В. Особенности проектирования высотных стержневых конструкций из стали // Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2008. № 4. С. 42–45.
30. Металлические конструкции: учебник для специальности «пром. и гражд. строительство» / Н. С. Стрелецкий [и др.]; под общ. ред. Н. С. Стрелецкого. 3-е изд., перераб. М.: Госстройиздат, 1961. 776 с.
31. Остроумов Б. В. Исследование, разработка и внедрение высотных сооружений с гасителями колебаний: дисс. ... докт. техн. наук. М., 2003. 48 с.
32. Перельмутер А. Ви. Жили-были. Киев: Сталь, 2002. 186 с.
33. Соколов А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование). М.: Госстройиздат, 1961. 171 с.
34. Снитко Н. К. Устойчивость стержневых систем в упруго-пластической области. Ленинград: Стройиздат, 1968. 248 с.
35. Шевченко А. В. Рациональные пространственные стержневые конструкции энергетического строительства в системе автоматизированного проектирования: дисс. ... канд. техн. наук. Макеевка, 1997. 24 с.
36. Радиотелевизионные опоры сетчатой конструкции // Призмонт-Металл [Электронный ресурс]. URL: <https://prizmont.ru/> (дата обращения: 04.04.2024).
37. Сетчатая башня: патент № 2178494 С1 Рос. Федерация, МПК E04H 12/08. № 2001107720/03 / Б. В. Остроумов; заявл. 26.03.2001, опубл. 20.01.2002. Заявитель: АОЗТ «Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций им. Мельникова».
38. Бадертдинов И. Р. Трехгранные решетчатые конструкции: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2020. 21 с.
39. Сабитов Л. С. Конструкции башенных сооружений: дисс. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2021. 38 с.

40. Szafran J., Juszczak K., Kamiński M. Reinforcements of tower structures: Effective and economic design engineering // *Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemp. Problems. Proceedings of XXIV LSCE 2018*. Lodz: Łódź University of Technology, 2018. P. 126–133.
41. Diaconita A. I., Rusu L., Andrei G. A local perspective on wind energy potential in six reference sites on the western coast of the Black Sea considering five different types of wind turbines // *Inventions*. 2021. Vol. 6, no. 3. P. 44. DOI: 10.3390/inventions6030044.
42. Ключев С. В. Оптимальное проектирование конструкций башенного типа: дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2006. 21 с.
43. Ахтямова Л. Ш. Стальные башни пониженной металлоемкости: дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2023. 23 с.
44. Cherurnenko A., Akhtyamova L., Ivashchenko I. Trihedral lattice towers optimization with a limitation on the resonant vortex excitation occurrence // *Designs*. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 10. DOI: 10.3390/designs7010010.
45. Tsavdaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads // *Structures*. 2020. Vol. 27. P. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
46. Hofer P., Wehrle E. The influence of uncertain loading on topology-optimized designs // *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 6175979. DOI: 10.1155/2022/6175979.
47. Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method / J.-Y. Fu [et al.] // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 573–588. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.017.
48. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1996. 36 с.
49. Никитин П. Н. Разработка и внедрение методов расчета высотных металлических конструкций на воздействие порывов ветра с выделением квазистатической и резонансной составляющих их реакции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2006. 31 с.
50. Каракозова А. И. Расчет сооружений с низким конструкционным демпфированием и учетом воздействия пульсаций скорости ветра: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 19 с.
51. Зиннуров Т. А. Оценка надежности эксплуатируемых решетчатых башенных сооружений методом статистического моделирования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 22 с.
52. Петров А. А. Повышение надежности и эффективности протяженных и комбинированных металлоконструкций при сейсмических и ветровых воздействиях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1997. 56 с.
53. Xie Q., Zhang J. Experimental study on failure modes and retrofitting method of latticed transmission tower // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111365. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111365.
54. Huang P., Chen S., Gu M. Field measurement and aeroelastic wind tunnel test of wind induced vibrations of Lattice Tower // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019. DOI: 10.1002/tal.1622.

55. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under Skew Winds / D. Zhang [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 214. P. 104678. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104678.
56. Wind load investigation of self-supported lattice transmission tower based on wind tunnel tests / W. Zhang [et al.] // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. P. 113575. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113575.
57. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on large Eddy Simulation / P. Wu [et al.] // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 9. P. 428. DOI: 10.3390/buildings12091428.
58. Failure criteria and wind-induced vibration analysis for an offshore platform jacking system / H.-N. Li [et al.] // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2021. P. 2150105. DOI: 10.1142/S0219455421501054.
59. A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds / B. He [et al.] // *Advances in Engineering Software*. 2019. Vol. 127. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.10.004.
60. Dynamic analysis of self-supported Tower under Hurricane Wind Conditions / I. Fernández Lorenzo [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020. Vol. 197. P. 104078. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104078.
61. Quantification of the seismic behavior of a steel transmission tower subjected to single and repeated seismic excitations using vulnerability function and collapse margin ratio / M.M. Kassem [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 1984. DOI: 10.3390/app12041984.
62. Collapse failure analysis and fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to the multidimensional ground motion of different input directions / L. Tian [et al.] // *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1018–1028. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.042.
63. Fu Z., Tian L., Liu J. Seismic response and collapse analysis of a transmission tower-line system considering uncertainty factors // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 189. P. 107094. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107094.
64. Pan H., Li C., Tian L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2021. Vol. 19, no. 11. P. 4311–4337. DOI: 10.1007/s10518–021–01124-x.
65. Li C., Pan H., Tian L. Seismic performance analyses of pile-supported transmission tower-line systems subjected to depth-varying spatial ground motions // *Journal of Earthquake Engineering*. 2022. P. 1–25. DOI: 10.1080/13632469.2022.2113000.
66. Узел соединения труб: патент № 2288399 С8 Российская Федерация, МПК F16L 13/00, E04B 1/58. № 2005111480/06 / И. Л. Кузнецов [и др.]; заявл. 07.04.2005; опубл. 27.11.2006. Заявитель: Казанская государственная архитектурно-строительная академия.
67. Узел соединения труб разного диаметра: патент № 2620625 С1 Российская Федерация, МПК F16L 13/00. № 2016130488 / И. З. Гатиятов [и др.]; заявл. 25.07.2016; опубл. 29.05.2017.
68. Сабитов Л.С. Разработка и исследование соединений стальных труб разного диаметра // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2008. № 1 (9). С. 102–105.

69. Test and finite element analysis of a new type of double-limb double-plate connection joint in Narrow Base Tower / H. Yan [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 5936. DOI: 10.3390/ma14205936.

70. Comparison of the influence of double-limb double-plate joint on the stability bearing capacity of triangular and quadrilateral transmission tower structures / T. Zhao [et al.] // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 784. DOI: 10.3390/buildings12060784.

71. Influence of double-limb double-plate connection on stable bearing capacity of quadrilateral transmission tower / T. Zhao [et al.] // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 24. P. 12024. DOI: 10.3390/app112412024.

72. An L., Wu J., Jiang W. Experimental and numerical study of the axial stiffness of bolted joints in steel lattice transmission tower legs // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 187. P. 490–503. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.070.

73. Experimental testing and evaluation of real-scale lap-splice bolted connections used in typical lattice steel transmission towers / A. M. Taha [et al.] // *Thin-Walled Structures*. 2022. Vol. 171. P. 108790. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108790.

74. Experimental and numerical appraisal of steel joints integrated with single- and double-angles for transmission line towers / R. Ma [et al.] // *Thin-Walled Structures*. 2021. Vol. 164. P. 107833. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107833.

Дата поступления: 07.07.2024

Решение о публикации: 23.08.2024

Контактная информация:

ВЕРЕМЕЕВ Дмитрий Валерьевич — аспирант; dmitry.veremeev@yandex.ru

The history of tower structures: past and present

D. V. Veremeev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Veremeev D. V. The history of tower structures: past and present // *Bulletin of scientific research results*. 2024. Iss. 3. P. 177–195. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-177-195

