

УДК 624.014

РАСЧЕТ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ

С.А. Ращепкина, Э.К. Акимова, Ю.А. Попова

Выполнен краткий обзор существующих градирен и показаны достоинства градирен гиперболической формы. Установлено существенное влияние профилей на несущую способность элементов каркаса градирни. Выявлено, что наиболее эффективный профиль для данной башенной градирни – это сечение в виде коробки из двух швеллеров. По построенным эпюрам деформирования высотного сооружения было выявлено, что на перемещения верхушки градирни наибольшее влияние оказывает статическая ветровая нагрузка. Результаты исследований рекомендуются к применению при проектировании градирен на объектах энергетики.

Ключевые слова: металл; каркас; башенная градирня; расчет; усилия; перемещения; несущая способность; анализ.

МУНАРА ГРАДИРНИЯЛАРЫН ОПТИМАЛДУУ ДОЛБООРЛОО ЖАНА ЭСЕПТЕП ЧЫГУУ

С.А. Ращепкина, Э.К. Акимова, Ю.А. Попова

Бул макалада градирняларга кыскача сереп салынды жана гиперболикалык формадагы градирнялардын артыкчылыктары көрсөтүлдү. Градирнянын каркасынын элементтеринин көтөрүмдүүлүк мүмкүнчүлүгүнө анын профили олуттуу таасир тийгизе тургандыгы белгиленди. Ушул мунара градирнялары үчүн бир кыйла натыйжалуу профиль болуп эки швеллерден турган куту түрүндөгү кесинди эсептелет. Бийик курулманын чиймеси боюнча градирнянын чокусунун жылып кетишине шамалдын тийгизген таасири чоң экендиги аныкталды. Изилдөөнүн жыйынтыктарын энергетикалык объекттерде градирняларды долбоорлоодо колдонуу сунушталат.

Түйүндүү сөздөр: металл; каркас; мунара градирнялары; эсептөө; аракет; жылып кетүү; көтөрүү мүмкүнчүлүгү; талдоо жүргүзүү.

CALCULATION AND OPTIMAL DESIGN TOWER COOLING TOWER

S.A. Rashchepkina, E.K. Akimova, Yu.A. Popova

A brief overview of existing cooling towers has been performed and hyperbolic cooling towers are shown. Significant influence of profiles on load-bearing capacity of cooling tower frame elements has been established. It was found that the most effective profile for a given tower cooling tower was a section in the form of a box of two channels. According to the constructed heights of deformation of the high-rise structure, it was revealed that static wind load has the greatest influence on the movements of the top of the cooling tower. The studies obtained are recommended for use in the design of cooling towers at energy facilities.

Keywords: metal; frame; tower cooling tower; calculation; forces; movements; bearing capacity; analysis.

Типы башенных градирен и их особенности. Во все времена тема энергосбережения всегда была чрезвычайно актуальной. Экономика России предполагает широкое применение современных энергосберегающих технологий, связанных с энергетическими затратами. В настоящее время энергосбережение и энергосберегающие технологии тесно взаимосвязаны, что определяет один из важнейших

приоритетов политики нашего государства [1, 2]. В данной работе рассматриваются градирни как одни из важнейших типов сооружений, входящих в состав объектов энергетики.

Вопросу проектирования и изучению различных типов градирен посвящен ряд практических и исследовательских работ. Наиболее эффективным сооружением, которое применяется на таких промышленных предприятиях как ТЭС, ТЭЦ и АЭС являются башенные градирни [3–8]. Данные сооружения размещаются близко к предприятию, а охлаждение воды протекает за счет естественной тяги, что является отличительной особенностью данного сооружения.

С увеличением мощности тепловых и атомных электростанций повышается и количество воды, которую необходимо охлаждать. Соответственно необходимо проектировать градирни с большей производительностью.

В настоящее время градирни проектируются в сборном каркасно-обшивном варианте, а также в монолитном железобетоне [5]. Для каждого из вариантов существует ряд достоинств и недостатков, а также особенностей их применения в тех или иных климатических условиях. Авторами проведен обзор различных типов башенных градирен, выявлены достоинства, недостатки их применения [6, 7].

