

УДК 69.04

Уразаев А. К.

магистрант

*2 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Дияб В.

магистрант

*2 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Нашер М.Х.А.

Аспирант

*1 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Увайс М.М.А.

Аспирант

*1 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

РАСЧЕТ БАШНИ В ФОРМЕ ОДНОПОЛОСТНОГО ГИПЕРБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ

В статье рассмотрены принципы проектирования и расчёта башни в форме гиперboloида вращения с учётом различных видов нагрузок. Для моделирования геометрии конструкции использованы параметрические

формулы и метод конечных элементов в программном комплексе SCAD Office. Особое внимание уделено точному определению нагрузок с учётом климатических условий региона и специфики конструкции.

Ключевые слова: гиперboloид вращения, металлическая башня, расчёт конструкций, метод конечных элементов, SCAD Office.

The article discusses the principles of designing and calculating a tower in the form of a hyperboloid of rotation, taking into account various types of loads. Parametric formulas and the finite element method in the SCAD Office software package were used to model the geometry of the structure. Special attention is paid to the accurate determination of loads, taking into account the climatic conditions of the region and the specifics of the structure.

Keywords: hyperboloid of rotation, metal tower, structural calculation, finite element method, SCAD Office.

Введение

Гиперboloид вращения был впервые изучен в научной литературе в середине XIX века. Конструкции с такой геометрией обладают высокой жесткостью при минимальном расходе строительных материалов, что позволяет возводить легкие и прочные сооружения. В России, начиная со знаменитой Шуховской башни в Москве, конструкции в форме гиперboloида стали одним из ярких символов отечественного инженерного искусства, которые сумели вдохновить архитекторов и строителей по всему земному шару.

Принципы и основные аспекты расчета башни в форме гиперboloида вращения

Основная задача расчета башни в форме гиперboloида вращения — определение её напряженно-деформированного состояния под воздействием внешних нагрузок. Это необходимо для обеспечения прочности, надежности и долговечности конструкции.

Для проектирования секций башни в форме однополостного гиперболоида вращения используются формулы для параметрического моделирования оболочки в программном комплексе SCAD Office [1]:

$$x(s, t) = -a \cdot \sin(t) + s \cdot \sqrt{(b^2 - a^2)} \cdot \cos(t) \quad (1)$$

$$y(s, t) = a \cdot \cos(t) + s \cdot \sqrt{(b^2 - a^2)} \cdot \sin(t) \quad (2)$$

$$x(u, v) = c \cdot s \quad (3)$$

, где:

a – внутренний радиус поверхности;

b – внешний радиус поверхности;

c – высота конструкции

u, v – параметры образующей конструкции, варьируемые от 0 до 2π

Параметрические формулы позволяют сформировать сетки с равномерным распределением стержней по вертикали и горизонтали, что особенно важно при моделировании решётчатой башни, напряженно-деформированное состояние которой существенно отличается от сплошных оболочек. Для решения данной задачи применяется метод конечных элементов, обеспечивающий высокую точность расчётов и реализованный в программном комплексе SCAD Office [1].

Определение нагрузок

Определение и анализ нагрузок — ключевой этап проектирования, определяющий безопасность и надёжность строительной конструкции. В данной статье рассматриваются основные виды воздействий на проектируемую башню. Особое внимание уделяется статическим нагрузкам, включающим постоянные (собственный вес стержней и узлов) и временные длительные (эксплуатационные нагрузки от оборудования и людей). Корректное определение этих воздействий необходимо для обеспечения прочности и устойчивости сооружения.

Наиболее сложными для расчёта являются кратковременные (климатические) нагрузки, включающие воздействие ветра, снега и гололёда. Ветровые нагрузки зависят от высоты сооружения, что особенно

важно при расчёте башни. Снеговые нагрузки определяются климатическими условиями региона и формой конструкции. Гололёд увеличивает массу стержней и изменяет аэродинамические характеристики сооружения. В расчётах применяются летняя и зимняя комбинации нагрузок: в первой учитывается только ветер, во второй — ветер, снег и гололёд. Точное определение этих воздействий особенно важно для регионов с суровыми климатическими условиями.

