

УДК 624.074.5

А. В. Голиков, В. А. Терновой, В. В. Габова

Волгоградский государственный технический университет

МЕТОД УСИЛЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ БАШЕН

Ключевыми задачами развития сотовой связи является покрытие сетями все больших территорий, обеспечение стабильности и высокой скорости передачи данных, а также плановое обслуживание освоенных площадей, максимальное использование безопасного эксплуатационного ресурса возведенных башен связи. В статье рассмотрена работа ствола решетчатой башни сотовой связи с повреждениями и предложена конструкция усиления на основе накопленного опыта с учетом характера влияния дефектов и реализовавшихся повреждений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: усиление, решетчатая башня, сечение, круглая сталь, напряженно-деформированное состояние, жесткость, несущая способность, эффективность.

Цель работы — разработка эффективного конструктивного решения усиления ствола башни для продления безопасного остаточного ресурса.

Задачи, поставленные для достижения цели:

- выполнить анализ повреждаемости конструктивных элементов башен и стволов мачт;
- исследовать работу под нагрузкой примененной конструкции башни при реализации наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок;
- провести анализ опыта усиления сооружений данного типа;
- предложить и расчетно-аналитическим путем обосновать эффективный метод усиления.

Объект исследования — несущий ствол антенной башни бутылочного очертания с элементами решетки, выполненными из круглой стали.

Методы. Использован метод конечных элементов для численного моделирования пространственной схемы решетчатой башни с использованием программно-вычислительных комплексов. Для создания линейки численных моделей применялся метод математического планирования экспериментов.

Предмет исследования — характер изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) решетчатой конструкции усиливаемого ствола башни.

Характеристика конструктивных решений

Башня предназначена для размещения оборудования операторов сотовой связи. Основное оборудование размещено на верхних отметках сооружения. Конструктивно башня разделена на три участка по высоте: верхняя часть ствола представляет собой четырехгранную призму шириной $b = 0,7$ м, центральная часть — усеченную пирамиду, опорная — восьмигранную призму шириной $b = 2,276$ м. Общая высота башни составляет $H = 39,32$ м (рис. 1).

Пояса и решетка башни выполнены сечением из круглой калиброванной стали по ГОСТ 7417-75. Тип решетки — треугольная. Сечения элементов по участкам показаны на расчетной схеме.

Сопряжение поясов отдельных секций предусмотрено на двух шпильках диаметрами 16 мм и 20 мм.

Сопряжение полусекций нижней призматической части предусмотрено с применением уголка $2 \angle 40 \times 4$.

Сопряжение элементов решетки с поясами предусмотрено на сварке.



Рис. 1. Объект исследования. Башня $H = 39,32$ м: *a* — общий вид; *б* — фрагмент

Принятая конструктивная схема башни решает одну из ключевых задач создания эффективных высотных решетчатых башен — снижает ветровую нагрузку за счет применения круглых сечений малой наветренной ширины, о чем развернуто написано в классической литературе по проектированию высотных сооружений [1—3]. Применение многогранных башен также относится к достоинствам принятого конструктивного решения.

Параллельно с достоинствами круглых сечений проявляется их существенный недостаток: круглые сечения хороши при работе на растяжение, но плохо работают в качестве сжатых стержней пространственных ферм. Следует отметить, что сложны в исполнении узлы сопряжения элементов, выполненных из круглой стали. Наиболее эффективным типом решетки башен, в котором можно применить круглую сталь, является решетка крестового типа. Подробно вопросы работы башен под нагрузкой и оценка влияния различных типов решетки на работу башен рассмотрены в ряде работ [1, 4—6]. Оптимизация формы многогранных решетчатых башен выполнена в работе А. Khokakaki, P. von Buelow [7]. Эффективность применения опор с узкой базой обоснована в работе Ю. В. Краснощекова [8].

Изучение и совершенствование конструктивной формы башенных конструкций активно продолжается в трудах ряда ученых. Результаты изучения работы решетчатых пространственных металлических конструкций представлены в статье И. С. Холопова [9], башенных сооружений комбинированного типа — в работе А. Ю. Чаускина [10]. Изучение работы вантовых систем представлено в работе А. В. Чеснокова [11] и в исследованиях М. Grey [12].

В конструктивном исполнении решетчатая башня представляет собой пространственную ферму. Работа ферм с изменяющейся в процессе эксплуатации расчетной схемой представлена в статье Г. В. Воронковой [13].

Характер реализовавшихся повреждений

Развитие отдельных повреждений в несущих строительных конструкциях вызвано применением ряда ошибочных конструктивных решений.

Например, для сборки многогранных секций нижних ярусов башни применены стыковые элементы отпавочных марок, выполненные из одиночных уголков. При сборке уголки соединяются между собой при помощи болтов, образуя тавровое сечение. Стержни таврового сечения, выполненные из двух уголков, плохо работают на центральное сжатие. В процессе эксплуатации между двумя гранями монтажных уголков, соединенных без применения планок, возникает щелевая коррозия, которая приводит к уменьшению расчетного сечения и, как следствие, к возникновению дополнительных искривлений в стержнях.

Для понимания влияния повреждений на работу стволов высотных сооружений следует обратить внимание на работы ряда ученых, специализирующихся на исследованиях в данной области. Вопросы повреждаемости и обеспечения долговечности решетчатых башен подробно представлены в работах В. В. Губанова [14]. Наиболее полный обзор повреждаемости решетчатых стволов высотных сооружений представлен в работе О. Н. Закурдаевой [15].