Первые гиперболические градирни из дерева в виде сетчатых оболочек высотой 46 м были возведены по проекту В.Г. Шухова в городе Североуральск (1948 г.) [9]. Они сохранились до нашего времени (рисунок 1, а). Несколько позже появились небольшие башенные градирни производительностью до 11000 м³/ч и площадью орошения до 1600 м², имеющие форму усеченной многогранной пирамиды (рисунок 1, б) [3]. Строительство крупных энергетических предприятий требовало охлаждения большого количества воды, появилась необходимость в строительстве градирен большей производительности и площади орошения; причем оказалось, что наиболее целесообразно возведение оболочки в виде гиперboloида вращения (рисунок 1, в) [3]. Применение градирен из сборных элементов в виде однополостного гиперboloида вращения обладает рядом достоинств:

- они обладают высокой прочностью и надежностью;
- такая форма придает тонкостенным пространственным конструкциям достаточно высокую пространственную жесткость и устойчивость;
- несмотря на кривизну, они могут быть изготовлены из прямых элементов, хорошо вписывающихся в заданное криволинейное очертание башни;
- гиперболическая форма позволяет создать оригинальное и необычное сооружение, создать уникальную архитектурную выразительность.

Следует отметить, что башни в виде однополостного гиперboloида вращения из сборных металлических элементов могут быть возведены в любом климатическом районе. Башня гиперболической формы наиболее устойчивая и обладает высокой прочностью; при этом учитываются законы аэродинамики. Сборные металлические башни градирен являются оптимальным вариантом, как с точки зрения проектирования, так и возведения, поскольку позволяют наиболее точно повторить форму гиперboloида вращения.

Сборные стальные каркасы башен часто применяют, так как их достаточно удобно монтировать укрупненными блоками, которые собирают непосредственно на строительной площадке [3, 8]. Современные башенные градирни могут быть изготовлены из различных профилей: труб, спаренных уголков, швеллеров и других сечений, составленных из них. Обшивка каркаса выполняется из алюминиевых листов толщиной 2 мм. В верхней части градирня имеет светоограждение и маркировочную окраску, по периметру проектируют лестничную площадку с целью свободного доступа для обслуживания высотного сооружения.

В результате проведенного краткого обзора с учетом известных технико-экономических показателей градирен [3], а также условий проектируемой ТЭС, таких как расположение станции, температурный режим, оборудование главного корпуса, для исследования и анализа была принята металлическая гиперболическая градирня высотой 150 м [8], в основании которой лежит многогранник (рисунок 1, в).

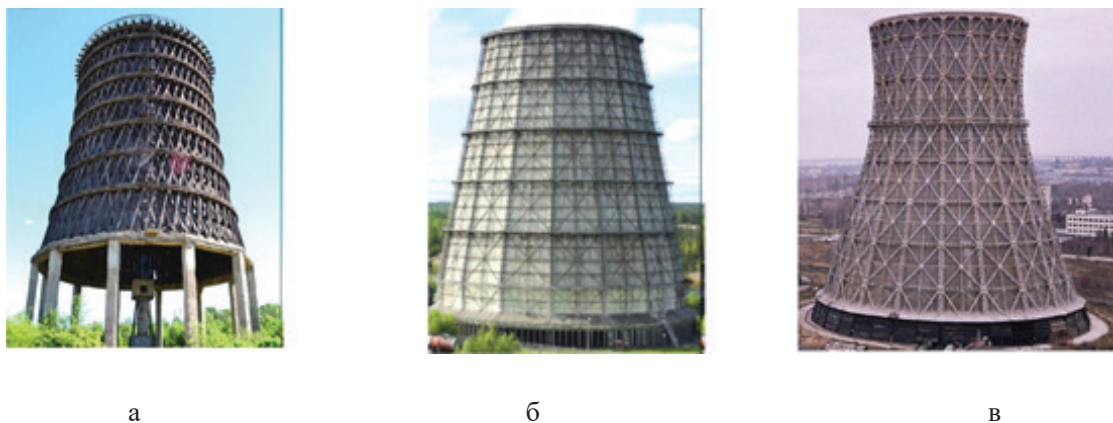


Рисунок 1 – Башенные градирни:
а – башня Шухова; б – градирня в виде конуса; в – гиперболическая форма градирни

Расчет башенной гиперболической градирни. Требуется выполнить анализ влияния типа профилей на несущую способность башенной градирни: перемещения и усилия в стержнях при следующих исходных данных: район строительства г. Сухиничи, Калужская область; высота башни 150 м; в основании 32-гранник; диаметр описанной у основания башни окружности 120 м; количество ярусов – 16; материал исполнения – сталь С345. Расчет велся на постоянную и ветровую нагрузки согласно СП [10, 11].