Сейсмическая активность и вибрации относятся к динамическим нагрузкам, вызывающим деформации конструкций, вплоть до их разрушения. Поэтому их необходимо тщательно анализировать и корректно учитывать при проектировании сооружений, особенно в сейсмоактивных районах и в зонах с интенсивными вибрационными воздействиями, например, от промышленного оборудования.

Рассмотрим нагрузки, которые будут использоваться в качестве исходных данных для расчета конструкции.

Снеговые нагрузки определяются на основе климатических характеристик региона, где расположен объект. Они зависят от количества выпадающего снега и его распределения на поверхности конструкции. В расчетах используется.

$$S_0 = c_e * c_t * \mu * S_g \quad (4)$$

, где $c_e=1,0$ – коэффициент сноса снега по [5,6] п. 10.6;

$c_t=1,0$ – термический коэффициент по [5,6] п. 10.10;

$\mu=1,0$ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие по [5,6] п. 10.4;

S_g - нормативное значение снеговой нагрузки, которое определяется в соответствии с картой снеговых районов, приведенной в [2,3] таблица 10.1. Для рассматриваемой башни используется снеговой район II, что соответствует нагрузке $S_g=1,0 \text{ кПа}$

Ветровые нагрузки учитывают воздействие ветра на конструкцию, которое может вызывать как статические, так и динамические эффекты. Для

расчета нормативной ветровой нагрузки на определенной высоте относительно уровня земли применяют формулу:

$$\omega_m = \omega_0 * k(z_e) * c \quad (5)$$

, где ω_0 – нормативное значение ветрового давления определяется в зависимости от ветрового района, указанного в [2,3] таблица 11.1. Для данной башни используется ветровой район II, что соответствует нагрузке $\omega_0=0,30$ кПа.

$k(z_e)$ – коэффициент изменения ветрового давления относительно высоты z_e ; Для башни z_e – это высота от поверхности земли

c – аэродинамический коэффициент, $c=c_f=0,8$ – коэффициент лобового сопротивления, $c=c_s=-0,5$ – коэффициент всасывания.

Для башни z_e – это высота от поверхности земли. Коэффициент ветрового давления $k(z_e)$ определяется по формуле [2,3] 11.4:

$$k(z_e) = k_{10} \left(\frac{z_e}{10} \right)^{2\alpha} \quad (6)$$

, где k_{10} и 2α определяются по СП 20.13330.2016 таблица 11.3. Для типа местности С (городская застройка) $k_{10}=0,4$, а $2\alpha=0,25$.

После этого необходимо рассчитать значение погонной нагрузки q на каждую секцию:

$$q = \omega_m * y_f * 0,5 * (d_1 + d_2) \quad (7)$$

, где d_1, d_2 – диаметр поясов верхней и нижней секции соответственно.

Гололедные нагрузки возникают вследствие обледенения элементов конструкции. Нормативное значение поверхностной гололедной нагрузки:

$$i' = b * k * \mu_2 * p \quad (8)$$

, где b – нормативное значение толщины стенки гололеда определяется на основе климатических данных региона в [2,3] таблица 12.1. В данном случае толщина стенки гололеда составляет не менее 5 мм (II район);

k – коэффициент учитывающий изменение толщины стенки гололеда по [5,6] таблице 12.3;

μ_2 – коэффициент отношения площади поверхности элемента, подверженной обледенению, к полной площади поверхности элемента;

ρ – плотность льда (0,9 г/см³);

Сейсмические нагрузки учитывают воздействие землетрясений на конструкцию. Расчетная сейсмичность площадки строительства определяется на основе карт сейсмического районирования, приведенных в СП 14.13330.2018. Для рассматриваемой башни расчетная сейсмичность отсутствует, что указывает на низкую сейсмическую активность в регионе.

Принцип построения

В процессе построения расчётной схемы сетчатой гиперболоидной башни приняты условия, определяющие корректность и точность расчётов. Опорный контур, служащий основанием конструкции и передающий нагрузки на фундамент, жёстко закрепляется, исключая смещения и вращения. Узлы сети моделируются шарнирными, чтобы исключить передачу моментов между стержнями и учитывать лишь продольные и поперечные усилия; при этом каждый стержень работает на растяжение или сжатие, что упрощает анализ напряжённо-деформированного состояния. Узловые нагрузки определяются по основному сочетанию, включающему собственный вес, ветровые, снеговые и гололёдные воздействия, действующие одновременно. Кольцевые стержни сети рассматриваются как идеально пластичные элементы малой несущей способности, способные деформироваться без разрушения и выполняющие вспомогательную функцию.