Работы по систематизации и обобщению повреждений в строительных конструкциях продолжаются в трудах таких авторов, как М. Р. Бельский, И. С. Ребров [16, 17], С. А. Ницета, С. Г. Деркач, И. И. Федотенкова [18, 19].

По результатам обследования выявлены дефекты и повреждения элементов башни, снижающие несущую способность ствола сооружения в целом и ее отдельных конструктивных элементов (табл. 1).

Наиболее характерные повреждения башни приведены на рис. 2—4.

Отмеченные дефекты и повреждения учтены при выполнении проверочного расчета ствола башни и его отдельных элементов.



Рис. 2. Искривление граней третьей секции стрелкой до 50 мм

Таблица 1

Характеристика развития повреждений башни

Конструктивная часть	Повреждение	Диапазон изменения
Верхняя призматическая часть	Искривление отдельных элементов поясов	Стрелка 10...15 мм
	Искривление отдельных элементов решетки	Стрелка 10...20 мм
Средняя пирамидальная часть	Изгиб поясов верхней секции	Стрелка до 20 мм
	Искривление отдельных элементов решетки	Стрелка до 10 мм
Нижняя призматическая часть	Общее искривление поясов 4-й секции	Стрелка до 35 мм
	Общее искривление поясов 2-й секции	Стрелка до 20 мм
	Смещение дополнительных граней соседних секций относительно друг друга	Зазор до 30 мм
	Местная потеря устойчивости монтажных уголков, искривление между точками закрепления	Стрелка до 20 мм
	Искривление элементов решетки отдельных граней 4-й и 2-й секций	Стрелка 10...30 мм
	Крен ствола башни	До 120 мм
	Ослабление натяжения шпилек в отдельных соединениях	—

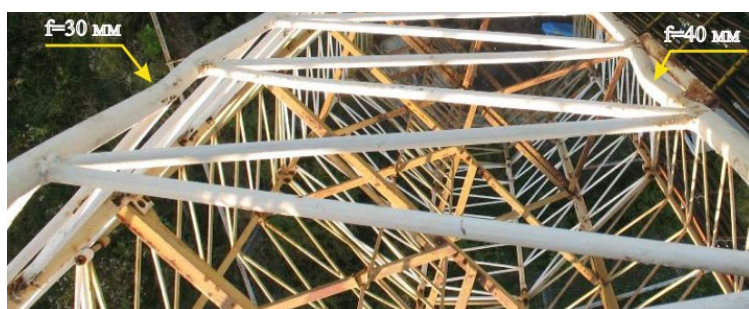


Рис. 3. Характер искривления поясов

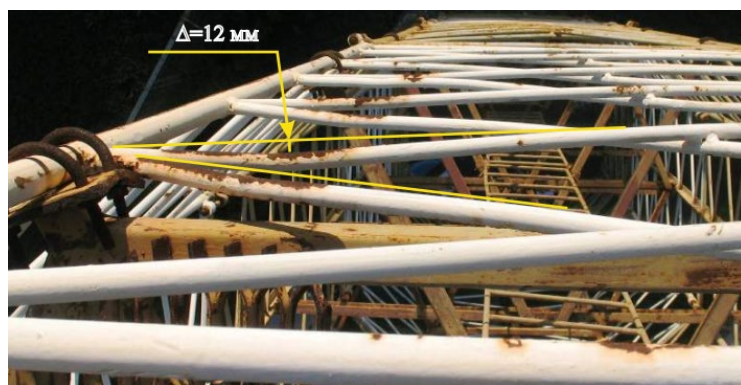


Рис. 4. Искривление элементов решетки

В ходе работы рассчитаны ветровая нагрузка и ветровая нагрузка при гололеде с учетом веса гололеда по двум расчетным направлениям. Определено соотношение между расчетными значениями ветровой и гололедно-ветровой нагрузками (рис. 5). Анализ графиков на рис. 5 показал, что для рассматриваемого сооружения решающим расчетным воздействием является воздействие ветра. Расчетная схема башни представлена на рис. 6.

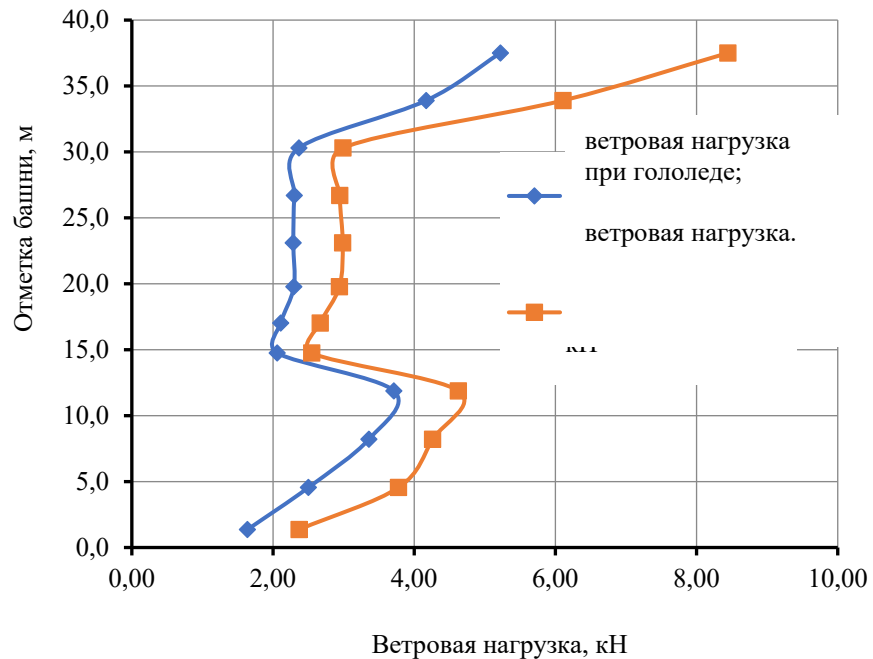


Рис. 5. Соотношение между значениями расчетной ветровой нагрузки и расчетной ветровой нагрузки при гололеде по высоте башни

Для оценки резервов жесткости и несущей способности сооружения выполнен поверочный расчет. Проверена несущая способность башни и элементов ствола с учетом имеющихся повреждений и дефектов. Выявлено превышение напряжений с учетом повреждений на 17 % относительно расчетного сопротивления стали. Расчетным путем подтверждена потеря устойчивости отдельных поясов и элементов решетки. Результаты проверки элементов ствола башни сведены в табл. 2.

