



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 2, 59–78

УДК 624.014:725

(16)-0343-1

МЕТАЛЕВІ БАГАТОГРАННІ СТОЯКИ ЯК ОСНОВА ДЛЯ СПОРУД МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

І. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², Е. О. Лозинський, С. В. Гаранжа³

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.*

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ bilichenko90@mail.ru

Отримана 22 лютого 2016; прийнята 27 травня 2016.

Анотація. У статті розглянуто вітчизняний і зарубіжний досвід застосування металевих багатогранних гнутих конічних стояків (труб) при створенні споруд баштового типу, спрямованих на забезпечення потреб життєдіяльності сучасних міст. Представлено аналітичний огляд літературних джерел з метою визначити проблемні напрямки для подальшого вивчення напружено-деформованого стану (НДС) розглянутих конструктивних елементів і особливостей їх роботи під навантаженням. У перспективі результати досліджень дозволять удосконалити конструктивну форму досліджуваних багатогранних споруд, уточнити методику їх розрахунків, а також методику визначення вітрового навантаження на них, яка визначає основний внесок у напружено-деформований стан. Розглянуто вітчизняні перспективи виготовлення і застосування металевих багатогранних конструкцій у сучасному будівництві. Оговорені особливості існуючих методик розрахунків багатогранних стояків. Виконано поверхневий порівняльний аналіз результатів визначення параметрів НДС, отриманих за розглянутими методиками.

Ключові слова: металеві багатогранні гнуті стояки, сфера застосування, напружено-деформований стан, методика розрахунків, металеві оболонки, метод кінцевих елементів, виробництво багатогранних стояків, раціоналізація конструктивних параметрів стояків.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МНОГОГРАННЫЕ СТОЙКИ КАК ОСНОВА ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

И. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², Э. А. Лозинский, С. В. Гаранжа³

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.*

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ bilichenko90@mail.ru

Получена 22 февраля 2016; принята 27 мая 2016.

Аннотация. В статье рассмотрен отечественный и зарубежный опыт применения металлических многогранных гнутых конических стоек (труб) при создании сооружений башенного типа, направленных на обеспечение потребностей жизнедеятельности современных городов. Представлен аналитический обзор литературных источников с целью определить проблемные направления для дальнейшего изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых конструктивных элементов и особенностей их работы под нагрузкой. В перспективе результаты исследований позволят усовершенствовать конструктивную форму изучаемых многогранных сооружений, уточнить методику их расчетов, а также методику определения ветровой нагрузки на них, которая определяет основной вклад в напряженно-деформированное состояние. Рассмотрены отечественные перспективы изготовления и применения металлических многогранных конструкций в современном строительстве.

Оговорены особенности существующих методик расчета многогранных стоек. Выполнен поверхностный сравнительный анализ результатов определения параметров НДС, полученных по рассмотренным методикам.

Ключевые слова: металлические многогранные гнутые стойки, область применения, напряженно-деформированное состояние, методика расчета, металлические оболочки, метод конечных элементов, производство многогранных стоек, рационализация конструктивных параметров стоек.

METAL MULTIFACETED POLES AS A BASE OF THE URBAN INFRASTRUCTURES

Igor Garanzha ¹, Anton Tanasoglo ², Eduard Lozinskyi, Sofiia Garanzha ³

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, 86123.*

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.vtan@mail.ru, ³ bilichenko90@mail.ru

Received 22 February 2016; accepted 27 May 2016.

Abstract. The article deals with national and the foreign experience of metal multifaceted bent conical poles (tubes) at creation of tower structures directed to a providing of livelihood needs of modern cities. The analytic review of the literature has been given in order to identify problem areas for further study of a stress-strain state (SSS) of examined structural elements and features of their underload work. In the future, the results of studies will improve the constructive form of multifaceted structures, to modify methods of their calculation, and also the method for wind loads determining on them, which defines the main contribution to the stress-strain state. It has been considered in detail the native prospects of a manufacturing and using of metal multifaceted structures in modern construction. The features of the existing methods for calculating of multifaceted poles have been found out. The superficial comparative analysis of the SSS parameters definition, obtained by the discussed methods, has been carried out.

Keywords: metal multifaceted bent poles, area of application, stress-strain state, calculation method, metal shell, finite element method, multifaceted poles' manufacturing, rationalization of poles' design parameters.

Введение

В мировой практике опыт применения опор на основе металлических многогранных гнутых стоек (МГС) насчитывает около 40 лет. Основная область их применения – опоры воздушных линий электропередачи (ВЛ). Опоры на основе МГС широко используются в цепях всех классов напряжений в качестве промежуточных и анкерных опор, порталов распределительных устройств, стоек под электрооборудование электрических подстанций. Помимо этого, МГС могут применяться как въездные знаки, опоры наружного освещения улиц, рекреационных и промышленных зон, автомагистралей, осветительные опоры спортивных сооружений, как теле-, радиовышки, как опоры контактной сети городского и железнодорожного транспорта и т. д. Велико многообразие кон-

струкций стоек, узлов крепления их секций и методов закрепления в грунте [3–8, 21, 40].

Стальные многогранные стойки представляют собой конические трубы коробчатого многогранного сечения, изготавливаемые изгибом стального листа с последующим свариванием его замыкающего стыка на ребре или грани (рис. 1). Высота стойки h достигает 80 м с толщиной стенки до 20 мм [3–5]. Диаметр в комле стойки d_k варьируется в пределах 250–3 000 мм, диаметр верха стойки d_v – в пределах 200–500 мм. Конструкции на основе металлических многогранных гнутых стоек приведены на рис. 2.

В Украине, а также других странах СНГ многогранные стойки ещё не получили широкого распространения. Незначительный опыт имелся в строительстве многогранных опор с фланцевым соединением секций и оттяжками для воз-

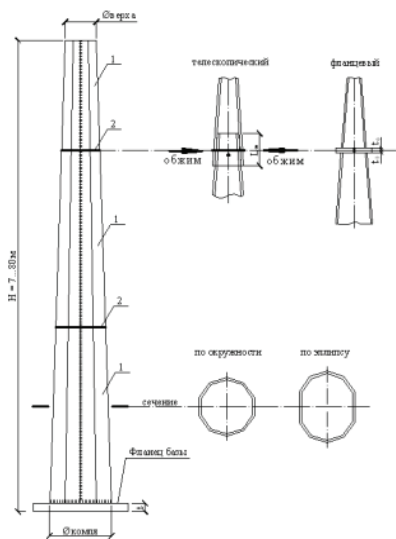


Рисунок 1. Общая конструктивная схема МГС: 1 – секция; 2 – стык секций.

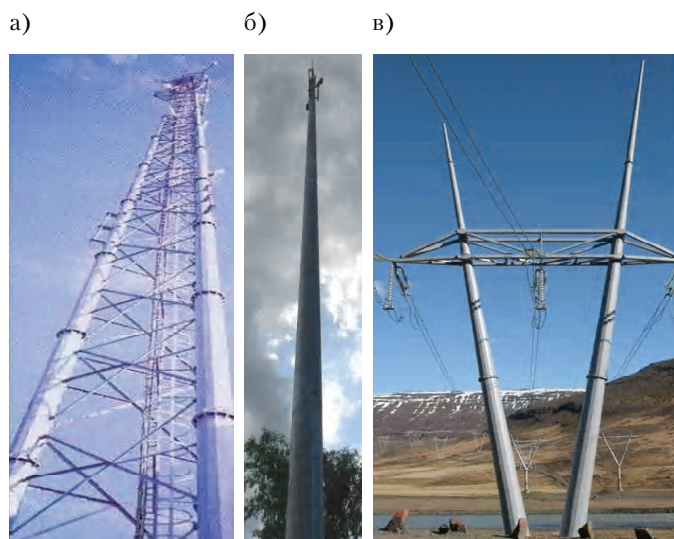


Рисунок 2. Конструкции на основе металлических многогранных гнутых стоек: а), б) башни мобильной связи; в) анкерная опора ВЛ 420кВ.

душных линий класса напряжения 110–330 кВ. Но такая конструкция не имела перспектив широкого применения. Исключение в этом вопросе является Российская Федерация, где МГС широко применяются уже в течение почти десяти лет.

Критический обзор литературных источников

На сегодняшний день в мире нет единого мнения по поводу того, что из себя должна представлять расчетная схема конструкций МГС и какую из существующих методик применять к их расчету. В этом случае интерес представляет не только сама многогранная стойка, но и ее фланцевая база, а именно их совместная работа как единой строительной конструкции.

Еще в 70-х годах прошлого века в работе А. А. Зевина [11], А. И. Курносова [11] была предложена методика расчета МГС как стержней кусочно-постоянного сечения по деформированной схеме. Данная методика реализована в нормативном документе «Рекомендации по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи и открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением выше 1 кВ (к СНиП II-23-81*)», которая в течение несколь-

ких десятилетий широко применялась в проектировании МГС (особенно для опор ВЛ), имея при этом два существенных недостатка. Во-первых, она не дает возможности определять параметры НДС стоек в любом интересующем сечении, а только в уровне закладки с фундаментом. Во-вторых, нет возможности по результатам расчетов проследить работу сжатых и растянутых зон стоек, что особенно важно для сжато-изогнутых элементов.

Если рассматривать МГС как металлические складчатые оболочки (складки), то их статические расчеты можно выполнять согласно безмоментной и моментной теориям. Расчеты по безмоментной теории (Г. Элерс [12, 13], Г. Кремер [14, 15], Е. Грубер [16], В. Тетцлаф [17]) сводятся к решению трехчленных уравнений метода сил или метода перемещений. Расчеты складок по моментной теории (с учетом поперечных моментов) выполняются с помощью уравнений метода сил (П. Л. Пастернак [18]) или канонических уравнений смешанного метода (В. З. Власов [19], Д. Итцхаки [20], И. Е. Прокопович [21], И. Н. Слезингер [21], М. В. Штемберг [21]). Основное противоречие применения методов расчетов складок к конструкциям металлических МГС сводится к тому, что наибольшее распространения в практике строительства складки получили в железобетонных

пространственных конструкциях из соединенных монолитных плоских плит (пространственные покрытия, лоточные бункера, водопроводные лотки и др.).