Построение решетчатой башни в форме гиперboloида вращения в программном комплексе SCAD.

В рамках диссертационной работы разработана пространственная решетчатая конструкция башенного типа высотой 124,5 м, представляющая собой гиперболоид вращения с переменной геометрией по высоте. Конструкция поделена на 5 секций, каждая высотой 24,9 м, что

обеспечивает рациональное распределение нагрузок и упрощение монтажных процессов.

Таблица 1

Секции башни

№ Секции	Диаметр нижнего кольца, м	Диаметр верхнего кольца, м	Сечение
1	34	25	L 125x8
2	25	19	L 110x8
3	19	14	L 100x8
4	14	5	L 100x7
5	5	3	L 90x6

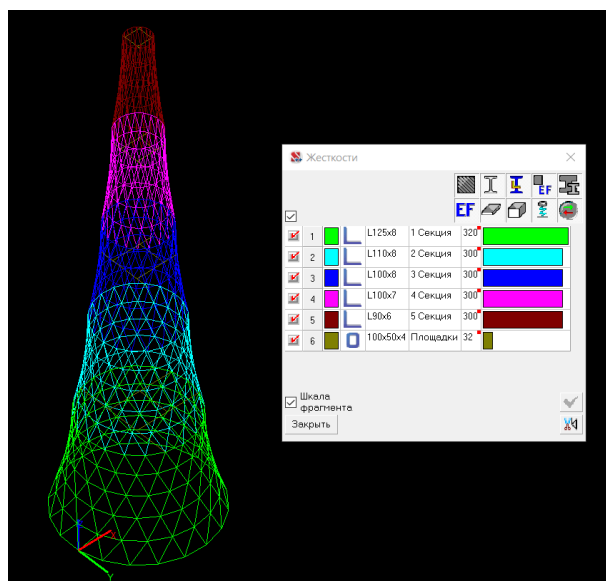


Рисунок 1 – Башня в форме гиперboloида вращения в программном комплексе SCAD

В программном комплексе SCAD геометрические параметры каждой секции задавались индивидуально с использованием аналитических поверхностей в виде однополостных гиперboloидов вращения. Для точного моделирования форма каждой секции была разделена на пять горизонтальных колец, обеспечивающих детализированное разбиение по

высоте. Опорные контуры формировались с применением 40 радиальных профилей, что обеспечило равномерное распределение геометрических характеристик. Такой подход позволил достичь высокой точности параметризации сложных криволинейных форм.

Сбор нагрузок

К постоянным нагрузкам на металлическую башню относится собственный вес конструкции, учитываемый с коэффициентом надёжности по нагрузке 1,05 в соответствии с современными строительными нормами. Также включается статическое воздействие от технологического оборудования (антенные системы, обслуживающие площадки и др.), для которого применяется повышенный коэффициент 1,1 с учётом возможных изменений массы в процессе эксплуатации и дополнительных динамических воздействий.

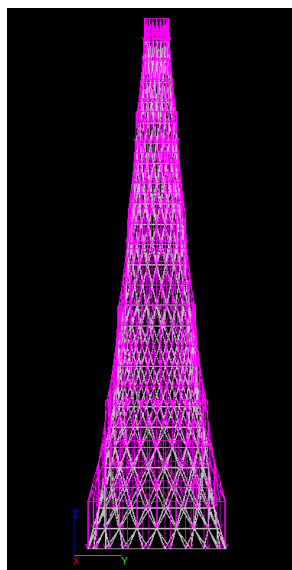


Рисунок 2 – Собственный вес

К временным нагрузкам относятся климатические и атмосферные воздействия переменного характера. В их состав входят ветровые нагрузки, создающие аэродинамическое давление, снеговые нагрузки, зависящие от региона строительства и формы башни, а также гололёдные, увеличивающие массу и парусность элементов при обледенении. Эти воздействия учитываются с применением коэффициентов сочетания и

динамических поправочных коэффициентов согласно действующим нормативным документам.

