

Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни

А.В. Голиков, Е.А. Михальчонок, Ю.А. Мельникова

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В статье рассмотрена работа решетки башни на примере опоры сотовой связи. Выполнен анализ распределения внутренних усилий в элементах решетки башенной опоры в зависимости от типа соединительной решетки, учитывая направление ветровой нагрузки: на грань или на ребро сооружения.

Ключевые слова: опора сотовой связи, стальная башня, решетчатая башня, решетка, пояс, раскос, ветровая нагрузка, внутреннее усилие, напряженно-деформированное состояние, напряжение.

Потребность в возведении башенных опор с каждым днем возрастает, что связано с тенденцией роста городов. Важным аспектом при проектировании любой конструкции является ее рациональность. В случае башенных сооружений это обеспечивается за счет соблюдения оптимальных геометрических параметров конструкции и характеристик сечения. Башня состоит из поясов и соединительной решетки, при этом основная нагрузка воспринимается поясами, решетка воспринимает сдвиг от поперечной силы и обеспечивает совместную работу поясов.

Цель данной работы: проанализировать распределение усилий в элементах башни в зависимости от типа решетки.

Задачи:

1. Провести анализ существующих схем соединительных решеток;
 2. Выполнить серию расчетов башен с различными схемами решеток;
 3. Выявить наиболее неблагоприятные условия работы для каждого типа решетки.
 4. Выполнить сравнение результатов численного расчета с результатами аналитического расчета.
-

Объект исследования: решетчатые башенные опоры сотовой связи призматического очертания.

Предмет исследования: изменение НДС элементов решетчатой башенной опоры при различных конструктивных типах решетки.

Методы исследования: В работе выполнен расчет башенных опор сотовой связи с различным типом решетки, выполнен анализ распределения внутренних усилий в элементах башни. Для получения основных зависимостей использован метод конечных элементов для математического моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов. Для создания линейки моделей для численных экспериментов применялся метод математического планирования экспериментов.

Выделяют шесть схем соединительной решетки: треугольная, треугольная с дополнительными распорками, полураскосная, крестовая, ромбическая и крестоворомбическая. Простая треугольная решетка (рис. 1, а) работает только на поперечную силу. Основной ее недостаток - большая свободная длина пояса в пределах панели. Треугольная решетка с распорками (рис. 1, б) по сравнению с треугольной имеет в 2 раза меньшую свободную длину пояса. Данный тип решетки применяют в конструкциях башен небольшой высоты. При обжатии поясов они могут свободно раздвигаться, поэтому дополнительные напряжения не возникают. При установке распорок, последние, сдерживая раздвижку ветвей, приводят к их изгибу. Аналогичные явления наблюдаются при ромбической решетке. Ромбическая решетка (рис. 1, д) - геометрически изменяемая, что требует установки дополнительных распорок. В крестовой решетке (рис. 1, г) раздвижку ветвей сдерживают распорки, непосредственно связанные с раскосами, поэтому эффект появления дополнительных напряжений здесь проявляется наиболее сильно, но изгиб ветвей не возникает, дополнительные напряжения разгружают пояса, сжимают раскосы и растягивают распорки.

При крестоворомбической решетке (рис. 1, е) пояса разгружаются, распорки растягиваются и сжимаются раскосы, но появится малый изгиб поясов. При этом учитываются только раскосы работающие на растяжение, сжатые выключаются из работы. Незначительный изгиб ветвей и распорок будет наблюдаться при полураскосной решетке (рис. 1, в) [1].

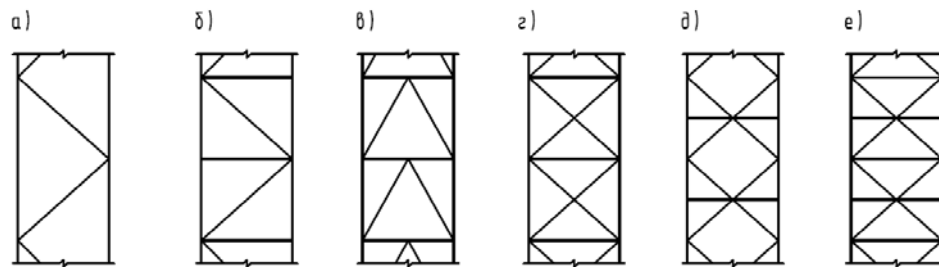


Рис. 1. - Схема решеток:

а - треугольная; б - треугольная с распорками; в - полураскосная;
г - крестовая; д - ромбическая; е - крестоворомбическая

При строительстве башен высотой до 200 м предпочтение отдают крестовой и ромбической решетке. При равных условиях, из опыта проектирования можно сказать, что площадь сечения в раскосах ромбической решетки подбирается на усилие примерно в два раза меньше, чем в раскосах крестовой решетки. Это уменьшает объем металла, приходящегося на решетку. Данное обстоятельство делает ромбическую решетку наиболее рациональной для башенных конструкций данной высоты [2]. Однако границы применимости каждого типа решетки не представлены в литературе.