Теория безмоментных расчетов гладких тонкостенных оболочек изложена в работах В. В. Горева [24], Е. Н. Лессига [23], А. Ф. Лилеевой [23]. Учитывая критерий определения тонкостенных оболочек ($20 < r/t < 200$) и конструктивную особенность МГС (излом оболочки в сечении), можно говорить о возможности применения данной теории расчетов для стоек с разным количеством граней ввиду их визуального сходства с круглым сечением.

Вопросу расчетов фланцевых соединений как наиболее распространенного вида соединения в конструкциях МГС (крепление стоек с фундаментом и секций стоек между собой) посвящены работы И. А. Биргера [30], Г. Б. Иосилевича [30, 32], С. Т. Ковгана [32], Ю. В. Лащука [32], которые рассматривают неконтактные фланцы с методикой расчетов по переменной податливости. Основным недостатком такой методики есть невозможность учета особенностей работы фланцевой базы МГС на стыке с бетонном фундаменте. Кроме того, для расчетов фланцевой базы рассматривается возможным применение методик, изложенных в «Пособии по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03-85)» [33], а также в «Рекомендациях по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций» [31] (дополнение к СНиП II-23-81*, III-18-75 и 3.03.01-87).

За рубежом в настоящее время изучением действительной работы конструкций МГС и их проектированием занимается ряд ведущих организаций, таких как Sara-group и Mitas (Турция), Sumitomo Metal Industries (Япония), Al-Babtein Leblanc (Саудовская Аравия), Safe Towers (США), а также американских инженеров, таких как В. Lanier, D. Schnerch, S. Rizkalla, R. Dreifues.

Сравнительный анализ результатов расчетов параметров НДС стоек и базы по существующим методикам показал значительное их расхождение, а следовательно, необходимость экспериментальной проверки результатов и создание рациональной конечно-элементной модели

для использования в программно-вычислительных комплексах.

В литературных источниках неоднократно отмечаются основные преимущества многогранных конструкций в сравнении с аналогами бетонного и металлического решетчатого исполнения (исходя из зарубежного опыта строительства и эксплуатации конструкций на основе МГС) такие как эстетичность, уменьшенный землеотвод, адаптивность, транспортабельность, скорость монтажа, безотказность, долговечность, вандалоустойчивость, ремонтпригодность, полная автоматизация производства, а вследствие, экономическая эффективность. Но, наряду с преимуществами, конструкции МГС имеют ряд недостатков: конструктивные недостатки, связанные с неэффективностью сечения и его несоответствием величинам действующих нагрузок, которые приводят к существенному перерасходу материала и отсутствию обеспечения равнопрочности конструкции во всех направлениях (особенно для опор ВЛ); монтажные недостатки, выраженные в сложности выполнения такелажных работ и работ по установке конструкций стоек; эксплуатационные недостатки, связанные с наличием закрытых, непрветриваемых полостей.

Анализ методик определения ветровой нагрузки, предложенных нормативными документами Украины, России и Европы, показал их основной недостаток, связанный с отсутствием зависимости аэродинамических коэффициентов от ветрового азимута β и критерия справедливости аэродинамических коэффициентов критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$ от количества граней стоек, а также отсутствие эшпор ветрового давления, что в свою очередь не дает полной картины распределения ветрового воздействия в сечении МГС. Важно отметить противоречивость отечественных и зарубежных нормативных документов, которая состоит в расхождении значений коэффициентов лобового сопротивления аналогичных многогранников и критического числа Рейнольдса, при котором справедливы значения этих коэффициентов. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований ветрового воздействия на конструкции МГС по определению коэффициентов локального ветрового давления C_{pi} и

лобового сопротивления C_{xt} в зависимости от геометрических параметров стоек и угла ветровой атаки (ветрового азимута β).

Вопрос аэродинамической неустойчивости тел вращения, вследствие вихреобразования в процессе отрыва пограничного слоя, как одно из наиболее интересных направлений в изучении работы высотных строительных конструкций в ветровом потоке, а также общие вопросы, связанные с ветровыми воздействиями на сооружения, которые выполнены в виде тел вращения, рассмотрены в работах М. А. Березина [34, 35], Л. Х. Блюминой [36, 37], М. М. Бычкова [38], Е. В. Горохова [39–42], М. И. Казакевича [39, 43], М. Ф. Краснова [44], С. Г. Кузнецова [40–42, 45–48], Г. А. Савицкого [49], А. М. Луговцова [50], E. Simiu [51], Robert H. Scanlan [51], J. D. Holmes [54], T. Lawson [55], N. J. Cook [52], С. Dyrbye [53] и др. Все работы вышеперечисленных авторов направлены на изучение ветрового влияния на цилиндрические сооружения. Хотя многогранные стойки своим конструктивным исполнением напоминают цилиндр (особенно при количестве граней $n \geq 12$) и довольно часто в современном проектировании к МГС применяют аэродинамические характеристики как для цилиндра, нельзя не разделять эти два типа конструкций. Поэтому необходимо изучение характера ветрового воздействия на многогранные конструкции с целью однозначно ответить на вопрос, связанный с их сходством с цилиндрическими конструкциями.

Особое внимание вопросу проведения натурных испытаний конструкций металлических МГС уделено научными сотрудниками Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – В. Н. Васылевым, Е. В. Гороховым; ОАО «ПРОМиК» (г. Днепрпетровск, Украина) – Р. Н. Жданским, В. И. Костиковым, С. И. Нескиным, О. В. Семенко; ООО «Связьтехсервис» (г. Киев) – А. Р. Пурцеладзе, а также компании Sumitomo Metal Industries (Япония) – Y. Nishida, M. Shioko. Анализ результатов натурных испытаний указал на характерные зоны МГС, по которым вероятнее всего произойдет разрушение стоек и которые требуют дополнительного теоретического и экспериментального изучения.

Перспективы изготовления и применения МГС

Очевидно, что многогранные опоры как в нашей стране, так и за рубежом предпочтительны для использования в городских условиях, где особое внимание уделяют эстетическим свойствам строительных конструкций и существуют серьезные проблемы с землеотводом, а также в горных и труднодоступных районах. Но, несмотря на множество положительных качеств, конструкции на основе МГС в течение последних 40 лет не получили широкого практического применения на территории Украины. Это связано в первую очередь со сложной, трудоемкой и дорогостоящей технологией изготовления (рис. 3), требующей от завода изготовителя соответствующих производственных мощностей, т. е. специализированного оборудования (рис. 3). За последнее десятилетие строительство в Украине (особенно электросетевое) все чаще обращает внимание на конструкции МГС (как замена существующих железобетонных и металлических решетчатых стоек различного назначения) и все шире становится область их применения.

Для размещения производства МГС на действующем предприятии по изготовлению металлоконструкций (ЗМК) необходимо иметь [5, 6]:

- свободные производственные площади для размещения основного технологического оборудования, порядка 1 200–1 500 м²;
- автоматическую установку плазменной (газоплазменной) резки листового металла с рабочей площадью стола раскроя 400–500 м²;
- пресс усилием 1 600–2 000 тонн, с длиной гига 16–20 м;
- установку для автоматической или полуавтоматической сварки;
- подготовленных специалистов для работы на этом оборудовании;
- опыт по изготовлению и монтажу нестандартного оборудования;
- вспомогательный станочный парк;
- цех (участок) для антикоррозионной обработки (холодного или горячего цинкования) стоек, траверс, лестниц и прочих конструкций.