Ветровая нагрузка на металлическую башню определяется по формулам (5) и (6) с учётом скоростного напора ветра, аэродинамического коэффициента и поправочных коэффициентов, зависящих от высоты и типа местности.

Поскольку ветровая нагрузка является переменной, её расчётное значение изменяется по высоте конструкции. Это связано с ростом скоростного напора ветра с увеличением высоты, а также с аэродинамическими характеристиками отдельных секций башни. Поэтому для различных участков сооружения выполняются расчёты с учётом их геометрии и пространственного положения.

Таблица 2

Ветровая нагрузка

№ Секции	z_e , м	k_{ze}	d_1 , м	d_2 , м	q (наветренная), т/м	q (подветренная) , т/м
1	24,9	0,50	25	34	0,51	-0,32
2	49,8	0,60	19	25	0,47	-0,28
3	74,7	0,66	14	19	0,38	-0,24
4	99,6	0,71	5	14	0,23	-0,16
5	124,5	0,75	3	5	0,11	-0,07

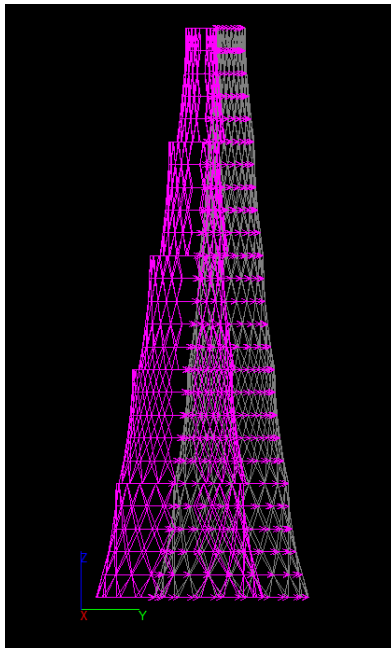


Рисунок 3 – Ветровая нагрузка

Снеговая нагрузка на металлическую башню рассчитывается по формуле (4) с учётом нормативного значения снегового покрова региона, коэффициента перехода от веса снега на горизонтальной поверхности к нагрузке на конструкцию, а также коэффициента, учитывающего уклон и конфигурацию элементов сооружения.

Основное воздействие снеговой нагрузки приходится на обслуживающие площадки площадью 2,5 м² каждая, при этом принимается равномерное распределение снегового слоя по их поверхности.

$$S_0 = c_e * c_t * \mu * S_g = 1 * 1 * 1 * 1 = 1 \text{ кПа}$$

Значит расчетное значение снеговой нагрузки составит:

$$S = S_0 * y_f = 1 \text{ кПа} * 1,4 = 1,4 \text{ кПа} = 0,14 \text{ т/м}^2$$

Вычисляем погонную нагрузку для стержневых конструкций:

$$Q = S * 0,1\text{м} = 0,014 \text{ т/м}$$

где, сечение элементов площадки равно 100 мм.

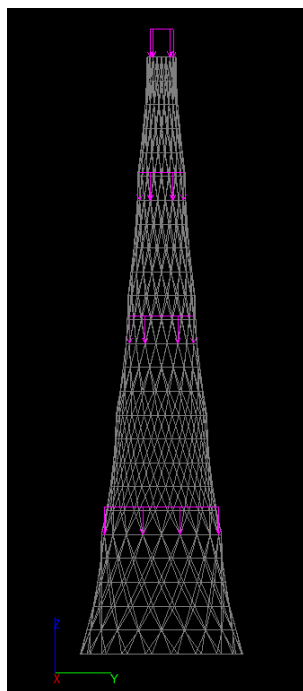


Рисунок 4 – Снеговая нагрузка

Гололедная нагрузка определяется в соответствии с формулой (7), регламентированной действующими нормативными документами. Данная методика расчета учитывает комплекс факторов, включая региональные климатические особенности, вероятность образования гололедных отложений и их предполагаемую толщину на определённой высоте элементов конструкции ([2] таблица 12.1).