Исследование в области работы башенных конструкций можно найти в трудах Е.И. Беленя [3], М. Б. Солодаря [4], Н.С. Стрелецкого [5], С.В. Щуцкого, А.В. Черныша, А.С. Болдырева [6], Ю.И. Пимшина, Г.А. Науменко, И.В. Корженевской [7]. В зарубежной практике изучением работы башенных сооружений занимались следующие ученые: М Ravan Kumar, Р.

Markankeya Raju, G Tirupathi Naiku, R. Axisa, M. Muscat, T. Sant, R.N. Farrugia, а также ряд других ученых по всему миру [8-11].

Анализ распределения внутренних усилий рассматривался на примере призматической башенной опоры сотовой связи высотой $H = 42$ м и с шириной основания $b = 2,8$ м. На башню действуют следующие нагрузки: собственный вес конструкции, ветровая нагрузка и технологическая нагрузка: оборудование на отметке $+42,000$ м массой 100 кг и наветренной площадью 3 м^2 ; вдоль ствола башни: шесть веток фидеров диаметром 39 мм каждая и три провода для питания фонарей ЗОМ диаметром 13 мм каждый.

При составлении зависимостей между искомыми параметрами и действующими нагрузками особенности башенной конструкции позволяют заменить дискретную модель (пространственную ферму) (рис. 2, а). на модель с параметрами, непрерывно меняющимися по высоте (стержнем) (рис. 2, б). Таким образом сбор ветровой нагрузки выполнялся как на консольный стержень, жестко защемленный у основания, вычислялись значения внутренних усилий на всех участках. Переход к дискретной модели осуществляется путем деления полученных значений на число расчетных граней (рис. 2, в).

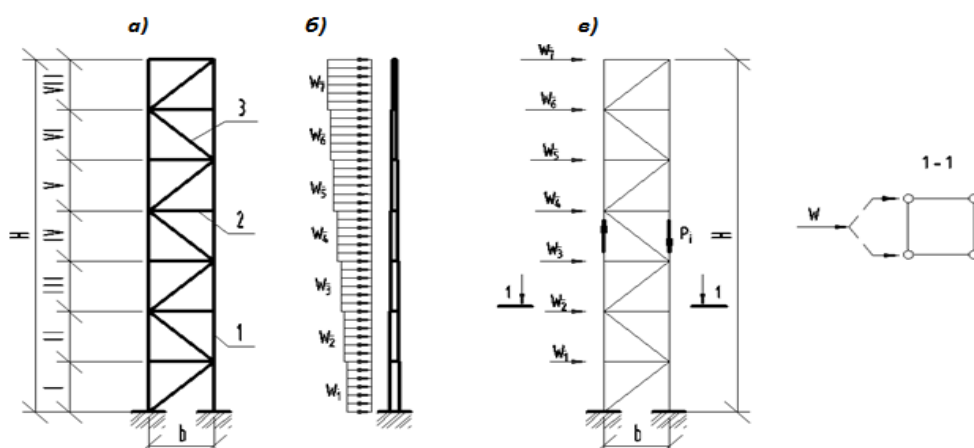


Рис. 2. - Конструктивная схема башни (а), распределение конструктивной нагрузки по ее высоте (б), схема перехода к дискретной модели (в):

1- пояс башни, 2- распорка, 3-решетка башни

Направление ветровой нагрузки для расчета башенных конструкций возможно на грань и на ребро. При этом нельзя точно утверждать, какое направление является наиболее неблагоприятным для конкретного типа решетки.