Анализ методов усиления стальных конструкций

Решетчатая башня по характеру работы представляет собой пространственную ферму. При работе стержни фермы испытывают одноосное напряженно-деформированное состояние.

Применяемые методы усиления элементов стальных конструкций:

- увеличение сечений;
- изменение расчетной схемы;
- установка новых предварительно напряженных элементов.

Усиление металлических конструкций увеличением их поперечного сечения является наиболее часто применяемым способом усиления. Следует

стремиться увеличивать не площадь сечения стержня, а его жесткость. Применительно к центрально-сжатым стержням эффективным усилением должно быть усиление, увеличивающее момент инерции стержня. Усиление сжатых стержней симметричного сечения необходимо проектировать симметричным. Несимметричное усиление дает смещение центра тяжести сечения, которое может также совпадать с направлением случайного эксцентриситета. При таком усилении стержень становится внецентренно нагруженным, и при работе параллельно с продольной силой появляется изгибающий момент, что существенно снижает несущую способность.

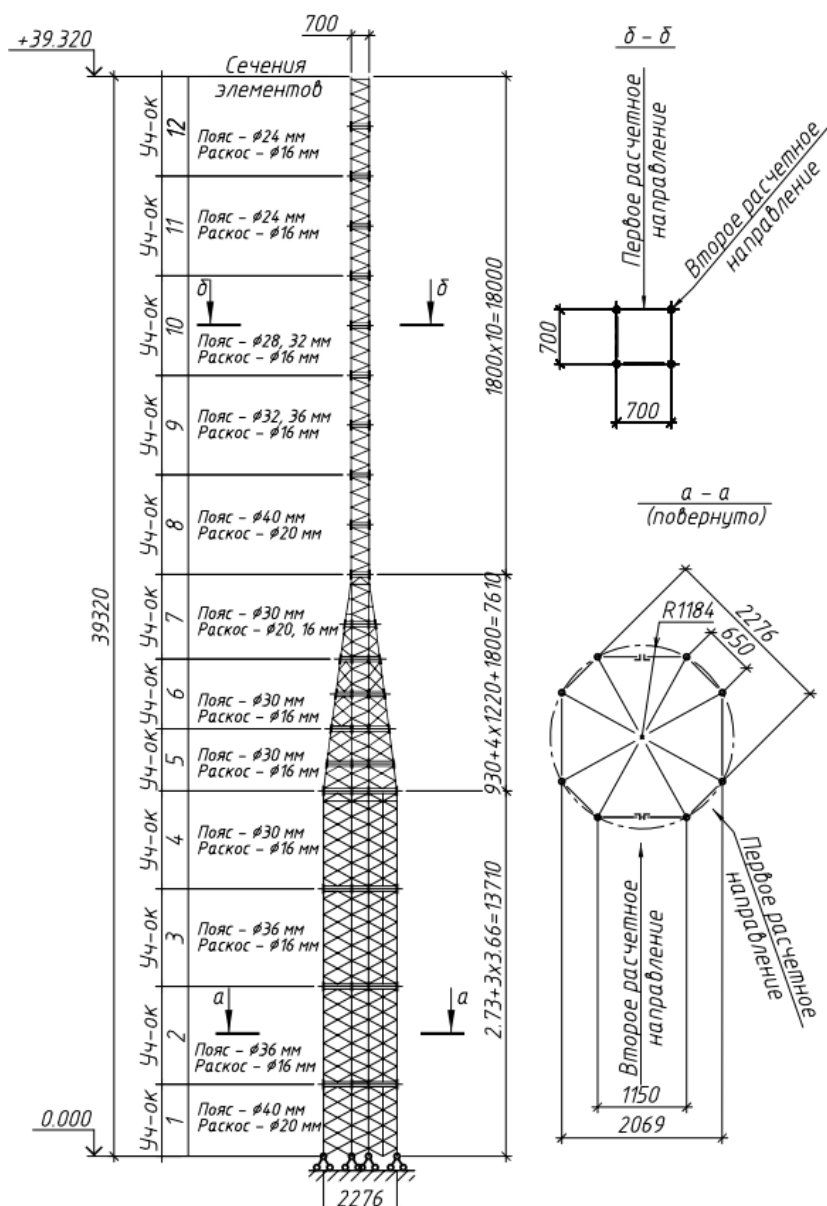


Рис. 6. Расчетная схема башни

Проверка несущей способности элементов ствола башни

№ яруса	Группа констр.	Расчетное усилие, тс	Диаметр трубы, мм	Длина, см	Гибкость	Коэффициент продольного изгиба	Напряжение (вес. + вет.), кг/см ²
11	Пояса	-3,50	24	58	97	0,578	1339
11	Пояса	-6,01	24	58	97	0,578	2295
10		-12,10	32	58	73	0,738	2040
9		-19,38	36	58	64	0,780	2441
8		-27,76	40	58	58	0,812	2719
7		-14,56	30	58	77	0,714	2886
5		-10,01	30	60	80	0,694	2041
4		-10,92	30	60	80	0,694	2227
2		-16,56	36	60	66	0,771	2138
1		-19,66	40	60	60	0,802	1949
9		Раскосы основ.	-0,82	16	76	190	0,196
8	-1,02		20	76	152	0,298	1090
7	-0,70		16	72	180	0,217	1610
5	-0,36		16	72	180	0,217	836
4	-0,59		16	72	180	0,217	1359
2	-0,70		16	72	180	0,217	1610
1	-0,50		20	72	144	0,330	483
7	Раскосы доп.		-0,11	16	50	125	0,419
6		0,15	16	95	238	0,130	77
5		0,10	16	130	325	0,074	50
4		0,83	16	130	325	0,074	412
3		0,91	16	130	325	0,074	453
2		1,00	16	130	325	0,074	498
1		1,05	20	130	260	0,110	333

Усиление путем увеличения поперечного сечения стержней, выполненных из круглой стали, неизбежно приведет к увеличению аэродинамического коэффициента и, как следствие, к возрастанию ветрового давления.