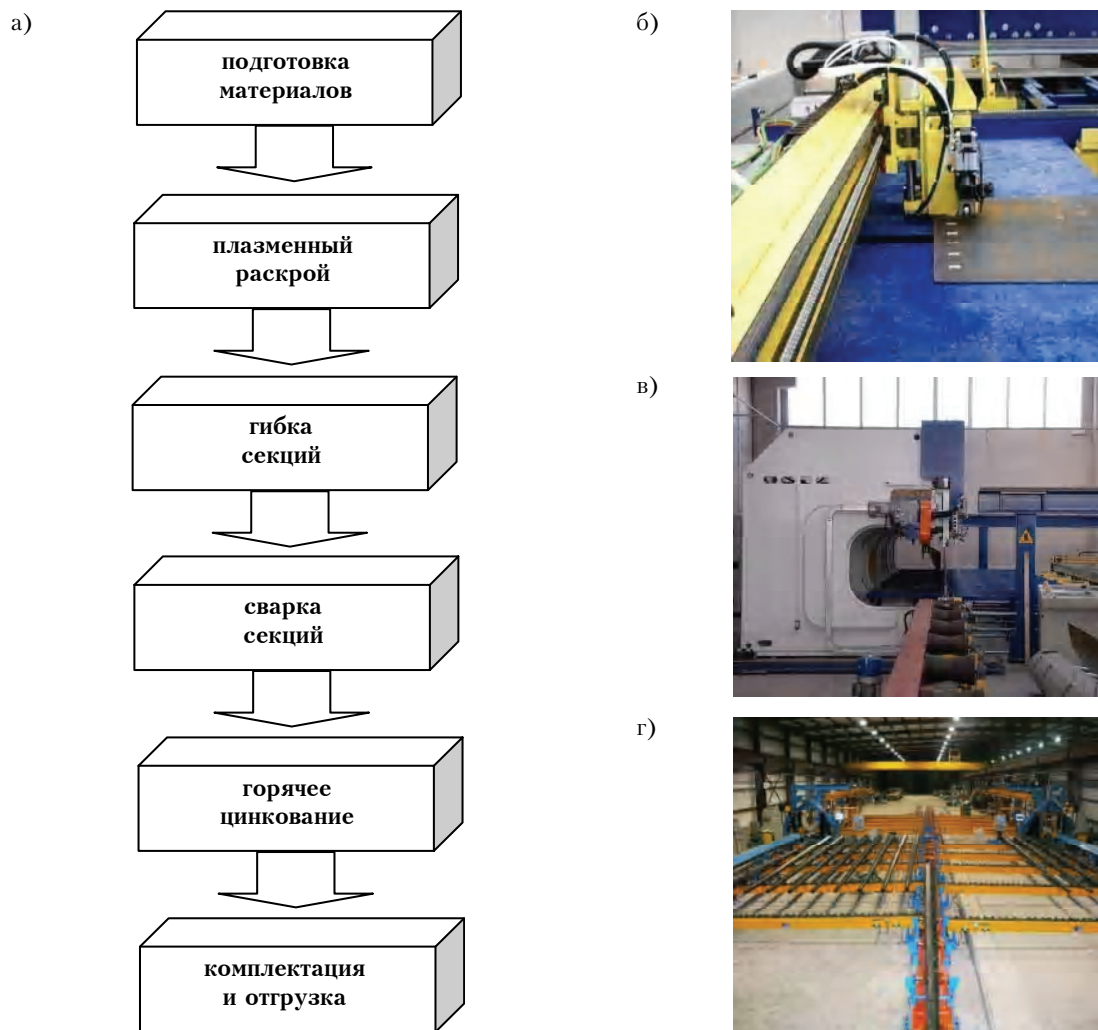


Рисунок 3. Производство многогранных гнутых стоек на ПАО «АЗМК»: а) технологическая цепочка производства МГС; б) автоматическая установка плазменного раскрой; в) листогибочный автоматический пресс (ПАО «АЗМК»); г) участок подготовки конструкций МГС к сортировке и складированию.

Таким образом, для освоения производства конструкций МГС на одном ЗМК необходимы инвестиции для приобретения вышеуказанного оборудования в размере 6–7 млн евро [5, 6].

На данный момент на всей территории СНГ лидирующие позиции по производству МГС занимает ЗАО Домодедовский завод металлических конструкций «МЕТАКО» (Московская область, Россия), который является не только крупнейшим поставщиком данных конструкций в России и ближайшем зарубежье, но и является единственной на данный момент альтернативой заводам дальнего зарубежья.

В 2011 году на ПАО «Авдеевский завод металлических конструкций» (АЗМК) запущен

в эксплуатацию специализированный участок по производству конструкций МГС (рис. 3). Таким образом, в ближайшей перспективе номенклатура многогранных гнутых стоек может быть очень широкой, т. е. это могут быть не только стойки под опоры ВЛ, но и порталы подстанций, стойки под электрическое оборудование подстанций, стойки телефонной и телеграфной связи, стойки ветровых генераторов и многое другое.

Помимо АЗМК в Украине в данный момент функционируют еще 2 предприятия – производители конструкций МГС. Это ООО «Евроформат Стальконструкция» г. Запорожье и ООО «Метадизайн» г. Павлоград (Днепропет-

ровская обл.), изготавливающие осветительные опоры и опоры ВЛ 6–110 кВ. В качестве основных достоинств производственных мощностей ПАО «АЗМК» можно выделить:

- более широкий спектр изготавливаемых конструкций;
- наличие новейшего оборудования, позволяющего резко повысить скорость процесса изготовления и производительность до 700–1 000 т/мес.

На сегодняшний день в Украине ведутся работы рядом проектных, научных организаций с целью продвижения МГС на украинский рынок, и не только, как высокотехнологического продукта, позволяющего во многих случаях решать ранее нерешаемые задачи в области электросетевого строительства и других отраслях народного хозяйства [3–8]. Наиболее развитым и перспективным предприятием в этом направлении является ОАО «ПРОМиК», (г. Днепрпетровск), сотрудники которой за последние годы спроектировали, испытали, построили и реконструировали не одну сотню километров ВЛ с применением опор на основе МГС. Также нельзя не отметить достижения в области электросетевого строительства объектов на основе МГС таких организаций как НТЦЭ НЭК «УКРЭНЕРГО» (г. Киев) и ОАО «Институт «Энергосетьпроект» (г. Киев, Харьков), которые, начиная еще с 80-х годов прошлого столетия, вносят огромный вклад в создание конструкций на основе МГС.

Многовариантная рационализация конструктивных параметров металлических многогранных стоек

Важную роль в современном существующем проектировании конструкций на основе МГС играет так называемая многовариантная оптимизация [3], применяемая для определения оптимального расхода материала на изготовление стойки и ее фундамента. В таблице представлены характеристики оптимизации стальных многогранных опор, разработанные компанией ОАО «ПРОМиК» (г. Днепрпетровск).

Каждый вариант рассчитывается по первому и второму предельным состояниям, причем толщина стенки каждой секции должна определяться не только по условиям прочности (1-е предельное состояние), но и по величине максимального отклонения верха опоры (2-е предельное состояние). После рассмотрения всех вариантов выбирается конструкция соединений секций (фланцевое или телескопическое), а также конструкция фундамента.

Существующие методики расчета конструкций металлических МГС

Из критического обзора литературных источников ясно, что в современном проектировании стальных многогранных стоек существует 4 наиболее популярных методики их расчета [11, 23–26, 29], имеющие друг относительно друга

Таблица. Характеристики оптимизации стальных многогранных стоек

Характеристики оптимизации	Численные значения характеристик оптимизации	
Количество граней в стойке	6, 8, 10, 12, 16, 18	
Количество секций в стойке	4, 5, 6, 7, 8	
Длина секции, м	3–12	
Толщина листовой стали в секциях, мм	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20	
Конусность стойки, мм/м	14–32	
Размер козла, мм (низ/верх) по высоте, м	до 40 м	250–1 500 / 200–400
	40–50 м	1 200–1 700 / 400
	50–60 м	1 500–2 000 / 400–500
	60–70 м	1 800–2 800 / 500
	70–80 м	1 800–3 000 / 500

существенные противоречия, носящие фундаментальный характер. Связаны они в первую очередь с особенностями представления конструкций МГС расчетных схемах – стержень или оболочка.

При использовании методики А [11] расчет ведется по деформированной схеме и стержень рассматривается кусочно-постоянного сечения, состоящий из n участков. Все внешние нагрузки $P^{(i)}$, $N^{(i)}$, $M^{(i)}$ приведены к границам участков (узлам).

На рис. 4 представлен пример расчетной схемы стального многогранного пятисекционного стержня, упруго-защемленного в основании (расчетная схема свободно стоящей опоры).

Расчет выполняется методом «прогонки» в три этапа. На первых двух этапах последовательно для узлов $i = 1, 2, \dots, n$ определяются изгибающие моменты $-M^{(i)}$ и $+M^{(i)}$ в сечениях ниже и выше узла i и углы поворота φ_i сечений i по формулам (1)–(3):

$$M_i^- = a_i M_{i-1}^+ - b_i \varphi_{i-1} - c_i; \quad (1)$$

$$M_i^+ = M_i^- - M^{(i)}; \quad (2)$$

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \frac{l_i}{2EI_i} (M_{i-1}^+ + M_i^-) + \Delta\varphi_i. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3):

$$a_i = \frac{3 - 2\alpha_i}{\alpha_i}; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{N_i^r l_i}{\alpha_i}; \quad (5)$$

$$\tilde{n}_i = \frac{Q_i^r l_i + \Delta f_{ii} N_i^r}{\alpha_i}; \quad (6)$$

$$\alpha_i = 1 + \frac{N_i^r l_i^2}{6EI_i}, \quad (7)$$

где l_i – длина i -го участка, расположенного между узлами $i-1$ и i ;

Q_i^r , N_i^r – поперечная и нормальная силы на i -м участке, определенные по недеформированной схеме;

I_i – момент инерции i -го участка;

Δf_{ii} – приращение стрелки начального искривления стойки на i -м участке, определяемое по (8);

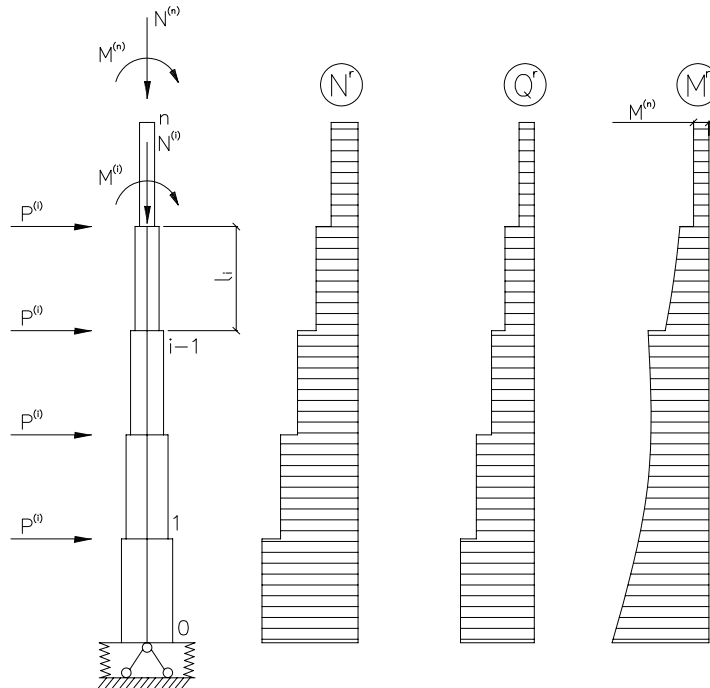


Рисунок 4. Упруго-защемленная в основании многогранная стойка кусочно-постоянного сечения (схема нагрузок и внутренних усилий).