Был выполнен расчет шести башен с разным типом решетки на два направления ветровой нагрузки. Сбор ветровой нагрузки осуществлялся согласно действующим нормам. Расчет внутренних усилий осуществлялся по формулам, приведенным в таблице №1. Применение данных формул позволяет снизить расхождение усилий компоновочного расчета и полученных в результате расчета в ПК «Лира - САПР». За основу для вывода формул взята существующая методика для определения усилий в элементах башни. Для четырехгранной башни допускается определять нормальные усилия в поясах и раскосах по формулам

$$S_p = -\frac{N}{4\cos\gamma} \pm \frac{M}{b\sqrt{2}\cos\gamma}; \quad (1)$$

$$S_d = \pm \frac{Q}{4\sin\alpha}; \quad (2)$$

где M, N, Q – изгибающий момент, нормальная и поперечная силы; b – размер грани башни в плане; α – угол между раскосами и вертикалью в плоскости грани; γ – угол между раскосами и вертикалью в пространстве.

При этом формула **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) записана для двух рабочих раскосов, расположенных в пределах грани панели [1].

Таблица № 1

Формулы для определения усилий в элементах конструкции в зависимости от типа решетки

Тип решетки	Формулы для определения внутренних усилий при направлении ветра на грань		Формулы для определения внутренних усилий при направлении ветра на ребро	
	S_p	S_d	S_p	S_d
Треугольная	$\frac{M}{2b}$	$\frac{Q}{2sina}$	$\frac{M}{\sqrt{2}b}$	$\frac{Q}{3sina}$
Треугольная с распорками		$\frac{Q}{2sina}$		$\frac{Q}{3sina}$
Полураскосная		$\frac{Q}{4sina}$		$\frac{Q}{6sina}$
Ромбическая		$\frac{Q}{4stna}$		$\frac{Q}{5stna}$
Крестовая		$\frac{Q}{3sina}$		$\frac{Q}{2sina}$
Крестоворомбическая		$\frac{Q}{3sina}$		$\frac{Q}{3sina}$
Примечание: S_p - усилие в поясе башни; S_d - усилие в раскосах башни				

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения внутренних усилий в поясах башенной опоры в зависимости от типа решетки при направлении ветра на грань и ребро соответственно. Сравним усилия на 1 участке (нижний участок башни), так как он работает в более тяжелых условиях, воспринимает вес всей конструкции. Анализируя график, изображенный на рис. 3, видно, что расхождение усилий в поясах незначительно на 1 участке. Однако в сравнении с графиком усилий при направлении ветра на ребро, рис.4, видно, что величина усилий в поясах возросла примерно на 40 %, что

значительно сказывается на увеличении поперечного сечения элементов. Таким образом, можно сказать, что наиболее неблагоприятным условием для работы поясов конструкции башенного типа является направление ветровой нагрузки на ребро.