При конструировании усиления сварные швы и болтовые соединения необходимо располагать в удобных для исполнения и контроля качества местах. Кроме того, при сварных соединениях следует учитывать появление дополнительных и остаточных сварочных деформаций.

Метод усиления путем изменения конструктивной схемы является более сложным в исполнении. Этот способ направлен на перераспределение усилий и напряжений по длине усиливаемого стержня. Усиление путем уменьшения расчетной длины достигается путем постановки дополнительных связей и распорок (рис. 7).

В высотных сооружениях, нуждающихся в усилении, возможна постановка дополнительных оттяжек, которые будут выполнять функцию дополнительных упругих опор. Такого же эффекта можно достичь устройством пространственных шпренгельных систем с предварительно напряженными шпренгелями (рис. 8).

Работы ученых по поиску эффективных методов усиления продолжают-ся. В. Д. Колесниковым предложены методы усиления путем уменьшения расчетной длины [20]. Ведутся экспериментальные исследования [21].

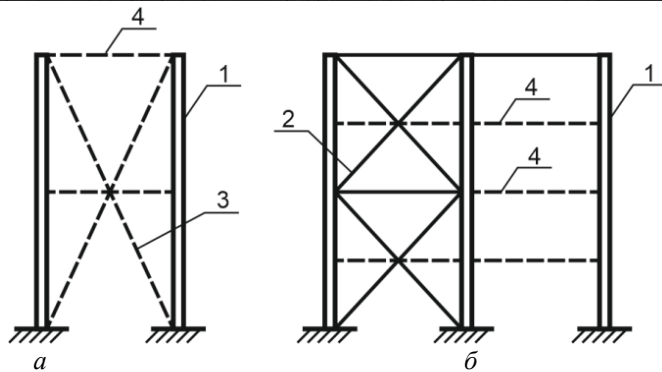


Рис. 7. Схемы усиления поясов: 1 — существующие пояса; 2 — существующие связи; 3 — дополнительные связи; 4 — распорки

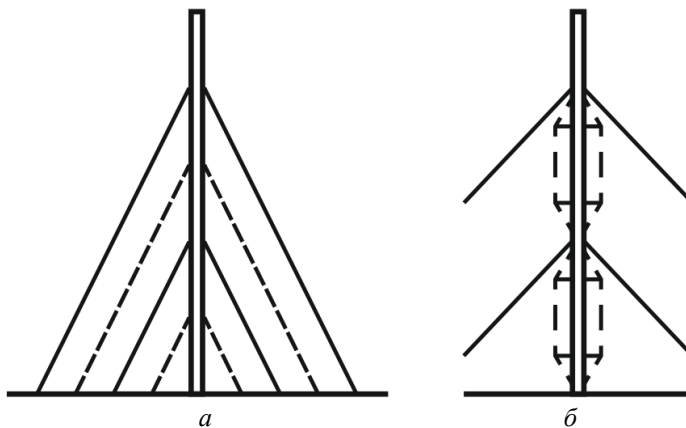


Рис. 8. Уменьшение расчетной длины стволов высотных сооружений: а — постановкой дополнительных оттяжек; б — устройством пространственных шпренгелей

В последние годы при проектировании новых сооружений связи в практике строительства применение получила конструкция башен, изображенная на рис. 9. Данная конструктивная форма башен предполагает создание предварительно напряженной мачтовой системы на нижней опорной части.

Учеными УкрНИИпроектстальконструкция в конце 80-х — начале 90-х гг. прошлого столетия разработана башня РПС¹, $H = 240$ м для установки в III ветровом районе.

Данная конструктивная схема была взята в качестве прототипа и применена в качестве основного способа усиления поврежденной конструкции по следующим причинам:

- усиление верхней части башни путем подведения дополнительных опор-оттяжек не приводит к значимому увеличению наветренной площади, а значит, не приводит к существенному увеличению ветрового воздействия;
- отсутствует необходимость устройства анкерных фундаментов для закрепления оттяжек;

¹ Серия 3.603.2-15. Унифицированные металлические элементы башенных опор с номинальной длиной пояса 10 м.

- конструкция усиления обладает относительно малыми размерами в плане;
- возможность усиления надземной части без усиления фундаментов;
- суммарный вес элементов усиления минимален.