При кодировке каркаса сооружения для статического и динамического расчетов был принят 5 тип конечного элемента – КЭ пространственной рамы, поскольку узлы являются жесткими [12]. В основе расчета – метод конечных элементов в перемещениях. В расчет было введено три типа нагрузок: собственный вес каркаса сооружения; ветровая нагрузка; динамическая составляющая первой статической нагрузки.

При расчете в программном комплексе [12] пульсационная составляющая ветровой нагрузки создается автоматически при введении параметров ветровой нагрузки. На рисунке 2 показаны загрузки каркаса башенной градирни: а – нагрузка от собственного веса элементов башни; б – ветровая нагрузка; в – характеристики выбранных для анализа стержней (пояс и раскос); г – фрагмент характерных (анализируемых) стержней на отметке 103, 125 м.

Оценка влияния типа профилей на несущую способность. Для анализа было принято четыре варианта выполнения элементов каркаса башенной гиперболической градирни (из различных профилей [13]) с использованием расчета в ПК ЛИРА-САПР [12].

Продольные силы в элементах каркаса башенной градирни

Для всех 4-х вариантов, имеющих одинаковую площадь поперечного сечения (трубчатое сечение, замкнутое сечение из швеллеров, сечение из двух уголков, пространственное сечение из двух швеллеров), рассмотрим элементы, находящиеся на отметке 103, 125 м. Анализ проводим для двух элементов каркаса: пояс и раскос (рисунок 2). Для исследования эффективности применения оптимального профиля рассмотрим фрагмент элементов башни. Результаты расчета усилий в поясе (элемент № 553) представлен на рисунке 3, усилия в раскосе (элемент № 1915) на рисунке 4, на которых обозначено: 1 – труба; 2 – коробка из швеллеров; 3 – два спаренных уголка; 4 – два швеллера (сквозное поперечное сечение).

Таким образом, анализируя рисунок 3, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным для поясов каркаса башенной градирни является замкнутое сечение из двух швеллеров (вариант 2 – коробка из двух швеллеров). Например, при сравнении данных трубчатого профиля и коробки швеллеров при постоянной нагрузке процент расхождения по усилиям N в поясе составляет 25,76 %; по поперечным силам Q_z составляет: 10,34 %; при этом расхождение по поперечным силам Q_y составит 2,66 %.