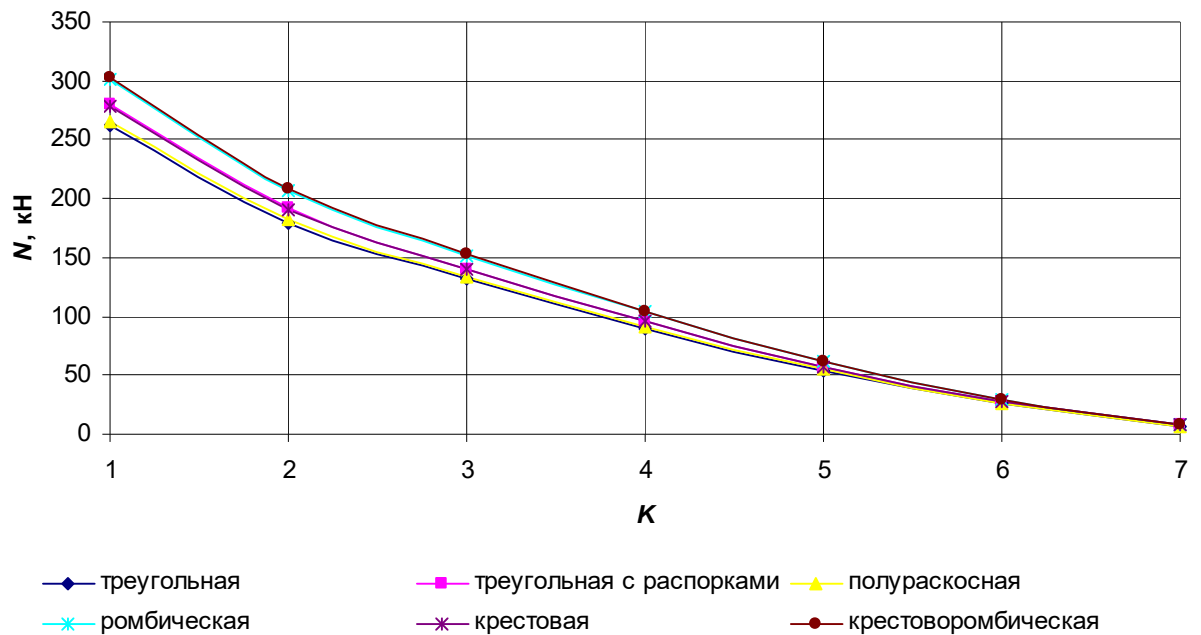


Рис. 3. - График изменения внутренних усилий в поясах башен по высоте в зависимости от типа решетки при направлении ветра на грань, где N - продольное усилие в элементе, кН; K - номер участка по высоте

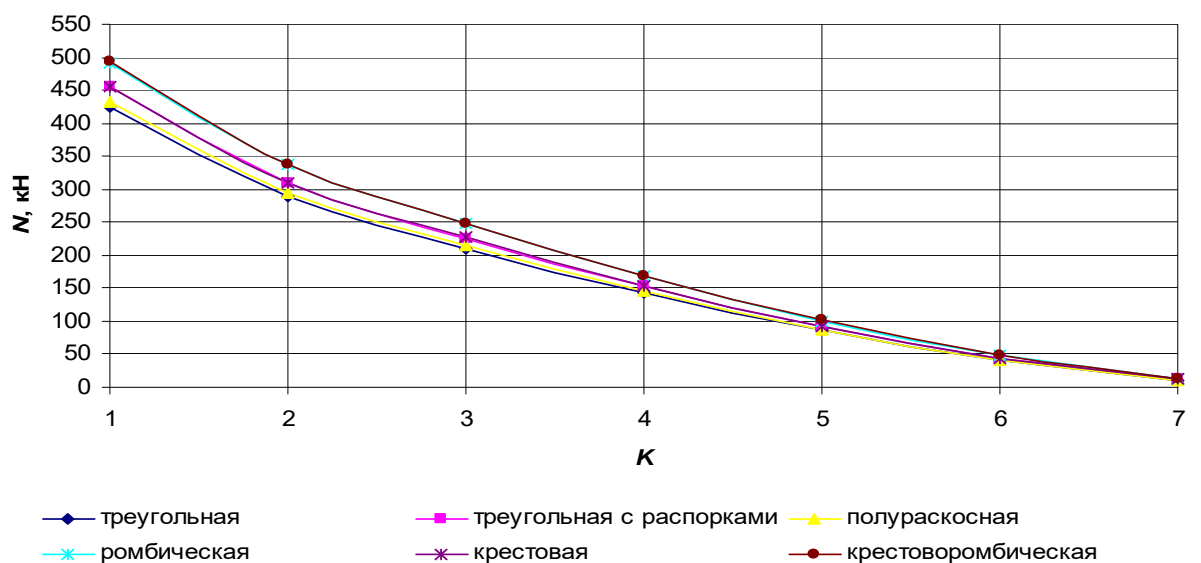


Рис. 4. - График изменения внутренних усилий в поясах башен по высоте в зависимости от типа решетки при направлении ветра на ребро, где N - продольное усилие в элементе, кН; K - номер участка по высоте

На рис.5 и 6 представлены графики изменения внутренних усилий для раскосов в зависимости от типа решетки при направлении ветровой нагрузки на грань и ребро сооружения соответственно.