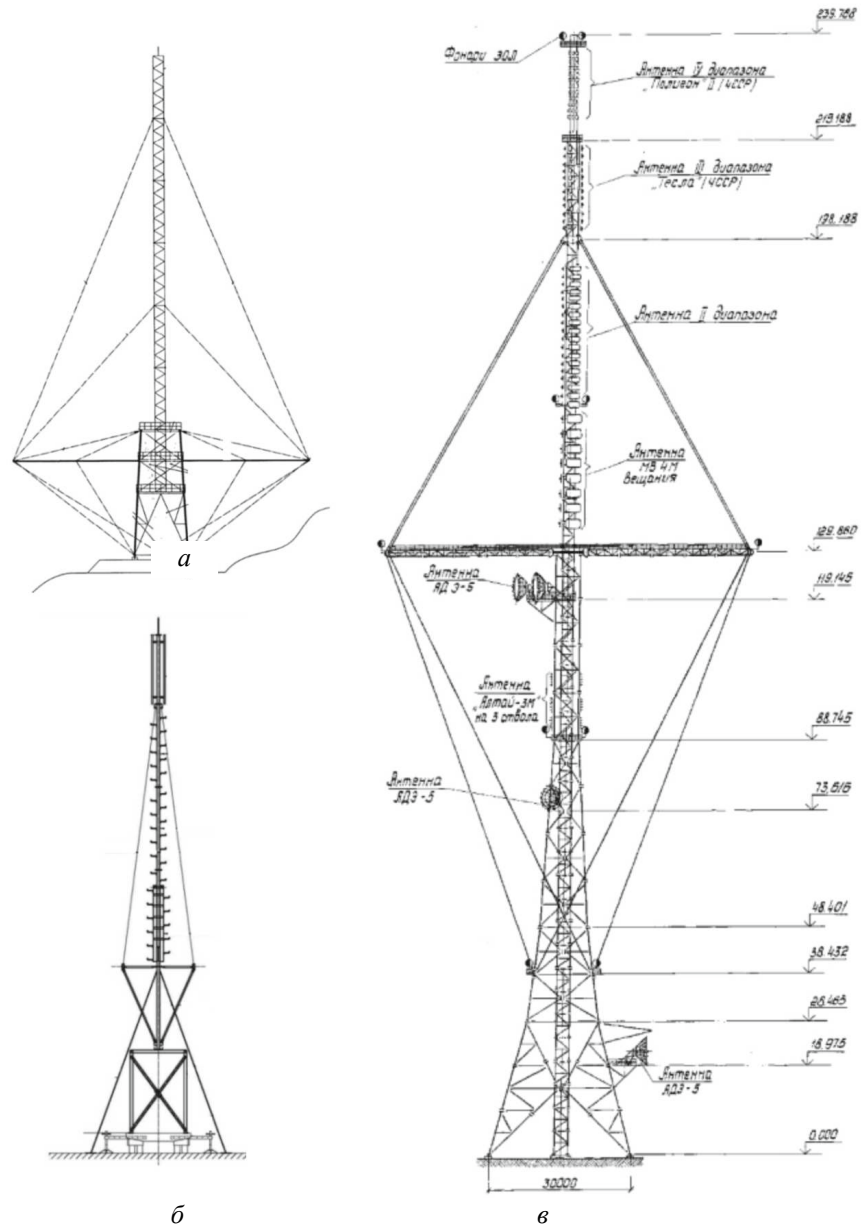


Рис. 9. Схема башен-мачт: а — шпренгельная башня-мачта [22]; б — передвижная станция связи; в — башня РПС, $H = 240$ м

На основании результатов расчета и проверки элементов конструкций, а также анализа имеющихся дефектов и повреждений с учетом критериев рациональности и оптимальной металлоемкости было принято и разработано

решение по усилению ствола башни, разработаны узлы конструкции, выполнено моделирование и расчет башни с учетом усиления.

Конструкция усиления представляет собой мачту с натяжением верхней призматической части ствола башни оттяжками на нижний призматический участок. Дополнительно предусмотрено усиление нижней, опорной призматической части башни путем установки дополнительных поясов и элементов решетки (рис. 10).