Таблица 3

Гололедная нагрузка

№ Секции	h , м	k	i' , г/м ²	A , м ²	q_i , т
1	24,9	1,40	0,0068	9,8	0,0006
2	49,8	1,60	0,0078	6,6	0,0012
3	74,7	1,83	0,0089	4,4	0,0021
4	99,6	1,99	0,0097	1,6	0,0061
5	124,5	2,16	0,0105	0,9	0,0117

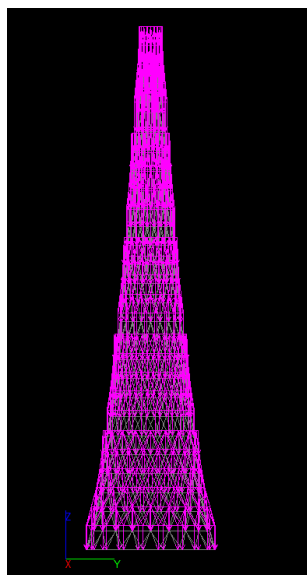


Рисунок 5 – Гололедная нагрузка

После определения всех действующих нагрузок требуется сформировать расчетные сочетания воздействий с учетом сезонных факторов. Для летнего периода рассматриваются постоянные нагрузки от собственной массы конструкции совместно с ветровым воздействием. В зимних комбинациях дополнительно вводятся снеговые и гололедные нагрузки, что позволяет учесть наиболее неблагоприятные условия эксплуатации.

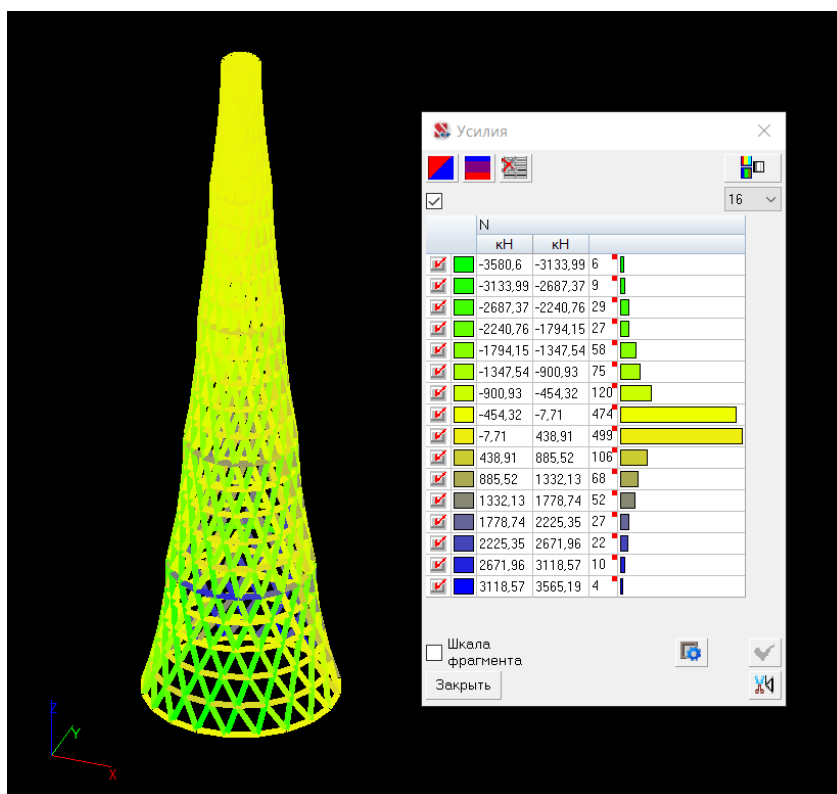


Рисунок 6 – Усилия N в стержнях (нагрузки для летнего периода)