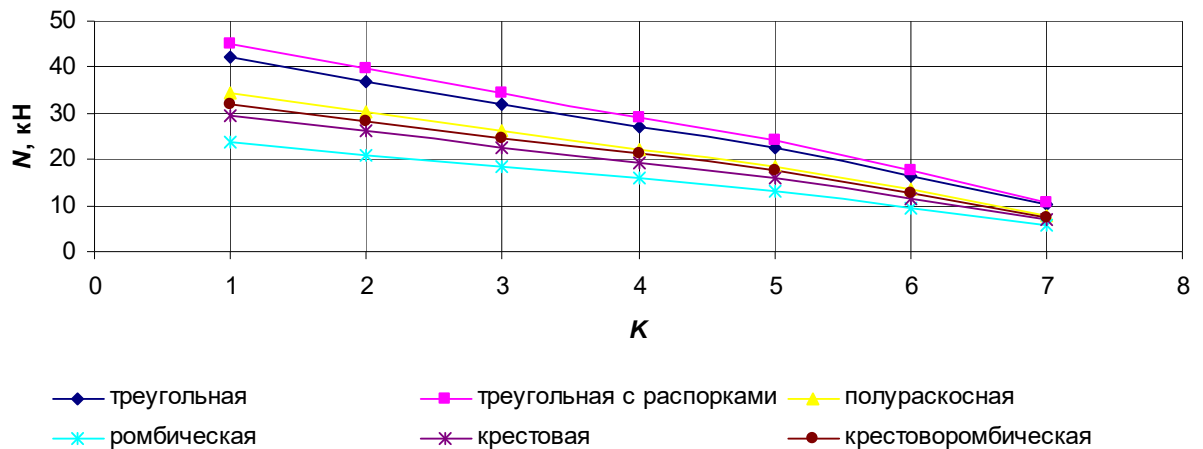


Рис. 5. - График изменения внутренних усилий в раскосах башен по высоте в зависимости от типа решетки при направлении ветра на грань, где N - продольное усилие в элементе, кН; K - номер участка по высоте

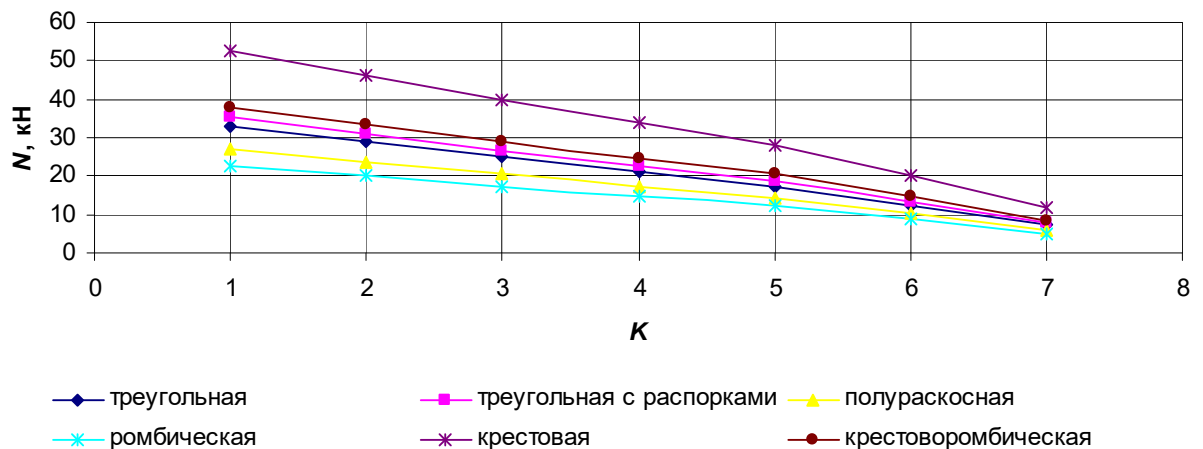


Рис. 6. - График изменения внутренних усилий в раскосах башен по высоте в зависимости от типа решетки при направлении ветра на ребро, где N -

продольное усилие в элементе, кН; K - номер участка по высоте

Из графиков (рис. 5 и 6) видно, что для нижнего участка сооружения (1 участок) происходит увеличение усилий, но не для всех типов решетки. Так для крестовой решетки усилие при направлении ветра на ребро возросло на 44 %. Незначительно увеличилось усилие для крестоворомбической решетки (16%). Для всех остальных решеток при направлении ветра на ребро происходит уменьшение внутренних усилий: для треугольной решетки на 21 %, для треугольной с распорками также на 21 %, для полураскосной усилие уменьшилось на 20 %, для ромбической на 5%. Из этого следует, что для некоторых решеток неблагоприятным будет направление ветра на ребро. Однако для основной массы наихудшим вариантом можно принять направление ветра на грань.

Выводы

1. Получены формулы для расчета внутренних усилий в элементах башни, позволяющие уменьшить расхождения усилий компоновочного расчета и расчета, выполненного в ПК «Лири - САПР».

2. Сравнение полученных усилий в поясах башен при различном направлении ветровой нагрузки показало, что направление ветра на ребро независимо от типа решетки является неблагоприятным для данного элемента, так как усилия в данном случае увеличиваются примерно на 40 %.