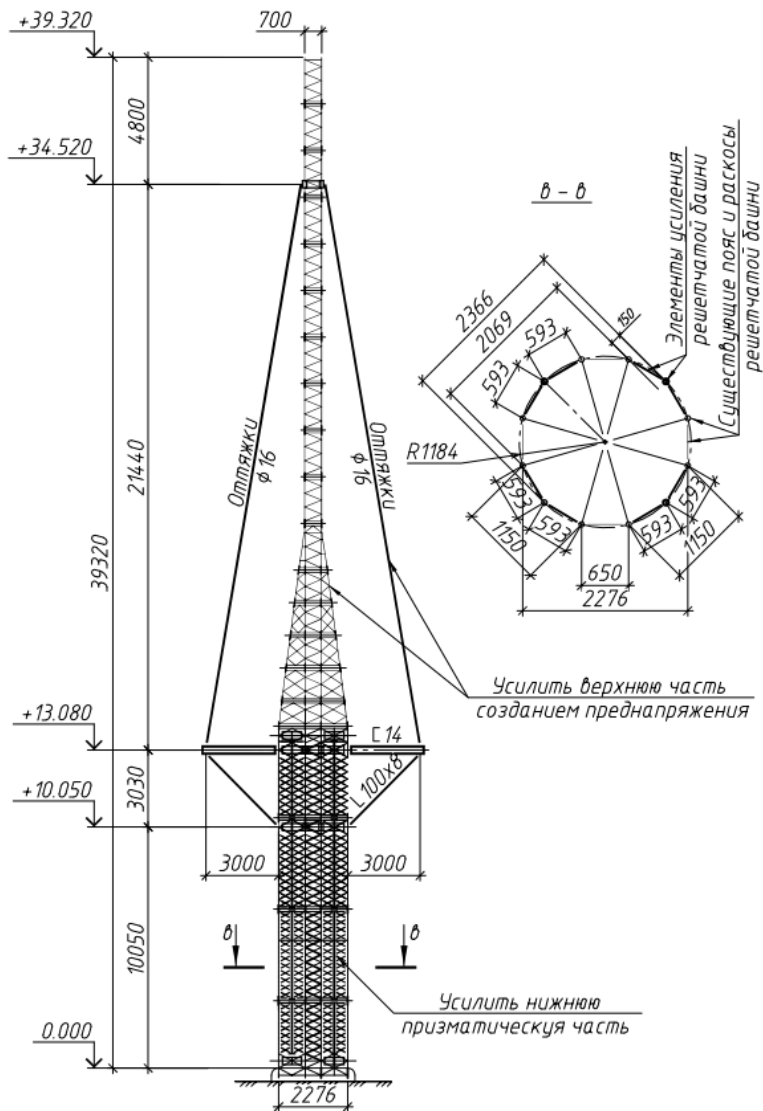


Рис. 10. Схема усиления башни

Проверена несущая способность башни с учетом усиления. Результаты проверки элементов ствола башни сведены в табл. 3. Результатом усиления стало уменьшение напряжений в поясах ствола башни и возможность продлить безопасный остаточный ресурс эксплуатации сооружения.

Таблица 3

*Проверка несущей способности элементов ствола башни
с учетом выполнения мероприятий по усилению*

№ яруса	Отм.	Группа констр.	Расчетное усилие, тс	Диаметр трубы, мм	Длина, см	Гибкость	Коэффициент продольного изгиба	Напряжение (вес. + вет.), кг/см ²
11	Верх	Пояса	-3,50	24	58	97	0,578	1339
11	Низ	Пояса основ.	-4,00	24	58	97	0,578	1529
10			-6,10	32	58	73	0,738	1028
9			-9,70	36	58	64	0,780	1222
8			-14,90	40	58	58	0,812	1460
7			-7,50	30	58	77	0,714	1487
5			-7,00	30	60	80	0,694	1427
4			-6,20	30	60	80	0,694	1264
2			-12,80	36	60	66	0,771	1652
1			-23,50	40	40	40	0,892	2095
4			Пояса доп.	Пояса доп.	-8,40	57	60	32
2	-14,60	57			60	33	0,919	1652
1	-15,80	57			40	22	0,956	1719
9	Раскосы основ.	Раскосы основ.	-0,44	16	76	190	0,196	1118
8			-0,70	20	76	152	0,298	749
7			-0,34	16	72	180	0,217	781
5			-0,25	16	72	180	0,217	574
4			1,40	16	72	180	0,217	696
2			0,77	16	72	180	0,217	383
1			1,00	20	72	144	0,330	318
7			Раскосы доп.	Раскосы доп.	-0,11	16	50	125
6	-0,18	16			95	238	0,130	690
5	-0,25	16			130	325	0,074	1678
4	2,30	16			130	322	0,075	1162
3	1,00	16			130	322	0,075	505
2	1,26	16			130	315	0,078	668
1	2,40	16			130	315	0,078	1273

В результате проведенных работ по оценке технического состояния, расчета башни с повреждениями и с элементами усиления разработан проект усиления башни исследуемой конструкции. Общий вид конструкций усиления приведен на рис. 11.

Изучение работы башенных сооружений и совершенствование их конструктивной формы продолжают в работах современных ученых. Вопросы оптимизации решетчатых телекоммуникационных башен для проектирования с учетом эксплуатационных характеристик занимается группа ученых из Лидского университета во главе с К. D. Tsavdaridis [23]. Вопросами усталостной долговечности элементов антенно-мачтовых сооружений занимается группа ученых ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова» [24]. Применение накопленного отечественного опыта при проектировании высотных сооружений отражено в публикации студентов и сотрудников ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“» [25]. Изучению работы фланцевых соединений поясов стальных башен посвящена работа Б. Б. Лампси и Ю. Д. Маркина [26]. Совершенствованию конструктивной формы решетчатых конструкций посвящены исследования ученых технических университетов Казани [27, 28] и ученых Донбасса [29].