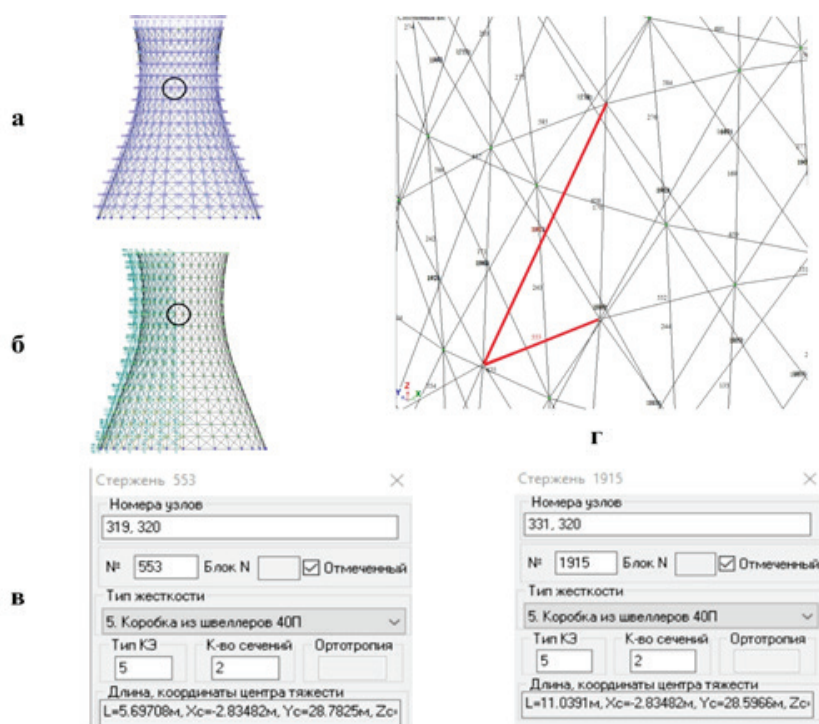


Рисунок 2 – Загрузки каркаса башенной градирни

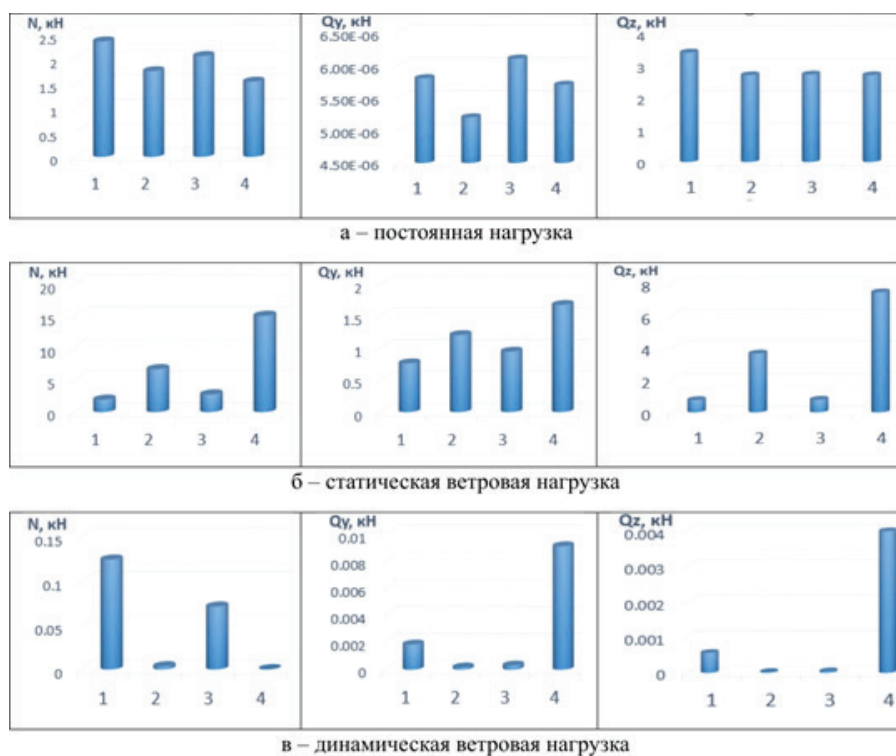


Рисунок 3 – Гистограммы усилий, возникающих в поясе (элемент № 553)