$\Delta\varphi_i$ – приращение угла поворота начального искривления на i -м участке, определяемое по (9);

$$\Delta f_i = \frac{l_i}{200} - \frac{l}{750} \left[\sin \frac{\pi \xi_i}{l} - \sin \frac{\pi \xi_{i-1}}{l} \right]; \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_i = -\frac{\pi}{750} \left[\cos \frac{\pi \xi_i}{l} - \cos \frac{\pi \xi_{i-1}}{l} \right], \quad (9)$$

где $\xi_i = l_1 + \dots + l_i$ – расстояние от узла 0 до узла i , при этом $\xi_0 = 0$.

Для стержней сквозного сечения момент инерции i -го участка I_i принимается равным расчетному моменту I_{di} , который определяется по формуле (10):

$$I_{di} = A_i \frac{l^2 \mu^2}{\beta \lambda_{ef}^2}, \quad (10)$$

где A_i – площадь сечения i -го участка стержня;
 β – коэффициент, равный 1,0 при сварных и 1,2 при болтовых соединениях;
 μ – коэффициент расчетной длины стержня;
 λ_{ef} – приведенная гибкость стержня.

Усилия Q_i, N_i в формулах (5)–(7) принимают с учетом знаков. Положительные направления внутренних усилий для i -го участка показаны на рис. 5.

По формулам (1)–(3) определяют изгибающие моменты и углы поворота сечений в узле i через соответствующие величины в узле $i-1$. Для того чтобы начать расчет, необходимо на первых двух этапах задаться значениями $M^+_{(0)1}, \varphi_{(0)1}, M^+_{(0)2}, \varphi_{(0)2}$ (нижний индекс в скобках обозначает номер этапа расчета). Эти величины принимаются следующими:

– $M^+_{(0)1}, M^+_{(0)2}$ – произвольные, причем $M^+_{(0)1} \neq M^+_{(0)2}$;

$$\varphi_{(0)1} = M^+_{(0)1} \cdot \bar{\varphi}; \quad (11)$$

$$\varphi_{(0)2} = M^+_{(0)2} \cdot \bar{\varphi}, \quad (12)$$

где $\bar{\varphi}$ – коэффициент податливости заделки в основании, равный углу поворота от единичного момента, рад.

Результатом расчета на первых двух этапах являются значения моментов $M^+_{(n)1}$ и $M^+_{(n)2}$ для узла n , соответствующие заданным параметром в нулевом узле.

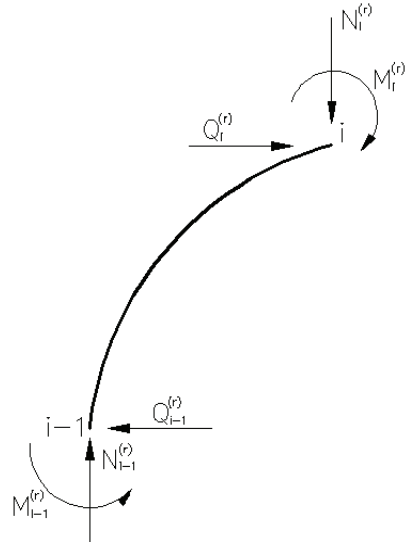


Рисунок 5. Положительные направления внутренних усилий i -го участка стержня.

Фактические значения параметров в нулевом узле определяются по следующей формуле (13):

$$M^+_{0} = M^+_{(0)1} + \frac{M^+_{(n)1}(M^+_{(0)1} - M^+_{(0)2})}{M^+_{(n)1} + M^+_{(n)2}}. \quad (13)$$

Используя значения M^0 и φ_0 , на третьем этапе расчета по формулам (1)–(3) определяются фактические изгибающие моменты и углы поворота по деформированной схеме.

Приращение прогибов Δf_i и f_i узлов определяется по формулам (14), (15):

$$\Delta f_i = \varphi_{i-1} l_i + \Delta f_{ii} + \frac{l_i^2}{6EI_i} (2M^+_{i-1} + M^-_i); \quad (14)$$

$$f_i = f_{i-1} + \Delta f_i. \quad (15)$$

Изложенная выше методика основана на кусочно-линейной аппроксимации эпюры моментов в деформированном состоянии. Если число таких участков не менее пяти, то такая аппроксимация практически приводит к пренебрежимо малой погрешности.

Расчет на прочность следует выполнять в соответствии с требованиями [1, 2] как изгибаемых элементов или элементов, подверженных действию осевой силы с изгибом, соответственно усилия для данного расчета определяются по методике, описанной выше (для стоек одностоечных

свободностоящих опор). В зависимости от количества граней стойки необходимо проследить напряженно-деформированное состояние в характерных точках сечения конструкции – точках с максимальными нормальными и касательными напряжениями, нейтральные точки (рис. 6).

Кроме этого, сжато-изгибаемые элементы из стального многогранного профиля следует проверять на устойчивость [1, 2] как в плоскости, так и из плоскости действия изгибающих моментов, кроме стоек одностоечных свободностоящих опор, которые рассчитываются по деформированной схеме, и на устойчивость проверяются только из плоскости действия моментов.

При расчете местной устойчивости стенки необходимо выполнить две проверки:

- как стенки элемента коробчатого сечения при $m = 0$ [1, 2];
- как замкнутой цилиндрической оболочки [1, 2].

Методика Б [23] подразумевает расчет пространственных оболочек (к каковым будем относить стальные многогранные стойки) по двум группам предельных состояний (по несущей способности и жесткости соответственно).

В основу современных теорий расчета упругих тонкостенных оболочек положены следующие основные гипотезы.

1-я гипотеза. Оболочка испытывает двухосное напряженное состояние (давление друг на друга параллельных срединной поверхности слоев тонкостенной оболочки пренебрежимо мало).

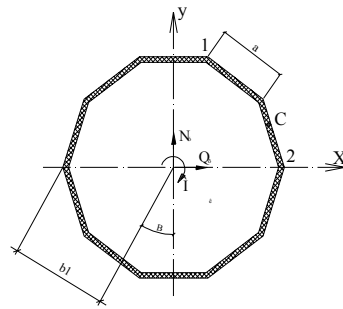
2-я гипотеза. Материал оболочки изотропный и следует закону Гука.

3-я гипотеза. Прямолинейный элемент, перпендикулярный срединной поверхности до деформации, остается прямолинейным и перпендикулярным деформированной срединной поверхности и не изменяет своей длины (гипотеза прямых нормалей или гипотеза Кирхгофа–Лява).

На основании этих гипотез созданы две группы теорий оболочек: линейные теории, уравнения которых содержат анализ малых перемещений; и нелинейные теории, построенные с учетом конечных перемещений.

Расчет пространственного сооружения в виде оболочки ведется по прочности, по устойчивости и по выносливости.

а)



б)

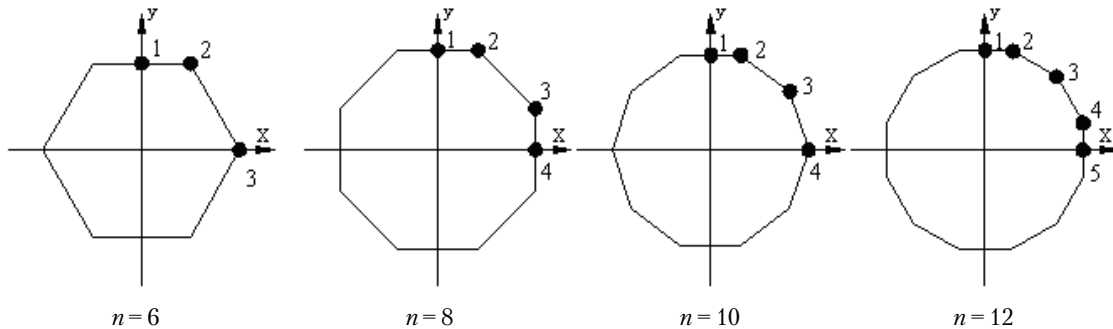


Рисунок 6. Сечение элемента из гнутого многогранного профиля: а) обозначение параметров сечения и усилий; б) характерные угловые точки 1–5.

Из источника [23] делаем вывод о принадлежности стальных многогранных стоек к тонкостенным оболочкам (в зависимости от отношения радиуса оболочки r к ее толщине δ). Об этом свидетельствует выполнение следующего условия (16):

$$20 \leq \frac{r}{\delta} < 200. \quad (16)$$

Основной теорией расчета большинства тонких оболочек является безмоментная теория, т. е. определяющими внутренними усилиями в оболочке являются нормальные силы N_1 и N_2 и касательные силы S (рис 7). Изгибающими, крутящими моментами, а также поперечными силами пренебрегают ввиду малости их влияния на несущую способность оболочки.

Основными напряжениями, возникающими в теле тонкостенной оболочки при безмоментном состоянии, являются кольцевые и меридиональные напряжения. Определяются они раздельно от каждого из действующих внутренних усилий (17)–(19):

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{\delta}, \quad (17)$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{\delta}; \quad (18)$$

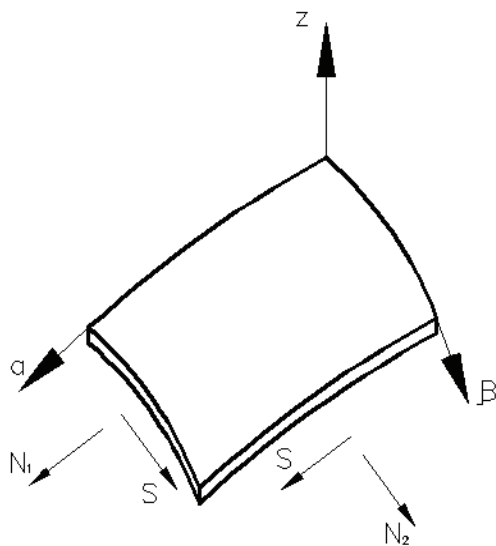


Рисунок 7. Система координат и усилия в сечениях тонкостенной оболочки (в безмоментном состоянии).

$$\tau_s = \frac{S}{\delta}, \quad (19)$$

- где σ_1 – меридиональные напряжения от усилия N_1 ;
- N_1 – внутреннее усилие в оболочке, действующее вдоль образующей;
- σ_2 – кольцевые напряжения от усилия N_2 ;
- N_2 – внутреннее усилие в оболочке, действующее в кольцевом направлении;
- τ_s – напряжения среза, касательные срединной поверхности оболочки;
- S – касательные внутренние усилия в оболочке;
- δ – толщина оболочки.