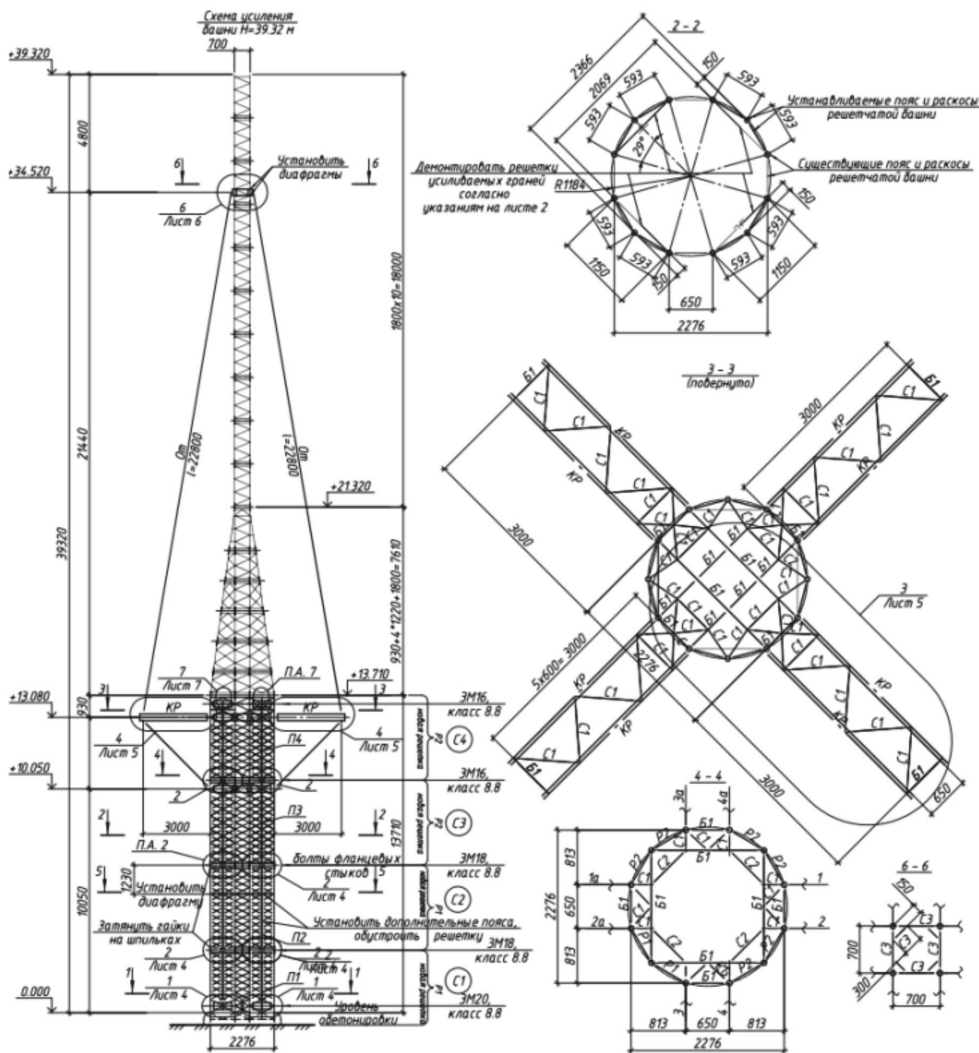


Рис. 11. Фрагмент проекта усиления башни

Большая часть современных исследований посвящена изучению работы башенных опор объектов энергетики. Изучению работы под нагрузкой опор линий электропередач посвящены работы М. Т. Abdulaqder [6], N. Mahesh [30]. Совершенствование конструкций опор ветроэнергетических установок выполняется в работах Amlan Das, Shiva Kumar [31], M. R. Shah Mohammadi [32]. Оценке надежности эксплуатируемых решетчатых башен связи посвящены работы J. Szafran, M. Kamiński, K. Juszczak [33, 34].

Выводы

1. Разработано эффективное конструктивное решение усиления ствола башни в виде предварительно напряженной вантовой системы, обустроенной на нижней призматической части башни.
2. Проанализированы и систематизированы повреждения и дефекты, выявленные при обследовании сооружения, оценено их влияние на несущую способность конструкций.

3. Исследована работа конструкции башни без усиления с учетом имеющихся повреждений и дефектов. Напряжения с учетом повреждений превышают на 17 % расчетное сопротивление стали.

4. Метод усиления увеличением сечений элементов верхней части признан нерациональным по двум причинам: происходит увеличение аэродинамического коэффициента и увеличение наветренной площади. Исходя из этого, было принято решение об усилении ствола башни оттяжками и креплении их к опорной части на обустраиваемые кронштейны.

5. Предложенная конструкция усиления снижает расчетные усилия в элементах ствола на участках с истощением несущей способности и снижает деформации верха башни. Принятый способ усиления позволил обеспечить несущую способность и устойчивость, является рациональным и обеспечивает минимальную металлоемкость, позволил продлить безопасный остаточный ресурс сооружения, исключить дальнейшее развитие повреждений несущих конструкций ствола башни от влияния наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников Н. П. Антенные сооружения (башни, мачты, радиотелескопы). М. : Знание, 1969. 49 с.
2. Савицкий Г. А. Антенно-мачтовые сооружения. М. : Гос. изд-во по вопросам связи и радио, 1962. 232 с.
3. Соколов А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование). М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1961. 171 с.
4. Голиков А. В., Михальчонок Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. : Инженер. исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 163—173. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173.
5. Голиков А. В., Михальчонок Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженер. вестн. Дона. 2019. № 4(55). С. 53.
6. 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.
7. Khokakaki A., Von Buelow P. Form exploration and GA-based optimization of lattice towers comparing with Shukhov water tower // Shells, Membranes and Spatial Structures. Footprints : IASS 2014 Brasilia Symposium, Sept. 15—19, Brasilia, Brazil. 2014. Pp. 1—8.
8. Краснощеков Ю. В. Эффективность антенных опор, возводимых на ограниченной площади // Вестн. СибАДИ. 2012. № 5(27). С. 60—65.
9. Холопов И. С., Бальзанников М. И., Алтатов В. Ю. Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2012. № 28(47). С. 225—232.
10. Чаускин А. Ю., Старов А. В., Карасев Г. М. Расчет и конструирование башенных сооружений комбинированного типа // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2013. № 32(51). С. 49—54.
11. Чесноков А. В., Михайлов В. В., Долматов И. В. Численный алгоритм определения жесткостных параметров и величины предварительного напряжения вантовой конструкции покрытия // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2018. № 52(71). С. 61—70.
12. Grey M. Finite Element Seismic Analysis of Guyed Masts. St. Cross College, 2006. 152 p.
13. Воронкова Г. В., Гурова Е. В., Карасев Г. М. Особенности реконструкции ферм покрытия с изменением расчетной схемы в условиях действующего предприятия // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2017. № 48(67). С. 27—37.
14. Губанов В. В. Обеспечение долговечности решетчатых башен : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Макеевка, 1995. 24 с.