Abstract

Purpose: to make an analytical review of the existing literature and systematization by purpose in various eras of existence for tower structures, as well as to highlight the achievements of mankind in the development of steel lattice towers used as supports for radio-electronic equipment over the past 130 years. **Methods:** the method of analytical review of the evolution of tower structures from the initial stages of the development

of society was used with a description of the vectors of development and expediency of the construction of these structures, followed by the conclusion of modern trends, especially aimed at the development of steel tower structures used for the support of radio equipment. **Results:** various review and analytical studies have been analyzed, which allow us to draw conclusions about the use of structures in the past and identify the global vector of development of tower structures in various cultures; a comprehensive assessment, analysis and formalization of information presented in the form of a concise overview was carried out, in addition, a comprehensive analysis of the development of steel lattice towers in domestic science of the USSR period was carried out, and modern trends in the development of steel lattice towers were reflected. The result of this work is a generalization of world and national research aimed at accumulating knowledge about the origin and vectors of future trends in the development of tower structures. **Practical significance:** the accumulation and analysis of existing knowledge about the history of the development of tower structures and their purpose in human economic and household activities in various epochs has been carried out. A systematic series of modern trends in the development of steel tower structures used as supports for radio-technical equipment is presented in order to determine the direction of future research.

Keywords: antenna-mast structures, steel lattice towers, the history of tower structures, the evolution of tower structures, tower structures

References

1. Lloyd S., Wolfgang Müller H. Ancient architecture. Milano: Electa Editrice, 1986. 192 p.
2. Sokolova M. V. Bashni: istoricheskij ekskurs // *Sovremennye problemy servisa i turizma*. 2013. № 3. S. 9–17. (In Russian)
3. Bromiley G. W. International Standard Bible Encyclopedia: A–D. Michigan: Wm. B. Eerdmans Publishing, 1995. 1006 p.
4. Pavlov N. L. Solnechnyj luch kak instrument proektirovaniya arhitekturnoj formy // *Svetotekhnika*. 2018. № 6. S. 37–44. (In Russian)
5. Ru Zh. Velikie civilizacii Mezhdurechya. Drevnyaya Mesopotamiya: czarstva Shumer, Akkad, Vaviloniya. M.: Centrpoligraf, 2016. 448 s. (In Russian)
6. Beaver P. A history of lighthouses. New Jersey: The Citadel Press Secaucus, 1973. 182 p.
7. Gamil'ton Tompson A. Anglijskij zamok. Srednevekovaya oboronitel'naya arhitektura / per. s angl. A. L. Andreeva. M.: Centrpoligraf, 2011. 448 s. (In Russian)
8. Brokgauz F. A. Enciklopedicheskij slovar': v 86 t. Repr. izd. SPb.: POLRADIS, 1993. (In Russian)
9. Zhavoronkov A. D. Stroitel'stvo krepostej pri Petre I // *Skif. Voprosy studencheskoj nauki*. 2022. № 8 (72). S. 206–219. (In Russian)
10. Erwin H., Fritz L. Towers: a historical survey. New-York: Rizzoli, 1989. 343 p.
11. Nasuhanov S. Sh. Osobennosti srednevekovoj bashennoj arhitektury` chehencev // *Perspektivy nauki*. 2020. № 11 (134). S. 293–298. (In Russian)
12. Sheina S. G., Bataeva P. D., Bataeva H. M. Obzor opyta stroitel'stva, remonta i vosstanovleniya pamyatnikov istorii i kul'tury bashennogo tipa // *Nauka, Obrazovanie, Innovacii: materialy I Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (Groznyj, 19 maya 2023 goda)*. Groznyj: Kompleksnyj nauchno-issledovatel'skij institut im. H. I. Ibragimova RAN, 2023. S. 123–132. (In Russian)
13. Kajsarova Zh. E. Kul'turno-istoricheskie posledstviya ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii v epohu srednevekovya (v koncepcii L. Mamforda) // *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013. T. 16, № 2. S. 268–269. (In Russian)