Усилия в тонкостенных оболочках в безмоментном состоянии N_1 , N_2 , и S определяются следующими физическими уравнениями (20)–(22):

$$N_1 = \frac{E\delta}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad (20)$$

$$N_2 = \frac{E\delta}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1); \quad (21)$$

$$S = G\delta\gamma, \quad (22)$$

- где ε_1 и ε_2 – относительные удлинения срединной поверхности в направлениях α и β (рис. 9);
- γ – относительный сдвиг срединной поверхности;
- G – модуль сдвига;
- μ – коэффициент Пуассона.

По методике В [15] расчет многогранных стальных стоек, также как и в рассмотренных выше методиках, выполняется как пространственных листовых конструкций (тонкостенных оболочек) по безмоментной теории, хотя многие современные проектировщики представляют стальные многогранные стойки при расчете как стержень.

Оболочкой называют сплошную конструкцию (или элемент), две ограничивающие криволинейные поверхности, которых отстоят на малое расстояние, во много раз меньшее, чем прочие размеры. Воображаемую поверхность, равноотстоящую от обеих ограничивающих поверхностей, называют срединной поверхностью. Геометрическое наименование оболочки обуславливается формой ее срединной поверхности

(для стальных многогранных стоек актуальными формами являются цилиндрическая и коническая в зависимости от назначения стоек) (рис. 8).

Конструкции на основе стальных многогранных стоек можно отнести к тонкостенным оболочкам вращения (образуемые путем вращения произвольной плоской кривой вокруг оси $z-z$) (рис. 9). Эта характеристика определяется отношением радиуса оболочки R к ее толщине t , т. е. $R/t \geq 20$, что свидетельствует из теории оболочек о безмоментном двусосном напряженном состоянии. В частном случае на оболочки вращения, находящиеся под действием осесимметричной нагрузки в безмоментном напряженном состоянии, действуют только нормальные меридиональные и кольцевые усилия.

Безмоментное напряженное состояние оболочек описывается уравнением Лапласа (23), получаемым из рассмотрения равновесия бесконечно малой площадки, выделенной двумя горизонтальными и двумя меридиональными плоскостями (рис. 9):

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} - p = 0, \quad (23)$$

где N_1 и N_2 – соответственно, меридиональное и кольцевое усилия;

p – нормальная оставляющая внешней нагрузки на элементарной площадке.

Рассматривая равновесие верхней части оболочки, отсеченной горизонтальной плоскостью, перпендикулярной оси симметрии $z-z$, получа-

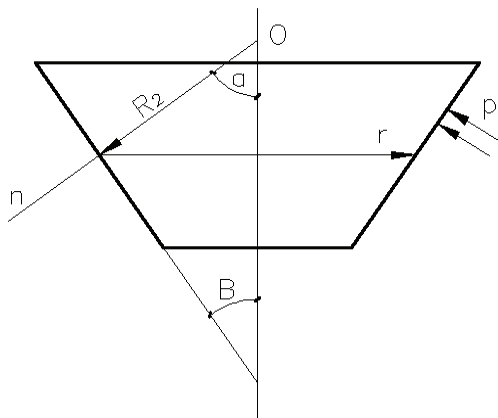


Рисунок 8. Схема конической оболочки.

ют зависимость для определения меридионального усилия N_1 (24)–(25):

$$p\pi r^2 = 2\pi r N_1 \cos \beta, \quad (24)$$

или

$$N_1 = \frac{pR_2}{2}. \quad (25)$$

Кольцевое усилие N_2 можно найти из уравнения Лапласа (23) с использованием равенства (26):

$$N_2 = N_1 \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (26)$$

Для определения меридиональных и кольцевых усилий в оболочках конкретного типа достаточно подставить в равенства (30)–(32) радиусы кривизны. Соответствующие напряжения при толщине оболочки t будут определяться по формулам (27)–(30):

– для цилиндрической оболочки ($R_1 = \infty$, $R_2 = r$):

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{t} = \frac{pr}{2t}; \quad (27)$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{t} = \frac{pr}{t}; \quad (28)$$

– для конической оболочки ($R_1 = \infty$, $R_2 = \frac{r}{\cos \beta}$):

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{t} = \frac{pr}{2t \cos \beta}; \quad (29)$$

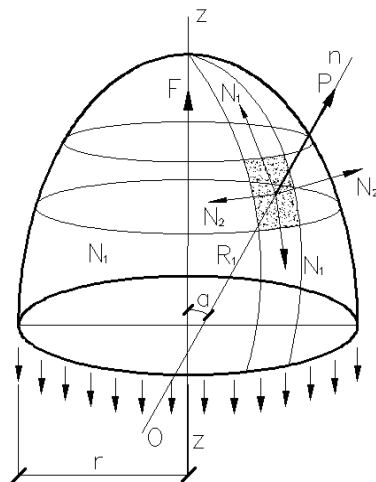


Рисунок 9. К определению усилий в оболочке вращения.

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{t} = \frac{pr}{t \cos \beta}. \quad (30)$$

Для листовых конструкций в виде оболочек вращения, находящихся под действием осесимметричной нагрузки, условие прочности определяется выражением (31) [1, 2, 11, 23, 24]:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \leq R_y \gamma_c. \quad (31)$$

Методика Г [25, 26, 29], основанная на методе конечных элементов (МКЭ) и реализованная в программно-вычислительных комплексах (SCAD, Lira), на сегодняшний день наиболее широко распространена в проектировании стальных многогранных стоек любого назначения. Основана она на создании конечно-элементных расчетных схем в современных программно-вычислительных комплексах с последующим их анализом и определением численных значений необходимых параметров НДС (усилий, напряжений, перемещений) при помощи визуализации результатов расчета на экране ЭВМ. В качестве основного достоинства данной методики следует отметить возможность исследования (расчета) конструкций в произвольном сечении, чего не позволяют существующие аналитические методики.

Одной из известных, но мало применяемых методик для определения перемещений стоек (балок) переменной жесткости (к таковым мы отнесем стальные многогранные стойки), является методика немецкого ученого в области сопротивления материалов Отто Мора [27, 28], основанная на численном методе конечных элементов. Данная методика позволяет определить прогиб свободного конца стойки (балки) без учета собственного веса ее материала (перемещение верха консольной стойки f_a), представленной в виде сплошного стержня, жестко заземленного в основании (рис. 10).

Момент инерции в текущем сечении стойки определяется по соотношению (рис. 10) из выражений (32–33):

$$\frac{J_l - J_0}{l} = \frac{J_z - J_0}{z}. \quad (32)$$

В формуле (32):

$$J_z = kz + J_0; \quad (33)$$

$$k = \frac{J_z - J_0}{l}. \quad (34)$$

Прогиб свободного конца консольной стойки переменной жесткости Δ_s определяется выражением (35):

$$\Delta_s = \int_0^l \frac{Pz^2}{EJ_z} dz = \frac{P}{E} \int_0^l \frac{z^2}{kz + J_0} dz = \frac{P}{E} \cdot \left[\frac{1}{2k} z^2 - \frac{z}{k^2} J_0 + \frac{J_0^2}{k^3} \cdot \ln(kz + J_0) \right] = \frac{P}{2k^3 E} \cdot \left[h^2 k^2 - 2hJ_0 k + 2J_0^2 \cdot \ln(kh + J_0) - J_0^2 \ln(J_0) \right], \quad (35)$$

где P – расчетная нагрузка на стойку;
 E – модуль упругости материала стойки;
 l – высота стойки;
 J_0 – момент инерции крайнего сечения стойки.

Сравнительный анализ результатов расчета НДС стойки

Сравнительный анализ результатов расчета по вышеперечисленным методикам выполнен на примере стальной восьмигранной стойки осветительной опоры с расчетным изгибающим моментом в уровне заделки стойки $M_p = 130$ кН·м. В качестве определяемых параметров НДС принимаем приведенные напряжения в приопорной зоне конструкции σ_{np} , МПа и перемещения

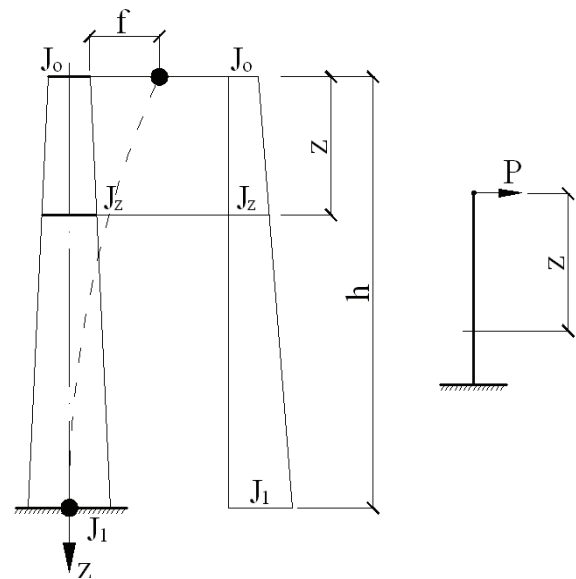


Рисунок 10. Стойка переменной жесткости для определения прогиба ее свободного конца по формуле О. Мора.

верхней точки стойки f_{σ} , мм (рис. 11). На рис. 12–13 приведены графики сравнения результатов расчета параметров НДС по существующим аналитическим и компьютерным методикам.