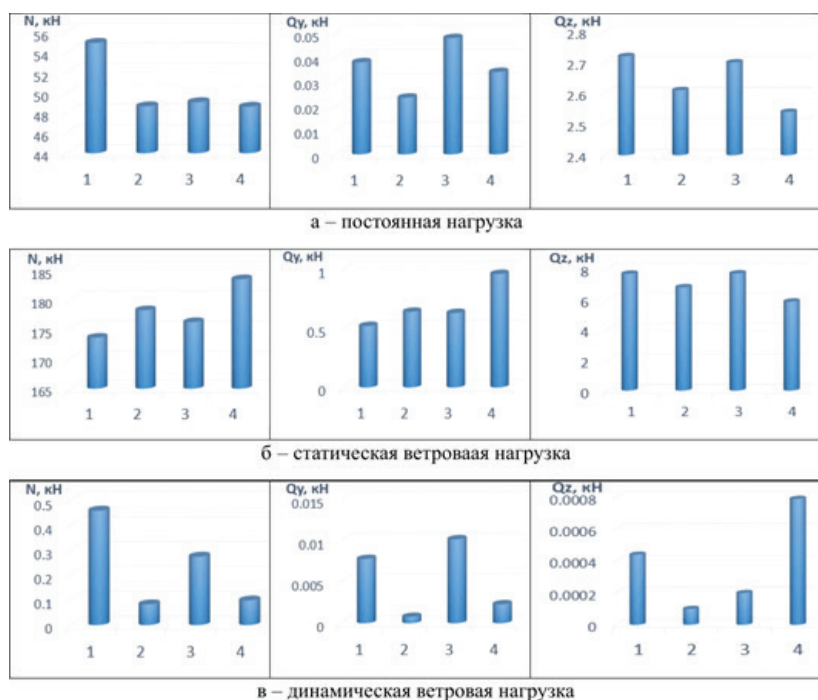


Рисунок 4 – Гистограммы усилий, возникающих в раскосе (элемент № 1915)

При сравнении данных расчета в раскосе при трубчатом профиле и коробки швеллеров при постоянной нагрузке процент расхождения составляет: по усилиям 11,6 %; по поперечным силам $Q_z = 17,36$ %; при этом расхождение по поперечным силам незначительное $Q_y = 4,04$ %.

Таким образом, проведенный расчет в программном комплексе «ЛИРА-САПР» и анализ полученных результатов (по различным видам профилей, рисунок 4), показал, что по продольным усилиям N наиболее целесообразным (оптимальным) решением является применение для каркаса градирни профиля из коробки из швеллеров (вариант 2).

Перемещение элементов каркаса градирни. Для наиболее оптимального варианта – профиля коробки из швеллеров, рассмотрены и представлены значения перемещения элементов каркаса градирни. На рисунке 5 показана мозаика перемещений, а также отмечены максимальные и минимальные значения перемещений элементов гиперболической башни.

Перемещение узлов верхнего пояса градирни. На рисунке 6 представлены перемещения каркаса градирни на верхней отметке. Для анализа выбраны характерные точки, позволяющие сопоставить перемещения по периметру многогранной пространственной конструкции.

В таблице 1 представлены перемещения узлов, выбранных для анализа. Полученные данные свидетельствуют, что перемещения находятся в допустимых пределах [14].

Проведенный анализ (таблица 1) показал следующее:

- 1) перемещение узла 215 от ветровой нагрузки по оси Y минимально и равно 0,04 мм, при этом перемещение по осям X и Z имеют близкие значения и равные соответственно 29,775 и 23,496 мм;
- 2) перемещение узла 223 максимально по оси X и равно 143,581 мм, минимальное перемещение по оси Y равно 0,049 мм;
- 3) максимальное перемещение в узле 193 по оси X равно 85,718 мм, минимальное по оси Z – 10,041 мм;
- 4) максимальное перемещение в узле 229 по оси X равно 85,732 мм, минимальное по оси Z – 10,039 мм.

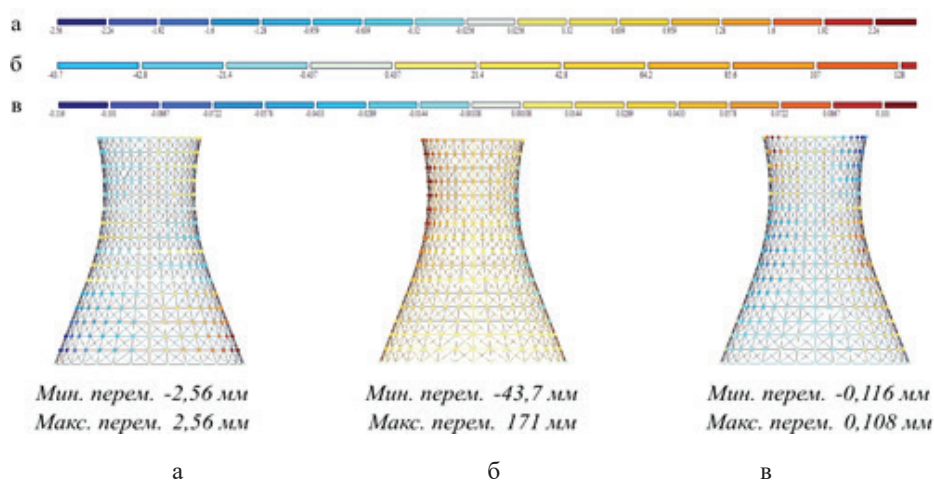


Рисунок 5 – Мозаика перемещений элементов башни для коробки из швеллеров:
а – собственный вес; б – статическая ветровая нагрузка; в – пульсационная ветровая нагрузка