15. *Закурдаева О. Н., Голиков А. В.* Повреждаемость антенно-мачтовых сооружений соотной связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 4(67). С. 72—85. DOI: 10.18720/CUBS.67.6.
16. *Бельский М. Р.* Усиление сжатых стержней стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой. М. : Стройиздат, 1984. 152 с.
17. *Ребров И. С.* Усиление стержневых металлических конструкций: проектирование и расчет. Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 299 с.
18. *Ницета С. А., Марков К. В.* Причины повреждаемости стальных конструкций открытых крановых эстакад // Архитектура. Строительство. Образование. 2019. № 2(14). С. 25—30. DOI: 10.18503/2309-7434-2019-2(14)-25-30.
19. Повреждаемость несущих металлических конструкций покрытий производственных зданий и сооружений / С. Г. Деркач, И. И. Федотенкова, А. И. Пашечко и др. // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 10. С. 78—79.
20. *Колесников В. Д.* Методы усиления металлических конструкций уменьшением расчетной длины сжатых элементов // Молодой ученый. 2020. № 21(311). С. 503—510. URL: <https://moluch.ru/archive/311/70417>.
21. *Ефименко Э. Р., Степанов Н. К., Родионов И. И.* Об экспериментальном исследовании работы стержней с местными погибами уголков, усиливаемых с применением сварки // Новые задачи технических наук и пути их решения : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Самара, 13 мая 2017 г. Самара : Аэтерна, 2017. С. 213—215.
22. Шпренгельная башня-мачта : евразийский пат. № 007168, Int. Cl. E04H 12/08 (2006.01) / А. И. Цыганок (BY); заявл. 16.06.2004; опубл. 25.08.2006.
23. *Tsavdaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D., Efthymiou E.* Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads // Structures. 2020. Vol. 27. Pp. 2379—2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
24. *Евдокимов В. В., Шеляпина Г. Р.* Расчетная оценка усталостной долговечности элементов металлоконструкций антенно-мачтовых сооружений // Пром. и гражд. стр-во. 2020. № 10. С. 55—59. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.55-59.
25. *Попова Ю. А., Акимова Э. К., Рацеккина С. А.* О проектировании башни для газоходов тепловой электростанции // Вестн. евразийской науки. 2020. Т. 12. № 6. С. 41.
26. *Лампси Б. Б., Маркина Ю. Д.* Исследование напряженно-деформированного состояния фланцевых соединений стальных башенных сооружений // Приволжский науч. журн. 2020. № 1(53). С. 11—15.
27. Трехгранная решетчатая опора : пат. № 2707898 С1 Рос. Федерация, МПК E04H 12/10, E04C 3/32 / И. Р. Бадертдинов, Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов и др.; № 2019113023 : заявл. 26.04.2019; опубл. 02.12.2019.
28. *Бадертдинов И. Р., Кузнецов И. Л., Сабитов Л. С., Ахтямова Л. Ш.* Разработка методики расчета на устойчивость упруго опертых тонкостенных стержней открытого сечения решетчатых конструкций башенных сооружений // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2019. № 8. С. 59—61.
29. *Губанов В. В.* Исследования высотных сооружений в научной школе ДОННАСА // Строитель Донбасса. 2019. № 2(7). С. 26—32.
30. *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.
31. *Amlan Das, Shiva Kumar.* Modelling and analysis of lattice towers for wind turbines // International Journal of Science and Research. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 999—1003.
32. *Shah Mohammadi M. R., Rebelo C., Pavloviж M., Veljkoviж M.* New lattice-tubular tower for onshore WEC. Part 1. Structural optimization // X International conference on recent advances in structural dynamics, EURO DYN 2017. Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 3236—3241.
33. *Szafran J., Kamiński M., Juszczak K.* Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state // Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters / Ed. by L. Małyszko, R. Tarczewski. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, 2016. Pp. 95—102.
34. *Szafran J., Kamiński M.* From full-scale testing of steel lattice towers to stochastic reliability analysis // Archives of Mechanics. 2017. No. 69(4-5). Pp. 371—388.

© Голиков А. В., Терновой В. А., Габова В. В., 2022

Поступила в редакцию
в январе 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Терновой В. А., Габова В. В. Метод усиления решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 18—32.

Об авторах:

Голиков Александр Владимирович — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alexandr_golikov@mail.ru

Терновой Владислав Андреевич — студент, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; v.ternowoy2014@yandex.ru

Габова Виктория Викторовна — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gabovavv@yandex.ru

Alexander V. Golikov, Vladislav A. Ternowoy, Viktoriya V. Gabova

Volgograd State Technical University

METHOD OF REINFORCEMENT OF LATTICE TOWERS

The key objectives of the development of cellular communications are to cover more and more territories with networks, to ensure stability and high data transfer rates, as well as planned maintenance of developed areas, maximum use of the safe operational resource of the erected communication towers. The article examines the work of the trunk of a cellular lattice tower with damage and proposes a reinforcement design based on accumulated experience, taking into account the nature of the impact of defects and realized damage.

К е у w o r d s: reinforcement, lattice tower, cross-section, round steel, stress-strain state, stiffness, load-bearing capacity, efficiency.

For citation:

Golikov A. V., Ternowoy V. A., Gabova V. V. [Method of reinforcement of lattice towers]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 1, pp. 18—32.

About authors:

Alexander V. Golikov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexandr_golikov@mail.ru

Vladislav A. Ternowoy — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; v.ternowoy2014@yandex.ru

Viktoriya V. Gabova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gabovavv@yandex.ru