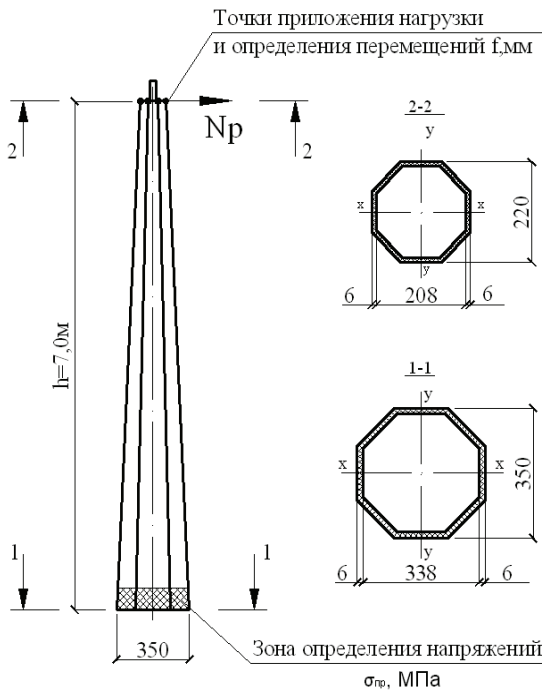


Рисунок 11. Схема стальной восьмигранной осветительной опоры.

Выводы

1. Актуальность конструкций на основе металлических многогранных стоек в качестве объектов городской инфраструктуры заключается в первую очередь в эстетичности и низком землеотводе под МГС.
2. Изготовление уже не является проблемным вопросом при создании конструкций на основе МГС ввиду появления современных отечественных производственных мощностей.
3. Разница значений результатов расчета параметров НДС стойки по предложенным методикам составляет:
 - $\Delta\sigma_{np} \approx 7-13\%$ (σ_{max} → методика [25, 26, 29], σ_{min} → методика [24]);
 - $\Delta f_{\sigma} \approx 12-21\%$ (f_{max} → методика [25, 26, 29], f_{min} → методика [27, 28]).
4. Численные методики [23, 24] рассматривают конструкции в виде стержня и рассчитываются по деформированной схеме.
5. Только две из четырех методик [11, 25, 26, 29] учитывают при определении НДС количество граней стойки, что существенно влияет на значения напряжений и перемещений.
6. Для выбора наиболее подходящей методики расчета стоек необходима экспериментальная проверка результатов численных исследований по предложенным методикам.

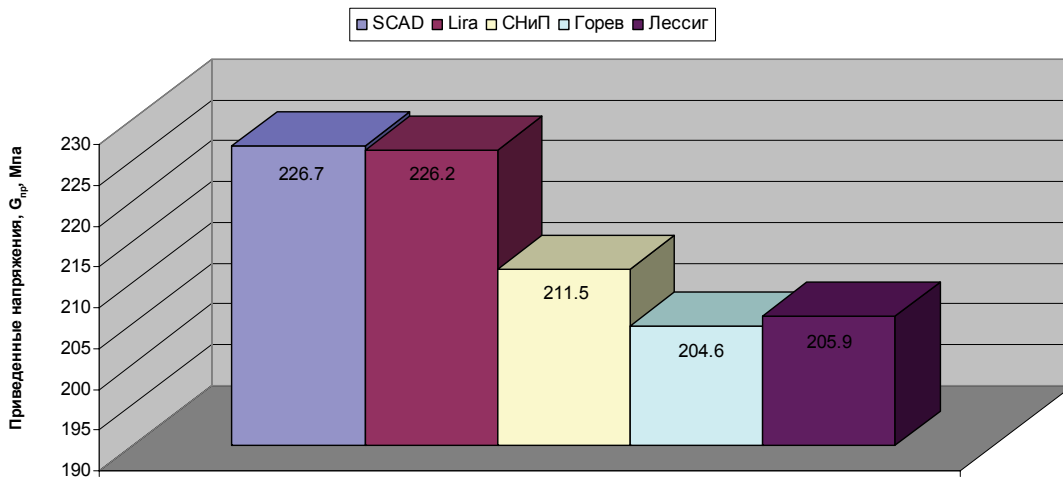


Рисунок 12. Приведенные напряжения в приопорной зоне стойки (от расчетной нагрузки N_p) $\sigma_{пр}$, МПа.

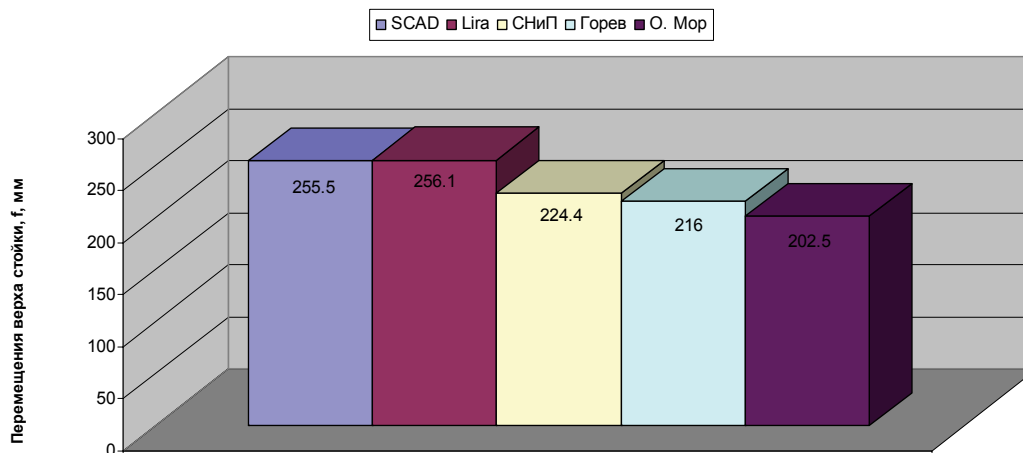


Рисунок 13. Перемещения верха стойки (от расчетной нагрузки N_p) f , мм.

Литература

1. СНиП II-23-81*. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции [Текст]. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 ; введ. 1982–01–01. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
2. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81* окрім розділів 15*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011–12–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
3. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы I международной конференции (Николаевка – Кременец, 2006 г.). Часть I / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2006. – 144 с.
4. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы II международной конференции, (Николаевка, 2007 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2007. – 312 с.
5. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы III международной конференции, (Николаевка, 2008 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2008. – 304 с.
6. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы IV международной конференции, (Николаевка – Кременец, 2009 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2009. – 196 с.
7. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы V международной конференции, (Николаевка – Кременец, 2010 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2010. – 280 с.

References

1. SNiP II-23-81*. Structural Rules and Regulations. Steel structures. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 90 p. (in Russian)
2. DBN V.2.6-163:2010. The constructions of buildings and structures. The steel constructions. Norms for design, fabrication and erection. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 127 p. (in Ukrainian)
3. Many-sided Bent Racks: Proceedings of the 1st International Conference (Nikolayevka – Kremenets, 2006). Part I. Dnepropetrovsk, 2006. 144 p. (in Russian)
4. Many-sided Bent Racks Papers of the 2nd International Conference, (Nikolayevka, 2007). Dnepropetrovsk, 2007. 312 p. (in Russian)
5. Many-sided Bent Racks: Proceedings of the 3rd International Conference, (Nikolayevka, 2008). Dnepropetrovsk, 2008. 304 p. (in Russian)
6. Many-sided Bent Racks: Proceedings of the 4th International Conference, (Nikolayevka – Kremenets, 2009). Dnepropetrovsk, 2009. 196 p. (in Russian)
7. Many-sided Bent Racks: Proceedings of the 5th International Conference, (Nikolayevka – Kremenets, 2010). Dnepropetrovsk, 2010. 280 p. (in Russian)
8. Many-sided Bent Racks: Proceedings of the 6th International Conference, (Nikolayevka – Kremenets, 2011). Dnepropetrovsk, 2011. 154 p. (in Russian)
9. Yoshihiro, N.; Gioki, A.; Tiokiro, Sh. Designing of tubular towers of power transmission line, met requirements of aesthetics. Sverdlovsk, 1978. 32 p. (in Russian)
10. Rules for electrical installation. Text, the part 2.5 «The overhead power transmission lines voltages above 1 kV to 750 kV». Kyiv: GRIFRE, 2006. 125 p. (in Ukrainian)
11. Textbook on design of steel constructions of air power transmission line supports and open distribution