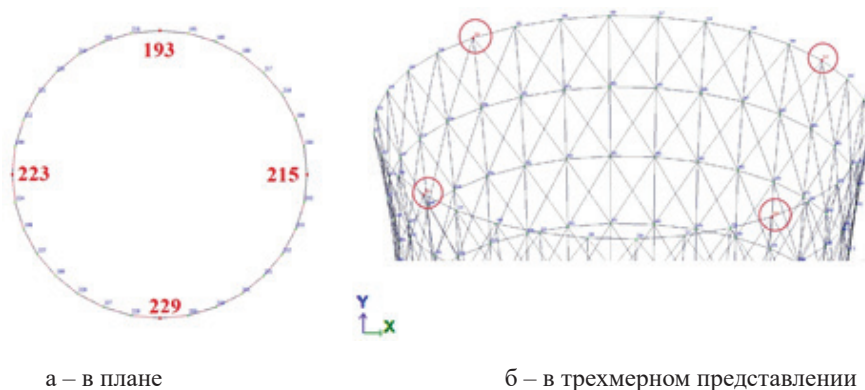


Рисунок 6 – Нумерация узлов на отметке 150 м

В результате расчета перемещений (рисунки 6, 7) по заданному сечению (отметка 150.0) каркаса пространственной конструкции гиперболической градирни было выявлено следующее:

- для собственного веса градирни максимальное перемещение составляет 12,093 мм, а минимальное перемещение – 0,000 мм;
- для статической ветровой нагрузки максимальное перемещение 143,581 мм, а минимальное перемещение – 0,040 мм;
- для динамической ветровой нагрузки максимальное перемещение 0,027 мм, а минимальное перемещение – 0,005 мм.

Следует отметить, что наибольшее влияние оказывает статическая составляющая ветровой нагрузки, на которую необходимо обратить особое внимание при реальном проектировании градирен.

Выводы. Анализ разных типов градирен и использование различных профилей для каркаса высотного сооружения, позволил сделать следующие выводы:

- каркас стальной башенной градирни в виде гиперboloида вращения – это наиболее целесообразное конструктивное решение для проектируемой тепловой электростанции;
- сравнительный расчет и анализ показал существенное влияние различных профилей на несущую способность элементов градирни (на значения усилий и перемещений);

Таблица 1 – Перемещение верхних узлов градирни на отметке 150 м для варианта № 2 (коробка из швеллеров)

№ узла	X, мм	Y, мм	Z, мм	UX, рад·1000	UY, рад·1000	UZ, рад·1000
Собственный вес						
193	0,000	0,234	-12,093	0,179	0,000	0,000
215	0,234	0,000	-12,093	0,000	-0,179	0,000
223	-0,234	0,000	-12,093	0,000	0,094	0,000
229	0,000	-0,234	-12,093	-0,179	0,000	0,000
Статическая ветровая нагрузка						
193	85,718	67,607	10,041	2,669	0,295	0,301
215	29,775	-0,040	-23,496	0,004	2,291	0,003
223	143,581	0,049	6,235	-0,004	-3,218	0,003
229	85,732	-67,615	10,039	-2,668	0,294	-0,301
Динамическая ветровая нагрузка						
193	0,009	0,128	-0,024	-0,001	0,000	0,002
215	-0,027	-0,041	0,005	0,002	0,000	-0,010
223	-0,025	-0,041	-0,005	0,002	0,000	-0,011
229	0,008	0,126	0,024	-0,001	0,000	-0,002

Здесь: синим цветом (жирно) выделены максимальные значения по перемещению узлов.