3. Анализируя усилия в раскосах башен при различном направлении ветра видно, что направление ветровой нагрузки на ребро неблагоприятно для башен с крестовой и крестоворомбической решеткой, усилия в раскосах увеличиваются соответственно на 44 % и 16 %. Для остальных схем решетки при направлении ветра на ребро происходит уменьшение внутренних усилий в раскосах в отличие от направления на грань.

Литература

1. Горев В.В., Аржаков В.Г., Бабкин В.И., Енджиевский Л.В., Зверев В.В., Казарновский В.С. Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения: Учеб. для строит. вузов. 2-е изд. / Под ред. В.В. Горева. М.: Высш.шк., 2002. С. 86-117.
2. Павловский В.Ф., Кондра М.П. Стальные башни (проектирование и монтаж). / Под ред. Л.И. Шитова. Киев.: Будівельник, 1979. 200 с.
3. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С., Пуховский А.Б., Ведеников Г.С., Уваров Б.Ю. Металлические конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 10-е изд. / Под ред. Ю.И. Кудишина. М.: Издательский центр «Академия», 2007. С. 600-624.
4. Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен / Под ред. Ю.А. Павлова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд.-ние, 1975. 179 с.
5. Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции / Под ред. Н.С. Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1961. С. 709-739.
6. Шуцкий С.В., Черныш А.В., Болдырев А.С. Особенности расчета башни в форме сетчатого гиперboloида // Инженерный вестник Дона, 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5777
7. Пимшин Ю.И., Науменко Г.А., Корженевская И.В. Контроль вертикальности сооружений башенного типа // Инженерный вестник Дона, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3689
8. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wink speek on structural behaviour of monopole ank selfsupport telecommunication // Asian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 18. N 6. Pp. 911 - 927.

9. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi - bladed wind turbine // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8. No 4. Pp. 343-358.

10. Mahesh N., Ranga Rao V. Design and estimation of electric steel tower // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2017. Vol. 8. No 1. Pp. 646-652.

11. Abdulaqder M. Tah, Kamiran M. Alsilevanai, Özakça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers // American Journal of Civil Engineering. 2017. Vol.5 No 2. Pp. 60-68.

References

1. Gorev V.V., Arzhakov V.G., Babkin V.I., Endzhievsky L.V., Zverev V.V., Kazarnovsky V.S. (2002). Metallicheskiye konstruksii. V 3 t. T.3. Spetsial'nyye konstruksii i sooruzheniya: Uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Metal constructions. In 3 t. T.3. Special structures and structures: A textbook for construction universities]. 2nd ed. Gorev V.V. editor. Moscow: Higher school, 2002. p.p. 86 - 117.

2. Pavlovsky V.F., Kondra M.P (1979). Stal'nyye bashni (proyektirovaniye i montazh) [Steel towers (design and installation)]. Shitov. L.I. editor. Kiev: Budivelnik, 1979. 200 p.

3. Kudishin Yu.I., Belenya E.I, Ignatieva V.S, Pukhovsky A.B, Vedenikov GS, Uvarov B.Yu. Metallicheskiye konstruksii: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Metal constructions: a textbook for students of higher educational institutions.]. 10th ed. Kudishin Yu.I. editor. Moscow: Publishing Center "Academy", 2007. p.p. 600-624.

4. Solodar B.B., Kuznetsova M.V., Plishkin Yu.S. Metallicheskiye konstruksii vytyazhnykh bashen [Metal structures of exhaust towers]. Pavlov Yu. A. editor. Leningrad: Stroiizdat Publ., Leningrad Branch, 1975. 179 p.



5. Streletsky N.S., Geniyev A.N., Belenya E.I., Baldin V.A., Lessig E.N. Metallicheskiye konstruktsii [Metal constructions]. Streletsky N. S. editor. Moscow: Stroizdat Publ., 1961. pp. 709-739.
6. Shutsky S.V., Chernysh A.V., Boldyrev A.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5777
7. Pimshin Yu.I., Naumenko G.A., Korzhenevskaya I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus)2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3689
8. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Asian Journal of Civil Engineering. 2017. № 18(6). pp. 911 - 927.
9. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N. International Journal of Energy and Environmental Engineerin. 2017. № 8(4). pp. 343-358.
10. Mahesh N., Ranga Rao V. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2017. № 8(1). pp. 646-652.
11. Abdulaqder M. Tah, Kamiran M. Alsilevanai, Özakça M. American Journal of Civil Engineerin. 2017. № 5(2). pp. 60-68.