8. Многогранные гнутые стойки [Текст] : материалы VI международной конференции, (Николаевка – Кременец, 2011 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2011. – 154 с.
9. Йошихиро, Н. Проектирование трубчатых опор ЛЭП, отвечающих требованиям эстетики [Текст] / Н. Йошихиро, А. Гиоки, Ш. Тиокиро ; перевод с английского Л. А. Курлаковой. – Свердловск : Азимут С, 1978. – 32 с.
10. Правила улаштування електроустановок [Текст]. Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередавання напругою вище 1 кВ до 750 кВ» / М-во палива та енергетики України. – Офіц. вид. – К. : ГРІФРЕ, 2006. – 125 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
11. Пособие по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи и открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением выше 1кВ (к СНиП II-23-81*) [Текст] / Энергосетьпроект Минэнерго СССР. – М. : Центральный институт типового проектирования, 1989. – 72 с.
12. Элерс, Г. Новый конструктивный принцип [Текст] / Г. Элерс // Складчатые железобетонные конструкции : Сб. статей / Под ред. Я. В. Столярова. – Киев ; Харьков : ГосНТИ Украины, 1934. – С. 3–23.
13. Элерс, Г. Определение напряжений в плоскостных конструкциях [Текст] / Г. Элерс // Складчатые железобетонные конструкции : Сб. статей / Под ред. Я. В. Столярова. – Киев ; Харьков : ГосНТИ Украины, 1934. – С. 24–52.
14. Кремер, Г. Общая теория складчатых конструкций [Текст] / Г. Кремер // Складчатые железобетонные конструкции : Сб. статей / Под ред. Я. В. Столярова. – Киев ; Харьков : ГосНТИ Украины, 1934. – С. 53–70.
15. Craemer, H. Allgemeine Theorie der Faltwerk [Текст] / H. Craemer // Beton u Eisen. 1930. Bd. 29. S. 276.
16. Gruber, E. Berechnung prismatischer Scheibenwerke [Текст] / E. Gruber // Int. Vereinig. Brucken – u Hochbau Abh. 1932. 1. S. 225–228.
17. Tetzlaff, W. Die practischen Berechnungs – vverfahren fur tonen – und trogartigen Schalen [Текст] / W. Tetzlaff // Veb Verlag Techik Konferenz / Beton und Stahlbeton. – Berlin : [s. n.], 1959. – S. 28–32.
18. Пастернак, П. Л. Практический расчет складок и цилиндрических оболочек с учетом изгибающих моментов [Текст] / П. Л. Пастернак // Проект и стандарт. 1983. № 2. С. 24–29.
19. Власов, В. З. Новый призматический метод расчета складчатых покрытий и оболочек [Текст] / В. З. Власов // Строительная промышленность. 1932. № 11–12. С. 15–19.
20. Итцхаки, Д. Расчет призматических и цилиндрических оболочек покрытий [Текст] / Д. Итцхаки. – М. : Госстройиздат, 1960. – 212 с.
21. Бабушкин, В. М. Электрические сети: развитие новые решения [Текст] / В. М. Бабушкин, В. А. Ней- system of electric power substation with electric potential more than 1 kilovolt (SNIП II-23-81*). Moscow: General institute of standard design, 1989. 72 p. (in Russian)
22. Elers, G. Advanced design concept. In: *Folded-plate, concrete structures: Collected works / Edited by Ya. V. Stolyarov*. Kiev; Kharkov: SSTI of Ukraine, 1934, pp. 3–23. (in Russian)
23. Elers, G. Stress calculation of floatworks. In: *Folded-plate, concrete structures: Collected works / Edited by Ya. V. Stolyarov*. Kiev; Kharkov: SSTI of Ukraine, 1934, pp. 24–52. (in Russian)
24. Kremer, G. General theory of folded-plate structures. In: *Folded-plate, concrete structures: Collected works / Edited by Ya. V. Stolyarov*. Kiev; Kharkov: SSTI of Ukraine, 1934, pp. 53–70. (in Russian)
25. Craemer, H. Allgemeine Theorie der Faltwerk. In: *Beton u Eisen*, 1930, Bd. 29, s. 276.
26. Gruber, E. Berechnung prismatischer Scheibenwerke. In: *Int. Vereinig. Brucken – u Hochbau Abh*, 1932, 1, ss. 225–228.
27. Tetzlaff, W. Die practischen Berechnungs – vverfahren fur tonen – und trogartigen Schalen. In: *Veb Verlag Techik Konferenz*, Berlin, 1959, ss. 28–32.
28. Pasternak, P. L. Practical analysis of folded-plate and cylindrical shells taking into account moment of flection. In: *Project and standards*, 1983, No. 2, pp. 24–29. (in Russian)
29. Vlasov, V. Z. Advanced prismatic method of analysis of folded-plate structures and shells. In: *Construction industry*, 1932, No. 11–12, pp. 15–19. (in Russian)
30. Ittshaki, D. Analysis of prismatic and cylindrical shells roof. Moscow: Gosstroyizdat, 1960. 212 p. (in Russian)
31. Babushkin, V. M.; Neiman, V. A.; Chevychelov, V. A. Power network: development of new solutions. Kyiv: Power and electrification, 2001. 117 p. (Series: Power: rehabilitation, development). (in Russian)
32. Andrievskiy, V. N.; Golovanov, A. T.; Zelichenko, A. S.; Edited by Zelichenko, A. S. Operation of overhead transmission lines. Second edition, revised and enlarged. Moscow; Leningrad: Energy, 1966. 624 p. (in Russian)
33. Lessig, E. N.; Lileeva, A. F.; Sokolov, A. G. In sheet form assembled steel sections. Moscow: Publishing house of literature according to civil engineering, 1970. 488 p. (in Russian)
34. Arzhakov, V. G.; Babkin, V. I.; Gorev, V. V. (Ed.). Metal Constructions. Volume 3: Special structure and construction. Moscow: High School, 2002. 544 p. (in Russian)
35. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Calculation models of constructions and the possibility of their analysis. Kyiv: Steel, 2002. 618 p. (in Russian)
36. Barabash, M. S.; Lazniuk, M. V.; Martynova, M. L.; Presniakov, N. I.; Edited by Nilov, A. A. State-of-the art technology of design and engineering of steel and wood constructions. Moscow: Publishing house of Association of Civil Engineering Institutions, 2008. 326 p. (in Russian)

- ман, В. А. Чевычелов. – К. : Энергетика и электрификация, 2001. – 117 с. – (Сер. Энергетика: реабилитация, развитие).
22. Андриевский, В. Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи [Текст] / В. Н. Андриевский, А. Т. Голованов, А. С. Зеличенко ; общ. ред. А. С. Зеличенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. – 624 с.
 23. Лессиг, Е. Н. Листовые металлических конструкции [Текст] / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеева, А. Г. Соколов. – М. : Издательство литературы по строительству, 1970. – 488 с.
 24. Металлические конструкции [Текст] : учеб. для строит. спец. вузов. Т. 3 : Специальные конструкции и сооружения / [В. Г. Аржаков, В. И. Бабкин, В. В. Горев и др.] ; под ред. В. В. Горева. – [2-е издание]. – М. : Высшая школа, 2002. – 544 с.
 25. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 618 с.
 26. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций [Текст] / [М. С. Барабаш, М. В. Лазнюк, М. Л. Мартынова, Н. И. Пресняков] ; под редакцией проф. А. А. Нилова. – М. : Издательство ассоциации строительных вузов, 2008. – 326 с.
 27. Беляев, Н. М. Сопrotивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. – [Издание четырнадцатое]. – М. : Наука, 1965. – 856 с.
 28. Пешль, Т. Сопrotивление материалов [Текст] / Т. Пешль ; перевод с немецкого Г. А. Вольперта. – М. : Гостехтеориздат, 1948. – 380 с.
 29. Интегрированная система анализа конструкций Structure CAD (SCAD) for Windows [Текст] / В. С. Каприловский, Э. З. Крискунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер // САПР и графика. 1998. № 10. С. 15–18.
 30. Бирбер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения [Текст] / И. А. Бирбер, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1990. – 367 с.
 31. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций [Текст] / М-во монтажных и специальных строительных работ СССР, СО Стальсонтаж, ВНИПИ Промстальконструкция [и др.]. – М. : ЦБНТИ, 1989. – 52 с.
 32. Иосилевич, Г. Б. Общий метод расчета фланцевых соединений [Текст] / Г. Б. Иосилевич, С. Т. Ковган, Ю. В. Лукашук // Вестник машиностроения. 1980. № 16. С. 38–46.
 33. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03-85) [Текст] / Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений. – М. : ЦНИИпромзданий, 1990. – 49 с.
 34. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций [Текст] /
 27. Beliaev, N. M. Theory of strength of materials. Fourteenth edition. Moscow: Science, 1965. 856 p. (in Russian)
 28. Peshl, T. Theory of strength of materials. Moscow: Gostehteorizdat, 1948. 380 p. (in Russian)
 29. Kaprilovskiy, V. S.; Kriskunov, E. Z.; Perelmuter, A. V.; Perelmuter, M. A. Integrated system of structural analysis. Structure CAD (SCAD) for Windows. In: *CAD system and graphic art*, 1998, No. 10, pp. 15–18. (in Russian)
 30. Birber, I. A.; Iosilevich, G. B. Tapped and flanged connections. Moscow: Mechanical Engineering, 1990. 367 p. (in Russian)
 31. Guidelines for design, engineering, fabrication and assembly of flanged connections of steel engineering constructions. Moscow: TsBNTI, 1980. 52 p. (in Russian)
 32. Iosilevich, G. B.; Kovgan, S. T.; Lukashchuk, Yu. V. General method of design of flanged connections. In: *Mercury of machine industry*, 1980, No. 16, pp. 38–46. (in Russian)
 33. Textbook of hold-down bolts design for bonding building constructions and equipment (to SNiP 2.09.03-85). Moscow: TsNIIpromzdaniy, 1990. 49 p. (in Russian)
 34. Berezin, M. A.; Katyushin, V. V. Atlas of the aerodynamic characteristics of building structures. Novosibirsk: Olden-Poligraphiya, 2003. 130 p. (in Russian)
 35. Berezin, M. A. Experimental analysis 1980–2002 of aerodynamic characteristics of building structures by the simulation mode at specialised aerodynamic pipe 3 – AT-17.5/3. Moscow: Central Airo-Hydrodynamical Institute, 2003. 112 p. (in Russian)
 36. Bliumina, L. H.; Zaharov, Yu. G. Oscillations of Cylindrical Solids in Wind Flow. In: *Structural Dynamics Analyse / edited by B. G. Korenev*. Moscow: Stroizdat, 1957, pp. 44–60. (in Russian)
 37. Fomin, G. M.; Bliumina, L. H.; Sokolov, A. G.; Besprozvannaya, I. M. The researches problems of aerodynamic and aeroelastic characteristics of high building constructions. In: *Works of the conference in aerodynamics and aeroelasticity of high building structures*. Moscow: Central Airo-Hydrodynamical Institute, 1974, pp. 3–8. (in Russian)
 38. Bychkov, N. M.; Kovalenko, V. M. Aerodynamic Characteristics of Circular Cylinder in Cross Flux. In: *News of the Academy of Sciences of the USSR, Siberian Department. Engineering Sciences*, 1980, No. 8, issue 2, p. 29–44. (in Russian)
 39. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V.; Edited by Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I. Aerodynamics of the power supply structures. Monograph. Donetsk, 2000. 336 p. (in Russian)
 40. Gorokhov, Ye. V.; Kuznetsov, S. G. Experimental methods of determination of wind load on buildings and constructions. Donetsk: Nord-Press, 2009. 168 p. (in Russian)
 41. Gorohov, Ye. V.; Vasylev, V. N.; Kuznetsov, S. G.; Salivon, Yu. I. Fullscale investigation of wind load