14. Bol'shaya sovetskaya enciklopediya / gl. red. O. Yu. Shmidt. M.: Sovetskaya enciklopediya, 1926–1947. (In Russian)
15. Osnovy arhitektury i stroitel'nyh konstrukcij: uchebnik dlya vuzov / K. O. Larionova [i dr.]; pod obshh. red. A. K. Solov'eva. M.: Yurajt, 2024. 490 s. (In Russian)
16. Antonov V. V. Petropavlovskij sobor // Istoriko-kul'turnyj internet-portal “E`nciklopediya Sankt-Peterburga” [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.encspb.ru> (data obrashheniya: 13.03.2024). (In Russian)
17. Bogolyubov A. N. Matematiki. Mehaniki: bibliogr. sprav. Kiev: Nauk. dumka, 1983. 639 s. (In Russian)
18. Smith B. W. Somunication structures. London: Thomas Telford, 2007. 352 p.
19. Mishin V. P. Metallicheskie konstrukcii akademika V. G. Shuhova. M.: Nauka, 1990. 112 s. (In Russian)
20. Metallicheskie konstrukcii: uchebnik dlya studentov uchrezhdenij vysshego professional'nogo obrazovaniya, obuchayushhihsya po napravleniyu “Stroitel'stvo” / Yu. I. Kudishin [i dr.]; pod red. Yu. I. Kudishina. 13-e izd., ispr. M.: Akademiya, 2011. 680 s. (In Russian)
21. Radioveshhanie: proshloe, nastoyashhee, budushhee: materialy Shestyh nauchnyh chtenij, posvyashhennyh Dnyu radio — prazdniku rabotnikov vseh otraslej svyazi (23 aprelya 2013 goda) / Central'nyj muzej svyazi im. A. S. Popova; otv. red. O. V. Frolova. SPb.: Central'nyj muzej svyazi im. A. S. Popova, 2013. 154 s. (In Russian)
22. Bryksenkov A. A. Istoriya razvitiya radiosvyazi na Severe (uroki istorii) // Polyarnye chteniya na ledokole “Krasin”. 2018. № 5. С. 144–157 (In Russian)
23. 28 sentyabrya 2018 goda — 105 let so dnya otkrytiya (1913) pervoj na Severe radiotelegrafnoj stancii, raspolozhennoj vblizi Arhangel'ska (v 2 km ot stancii Isakogorka, na vysote 24 metrov nad urovnem morya) (15-go — po st. st.) // EKB “Russkij Sever” AONB im. N. A. Dobrolyubova [Elektronnyj resurs]. URL: <https://ekb.aonb.ru> (data obrashheniya: 19.03.2024). (In Russian)
24. Saviczkiy G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya. M.: Strojizdat, 1972. 111 s. (In Russian)
25. Kurs metallicheskih konstrukcij: utv. VKVSh v kachestve uchebnika dlya stroit. vuzov. M., Leningrad: Gosstrojizdat, 1940–1944 (Leningrad). T. 3, ch. 3: Metallicheskie konstrukcii special'nyh sooruzhenij / N. S. Strelecckij. M., 1944. 502 c (In Russian)
26. Saviczkiy G. A. Osnovy rascheta radiomacht: statika i dinamika. M.: Svyaz'izdat, 1953. 276 s. (In Russian)
27. Belenya E. I. Predvaritel'no napryazhennye nesushhie metallicheskie konstrukcii / 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1975. 415 s. (In Russian)
28. Pavlovskij V. F, Kondra M. P. Stal'nye bashni // Proektirovanie i montazh. Kiev: Budivel'nik, 1979. 200 s. (In Russian)
29. Yur'ev A. G., Klyuev S. V., Klyuev A. V. Osobennosti proektirovaniya vysotnyh sterzhnevnyh konstrukcij iz stali // Vestn. Belgor. gos. tehnol. un-ta im. V. G. Shuhova. 2008. № 4. S. 42–45. (In Russian)
30. Metallicheskie konstrukcii: uchebnik dlya special`nosti “Prom. i grazhd. stroitel'stvo” / N. S. Strelecckij [i dr.]; pod obshh. red. N. S. Strelecckogo. 3-e izd., pererab. M.: Gosstrojizdat, 1961. 776 s. (In Russian)
31. Ostroumov B. V. Issledovanie, razrabotka i vnedrenie vysotnyh sooruzhenij s gasitelyami kolebanij: diss. ... dokt. tehn. nauk. M., 2003. 48 s. (In Russian)
32. Perel'muter A. Vi. Zhili-byli. Kiev: Stal', 2002. 186 s. (In Russian)