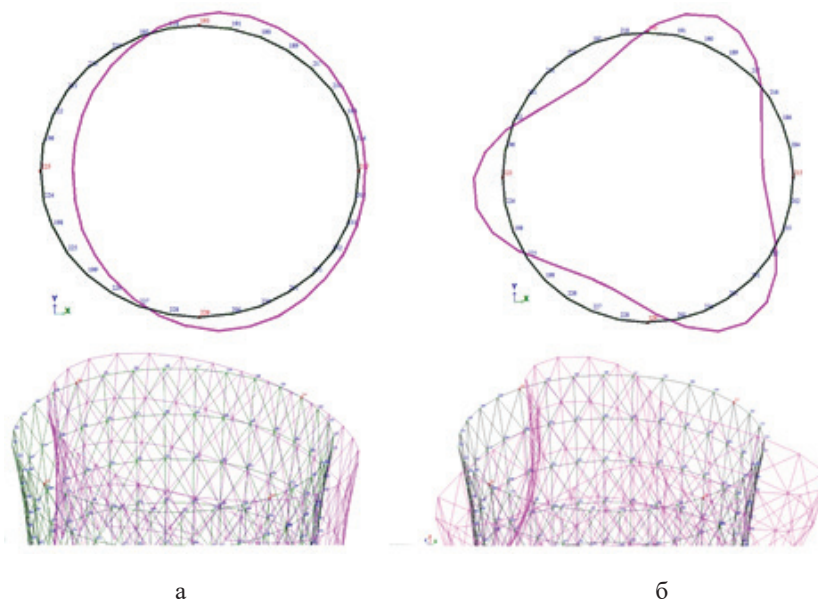


Рисунок 7 – Исходная (черный контур) и деформированная (розовый контур) схема перемещения узлов от нагрузок: а – статическая ветровая нагрузка; б – динамическая ветровая нагрузка

- выявлено, что наиболее оптимальный вариант – это проектирование элементов стального каркаса уникальной гиперболической градирни из профиля, составленного в виде коробки из двух швеллеров;
- показано, что для всех заданных профилей с соответствующими площадями) перемещения элементов градирни не превышают предельно допустимые.
Проведенный расчет и анализ может быть использован при проектировании стальных градирен в виде гиперблоида на тепловой электростанции, а также при проектировании других объектов энергетики.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 11.11.2013 N 2084-р «Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики». URL: <https://base.garant.ru/70509366/> (дата обращения: 25.11.2020).
2. Энергосбережение на атомном уровне. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/233/15501.htm> (дата обращения: 28.11.2020).
3. *Теличенко В.И.* Строительство тепловых электростанций. Проектные решения тепловых электростанций / В.И. Теличенко, И.К. Вишницкий, В.И. Кириллов, Б.Ф. Лейпунский, Б.К. Пергаменщик, Ф.В. Сапожников. М.: АСВ, 2010. Т. 1. 376 с.
4. *Горев В.В.* Металлические конструкции. Специальные конструкции и сооружения / В.В. Горев. М.: Высшая школа, 2002. Т. 3. 544 с.
5. *Купцов И.П.* Проектирование и строительство тепловых электростанций / И.П. Купцов, Ю.Р. Иоффе. М.: Энергоатомиздат, 1985. 408 с.
6. *Akimova E.* About designing tower coolers / E. Akimova, Y. Popova, S. Rashchepkina // The scientific heritage. Hungary: Budapest, 2019. № 42. Pp. 52–57.
7. *Акимова Э.К.* Эффективные охладительные градирни / Э.К. Акимова, С.А. Ращепкина // Символ науки. Уфа: Омега Сайнс, 2020. № 1. С. 16–17.
8. *Астряб С.М.* Проектирование металлических конструкций градирен / С.М. Астряб, Ю.В. Соболев. М.: МИСИ, 1984. 56 с.
9. *Королев Р.* Металлистика / Р. Королев // Мастерская Романа Королева. URL: <https://metallistika.ru/giperboloid-i-paraboloid/> (дата обращения: 15.04.2020).
10. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: Стандартинформ, 2018. 95 с.
11. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Стандартинформ, 2018. 148 с.
12. Программный комплекс ЛИРА–САПР 2012 / Р.Ю. Водопьянов, Ю.В. Гензерский, В.П. Титок, А.Е. Артамонова. URL: <https://www.liraland.ru/> (дата обращения: 30.11.2020).
13. Компания «Стройсталь». URL: <https://www.stroymetall.ru/metal-roll/> (дата обращения: 20.11.2020).
14. СП 267.1325800.2016 Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017. 96 с.