- М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : ООО Олден-полиграфия, 2003. – 130 с.
35. Березин, М. А. Экспериментальные исследования 1980–2002 аэродинамических характеристик строительных конструкций методом моделирования в специализированной аэродинамической трубе 3 – АТ-17.5/3 [Текст] / М. А. Березин. – М. : ЦАГИ, 2003. – 112 с.
 36. Блюмина, Л. Х. Колебания цилиндрических тел в ветровом потоке [Текст] / Л. Х. Блюмина, Ю. Г. Захаров // Исследования по динамике сооружений : Сборник статей / Академия строительства и архитектуры СССР, Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций ; под редакцией д-ра техн. наук проф. Б. Г. Коренева. – М. : Стройиздат, 1957. – С. 44–60.
 37. Проблемы исследования аэродинамических и аэроупругих характеристик высоких строительных конструкций [Текст] / Г. М. Фомин, Л. Х. Блюмина, А. Г. Соколов, И. М. Беспрозванная // Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений / Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, ЦНИИ «Проектстальконструкция». – М. : ЦАГИ, 1974. – С. 3–8.
 38. Бычков, Н. М. Аэродинамические характеристики кругового цилиндра в поперечном потоке [Текст] / Н. М. Бычков, В. М. Коваленко // Известия АН СССР, Сибирское отделение. Серия тех. наук. 1980. № 8, вып. 2. С. 29–44.
 39. Аэродинамика электросетевых конструкций [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим] ; под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с.
 40. Горохов, Е. В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения [Текст] / Е. В. Горохов, С. Г. Кузнецов. – Донецк : Норд-Пресс, 2009. – 168 с.
 41. Натурное исследование ветровых нагрузок на высотных сооружениях [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васильев, С. Г. Кузнецов, Ю. И. Саливон // Современные строительные конструкции из металла и древесины : Сб. науч. трудов / Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса : ОГАСА, 2007. – С. 33–38.
 42. Горохов, Е. В. Расчет ветровых нагрузок на конструкции в условиях городской застройки [Текст] / Е. В. Горохов, С. Г. Кузнецов, В. Н. Васильев // Зб. наук. праць Українського наук.-досл. та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського (Київ). 2008. № 1. С. 16–23.
 43. Казакевич, М. И. Вихревое возбуждение аэроупругих колебаний цилиндрического тела произвольного сечения [Текст] / М. И. Казакевич, А. Н. Василенко // Известия АН Литвы. Энергетика. 1991. № 1(15). С. 72–80.
 - on high-rise structures. In: Edited volume «Modern building constructions made of metal and wood», Odessa: Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2007, pp. 33–38. (in Russian)
 42. Gorokhov, Ye. V.; Kuznetsov, S. G.; Vasylev, V. N. Analysis of wind load on constructions under the conditions of urban development. In: *Compendium V. M. Shyman Ukrainian Scientific Research and Design Institute*, 2008, No. 1, pp. 16–23. (in Russian)
 43. Kazakevich, M. I.; Vasilenko, A. N. Vortex excitation of aero elastic vibrations of cylindrical solid of certain cross-section. In: *Proceedings of the Academy of Sciences of Lithuania. Energetics*, 1991, No. 1(15), pp. 72–80. (in Russian)
 44. Krasnov, N. F. Aerodynamics of Bodies of Rotation. Moscow: Mashinostroenie, 1964. 572 p. (in Russian)
 45. Kuznetsov, S. G.; Vasylev, V. N.; Garanzha, I. M.; Lozinsky, E. A. Experimental aerodynamics of sections of polyhedral bent racks. In: *Overhead lines*, 2011, No. 3, pp. 27–33. (in Russian)
 46. Gorokhov, Yevgen; Vasylev, Volodymyr; Kuznetsov, Sergiy; Garanzha, Igor; Lozinsky, Eduard. Experimental aerodynamics of sections of polyhedral bent racks. In: *Metal Constructions*, 2010, Volume 16, Number 4, pp. 251–258. (in Russian)
 47. Kuznetsov, S. G. The role of wind engineering in building and structure design. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2008, Issue 2008–6(74), pp. 120–125. (in Russian)
 48. Kuznetsov, S. G. The numerical modeling of wind loads tall buildings. In: *Scientific articles*, 2008, Issue 22, Volume 1, pp. 168–173. (in Ukrainian)
 49. Savitskiy, G. A. Wind load on structures. Moscow: Stroizdat, 1972. 233 p. (in Russian)
 50. Lugovtsov, A. N. Variations of the type «Wind resonance» of tubular structures. In: *Variation of buildings and structures / Edited by Korenev, B. G.* Moscow: Gosstroizdat, 1963, pp. 111–126. (in Russian)
 51. Simiu, E.; Skanlan, R. Wind Effects on Buildings and Structures. Moscow: Stroizdat, 1984. 360 p. (in Russian)
 52. Cook, N. J. The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification. London: Butterworth-Heinemann, 1990. 383 p.
 53. Dyrbye, C. Wind loads on structures. New York: John Wiley & Sons, 1999. 229 p.
 54. Holmes, J. D. Wind loading of structures. Great Britain: Eastbourne, 2005. 356 p.
 55. Lawson, T. Building aerodynamics. London: Imperial College Press, 2001. 286 p.

44. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика тел вращения [Текст] / Н. Ф. Краснов. – М. : Машиностроение, 1964. – 572 с.
45. Экспериментальные аэродинамические характеристики многогранных гнутых стоек [Текст] / С. Г. Кузнецов, В. Н. Васылев, И. М. Гаранжа, Э. А. Лозинский // Воздушные линии. 2011. № 3. С. 27–33.
46. Экспериментальные аэродинамические характеристики сечений многогранных гнутых стоек [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, С. Г. Кузнецов [и др.] // Металлические конструкции. 2010. Т. 16, № 4. С. 251–258.
47. Кузнецов, С. Г. Роль строительной аэродинамики в проектировании зданий и сооружений [Текст] / С. Г. Кузнецов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2008. Вип. 2008–6(74). С. 120–125.
48. Кузнецов, С. Г. Чисельне моделювання вітрових навантажень висотних будівель [Текст] / С. Г. Кузнецов // Наукові нотатки. 2008. Випуск 22, Том 1. С. 168–173.
49. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения [Текст] / Г. А. Савицкий. – М. : Стройиздат, 1972. – 233 с.
50. Луговцов, А. Н. Колебания типа «ветровой резонанс» цилиндрических конструкций [Текст] / А. Н. Луговцов // Колебания зданий и сооружений / Акад. строительства и архитектуры СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций ; Под ред. д-ра техн. наук проф. Б. Г. Коренева. – М. : Госстройиздат, 1963. – С. 111–126.
51. Симиу, Э. Воздействия ветра на здания и сооружения [Текст] / Э. Симиу, Р. Сканлан ; [перевод с английского Б. Е. Маслова, А. В. Шевцовой] ; под редакцией Б. Е. Маслова. – М. : Стройиздат, 1984. – 360 с.
52. Cook, N. J. The designer's guide to wind loading of building structures [Текст]. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification / N. J. Cook. – London : Butterworth-Heinemann, 1990. – 383 p.
53. Dyrbye, C. Wind loads on structures [Текст] / C. Dyrbye. – New York : John Wiley & Sons, 1999. – 229 p.
54. Holmes, J. D. Wind loading of structures [Текст] / J. D. Holmes. – Great Britain : Eastbourne, 2005. – 356 p.
55. Lawson, T. Building aerodynamics [Текст] / T. Lawson. – London : Imperial College Press, 2001. – 286 p.

Гаранжа Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих, багатограних листових і трубобетонних опор повітряних ліній електропередавання. Створення нових конструктивних рішень опор ПЛ із застосуванням прогресивних технологій і матеріалів.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередачі і антенних опор; вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Лозинський Едуард Олександрович – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри архітектури промислових і цивільних будівель Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток методик оцінки вітрового впливу на будівлі, споруди та їх комплекси, удосконалення методик моделювання натурних і модельних випробувань будівель та споруд на вітрове навантаження.

Гаранжа Софія Віталіївна – магістрант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи і пошук раціональних конструктивних рішень трубобетонних конструкцій з використанням прогресивних матеріалів.

Гаранжа Игорь Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических решетчатых, многогранных листовых и трубобетонных опор воздушных линий электропередачи. Создание новых конструктивных решений опор ВЛ с применением прогрессивных технологий и материалов.

Танасогло Антон Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор, изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Лозинский Эдуард Александрович – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой архитектуры промышленных и гражданских зданий Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие методики оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Гаранжа Софія Віталєвна – магістрант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи і пошук раціональних конструктивних рішень трубобетонних конструкцій з використанням прогресивних матеріалів.

Garanzha Igor – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of the valid work steel lattice, multifaceted and composite supports of overhead power transmission lines. Creation new constructive decisions of OPTL supports with application progressive technologies and materials.

Tanasoglo Anton – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability and optimal designing of overhead power transmission line and antenna support structures. Studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Lozinskyi Eduard – Ph.D. (Eng.), Associate Professor; the Head of the Architecture of Industrial and Civil Buildings Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of method estimation of wind effects on buildings, construction and their complexes, perfection of methods modelling of full-scale and modelling tests of wind loads on buildings and structures.

Garanzha Sofia – master student; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: a studying of a real work of pipe-concrete structures using advanced materials.