33. Sokolov A. G. *Opory linij peredach (raschet i konstruirovanie)*. M.: Gosstrojizdat, 1961. 171 s. (In Russian)
34. Snitko N. K. *Ustojchivost' sterzhnevnyh sistem v uprugo-plasticheskoj oblasti*. Leningrad: Strojizdat, 1968. 248 s. (In Russian)
35. Shevchenko A. V. *Racional'nye prostranstvennye sterzhnevye konstrukcii energeticheskogo stroitel'stva v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya: diss. ... kand. tehn. nauk. Makeevka, 1997. 24 s. (In Russian)*
36. *Radiotelevizionnye opory setchatoj konstrukcii // Prizmont-Metall [Elektronnyj resurs]*. URL: <https://prizmont.ru/> (data obrashheniya: 04.04.2024). (In Russian)
37. *Setchataya bashnya: patent № 2178494 C1 Ros. Federaciya, MPK E04H 12/08. № 2001107720/03 / B. V. Ostroumov; zayavl. 26.03.2001, opubl. 20.01.2002. Zayavitel': AOZT "Central'nyj nauchno-issledovatel'skij i proektnyj institut stroitel'nyh metallokonstrukcij im. Mel'nikova". (In Russian)*
38. Badertdinov I. R. *Trehgrannnye reshchatye konstrukcii: diss. ... kand. tehn. nauk. Rostov-na-Dony, 2020. 21 s. (In Russian)*
39. Sabitov L. S. *Konstrukcii bashennyh sooruzhenij: diss. ... dokt. tehn. nauk. Rostov-na-Dony, 2021. 38 s. (In Russian)*
40. Szafran J., Juszczak K., Kamiński M. Reinforcements of tower structures: Effective and economic design engineering // *Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemp. Problems. Proceedings of XXIV LSCE 2018*. Lodz: Łódź University of Technology, 2018. P. 126–133.
41. Diaconita A. I., Rusu L., Andrei G. A local perspective on wind energy potential in six reference sites on the western coast of the Black Sea considering five different types of wind turbines // *Inventions*. 2021. Vol. 6, no. 3. P. 44. DOI: 10.3390/inventions6030044.
42. Klyuev S. V. *Optimal'noe proektirovanie konstrukcij bashennogo tipa: diss. ... kand. tehn. nauk. Belgorod, 2006. 21 s. (In Russian)*
43. Axtyamova L. Sh. *Stal'nye bashni ponizhennoj metalloemkosti: diss. ... kand. tehn. nauk. Kazan', 2023. 23 s. (In Russian)*
44. Chepurnenko A., Akhtyamova L., Ivashchenko I. Trihedral lattice towers optimization with a limitation on the resonant vortex excitation occurrence // *Designs*. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 10. DOI: 10.3390/designs7010010.
45. Tsavdaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads // *Structures*. 2020. Vol. 27. P. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
46. Hofer P., Wehrle E. The influence of uncertain loading on topology-optimized designs // *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 6175979. DOI: 10.1155/2022/6175979.
47. Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method / J.-Y. Fu [et al.] // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 573–588. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.017.
48. SNiP 2.01.07-85*. *Nagruzki i vozdejstviya. Normy proektirovaniya*. Gosstroj SSSR. M.: CИTП Gosstroya SSSR, 1996. 36 s. (In Russian)
49. Nikitin P. N. *Razrabotka i vnedrenie metodov rascheta vysotnyh metallicheskih konstrukcij na vozdejstvie poryvov vetra s vydeleniem kvazistaticheskoy i rezonansnoj sostavlyayushih ih reakcii: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. M., 2006. 31 s. (In Russian)*

50. Karakozova A.I. Raschet sooruzhenij s nizkim konstrukcionnym dempfirovaniem i uchedom vozdejstviya pul'sacij skorosti vetra: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. M., 2013. 19 s. (In Russian)
51. Zinnurov T.A. Ocenka nadezhnosti ekspluatiruemyh reshetchatyh bashennyh sooruzhenij metodom statisticheskogo modelirovaniya: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. Kazan', 2013. 22 s. (In Russian)
52. Petrov A.A. Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti protyazhennyh i kombinirovannyh metallokonstrukcij pri sejsmicheskikh i vetrovyh vozdejstviyah: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. M., 1997. 56 s. (In Russian)
53. Xie Q., Zhang J. Experimental study on failure modes and retrofitting method of latticed transmission tower // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111365. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111365.
54. Huang P., Chen S., Gu M. Field measurement and aeroelastic wind tunnel test of wind induced vibrations of Lattice Tower // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019. DOI: 10.1002/tal.1622.
55. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under Skew Winds / D. Zhang [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 214. P. 104678. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104678.
56. Wind load investigation of self-supported lattice transmission tower based on wind tunnel tests / W. Zhang [et al.] // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. P. 113575. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113575.
57. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on large Eddy Simulation / R. Wu [et al.] // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 9. P. 428. DOI: 10.3390/buildings12091428.
58. Failure criteria and wind-induced vibration analysis for an offshore platform jacking system / H.-N. Li [et al.] // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2021. P. 2150105. DOI: 10.1142/S0219455421501054.
59. A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds / V. He [et al.] // *Advances in Engineering Software*. 2019. Vol. 127. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.10.004.
60. Dynamic analysis of self-supported Tower under Hurricane Wind Conditions / I. Fernández Lorenzo [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020. Vol. 197. P. 104078. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104078.
61. Quantification of the seismic behavior of a steel transmission tower subjected to single and repeated seismic excitations using vulnerability function and collapse margin ratio / M.M. Kassem [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 1984. DOI: 10.3390/app12041984.
62. Collapse failure analysis and fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to the multidimensional ground motion of different input directions / L. Tian [et al.] // *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1018–1028. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.042.
63. Fu Z., Tian L., Liu J. Seismic response and collapse analysis of a transmission tower-line system considering uncertainty factors // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 189. P. 107094. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107094.
64. Pan H., Li C., Tian L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2021. Vol. 19, no. 11. P. 4311–4337. DOI: 10.1007/s10518-021-01124-x.

65. Li C., Pan H., Tian L. Seismic performance analyses of pile-supported transmission tower-line systems subjected to depth-varying spatial ground motions // *Journal of Earthquake Engineering*. 2022. P. 1–25. DOI: 10.1080/13632469.2022.2113000.

66. Uzel soedineniya trub: patent № 2288399 C8 Rossijskaya Federaciya, MPK F16L 13/00, E04B 1/58. № 2005111480/06 / I. L. Kuznecov [i dr.]; zayavl. 07.04.2005: opubl. 27.11.2006. Zayavitel': Kazanskaya gosudarstvennaya arhitekturno-stroitel'naya akademiya. (In Russian)

67. Uzel soedineniya trub raznogo diametra: patent № 2620625 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F16L 13/00. № 2016130488 / I. Z. Gatiyatov [i dr.]; zayavl. 25.07.2016: opubl. 29.05.2017. (In Russian)

68. Sabitov L. S. Razrabotka i issledovanie soedinenij stal'nyh trub raznogo diametra // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2008. № 1 (9). S. 102–105. (In Russian).

69. Test and finite element analysis of a new type of double-limb double-plate connection joint in Narrow Base Tower / H. Yan [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 5936. DOI: 10.3390/ma14205936.

70. Comparison of the influence of double-limb double-plate joint on the stability bearing capacity of triangular and quadrilateral transmission tower structures / T. Zhao [et al.] // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 784. DOI: 10.3390/buildings12060784.

71. Influence of double-limb double-plate connection on stable bearing capacity of quadrilateral transmission tower / T. Zhao [et al.] // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 24. P. 12024. DOI: 10.3390/app112412024.

72. An L., Wu J., Jiang W. Experimental and numerical study of the axial stiffness of bolted joints in steel lattice transmission tower legs // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 187. P. 490–503. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.070.

73. Experimental testing and evaluation of real-scale lap-splice bolted connections used in typical lattice steel transmission towers / A. M. Taha [et al.] // *Thin-Walled Structures*. 2022. Vol. 171. P. 108790. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108790.

74. Experimental and numerical appraisal of steel joints integrated with single- and double-angles for transmission line towers / R. Ma [et al.] // *Thin-Walled Structures*. 2021. Vol. 164. P. 107833. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107833.

Received: 07.07.2024

Accepted: 23.08.2024

Author's information:

Dmitry V. VEREMEEV — Postgraduate Student; dmitry.veremeev@yandex.ru