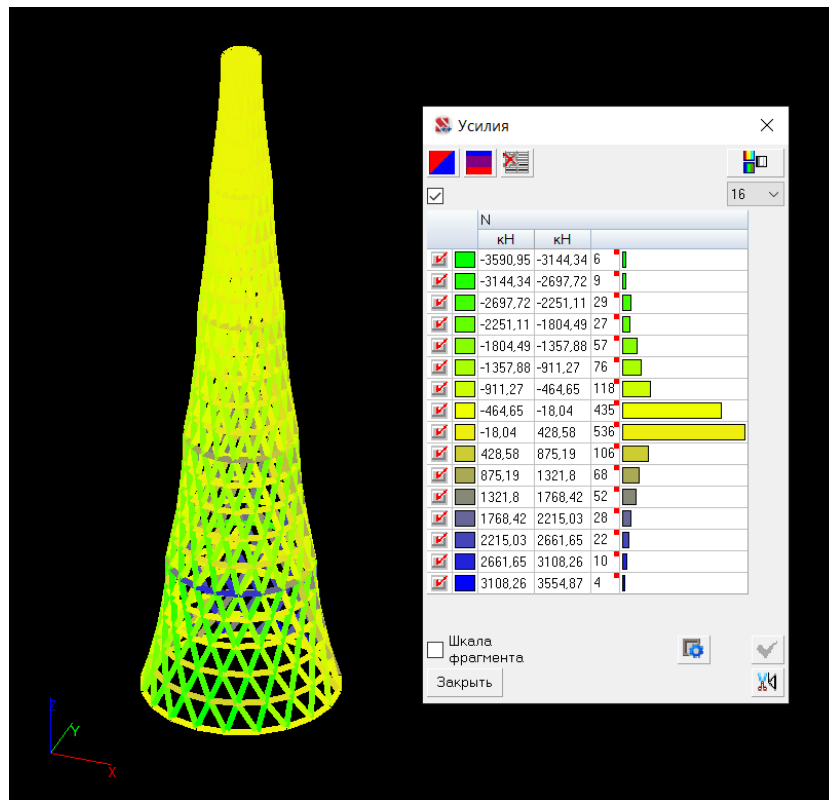


Рисунок 7 – Усилия N в стержнях (нагрузки для зимнего периода)

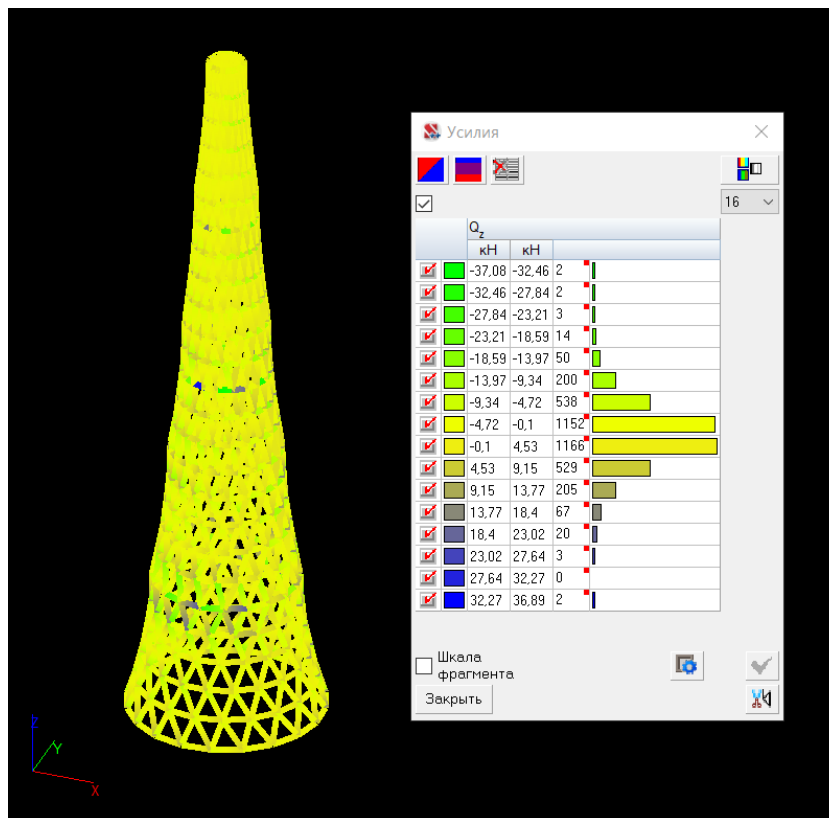


Рисунок 8 – Усилия Qz в стержнях (нагрузки для летнего периода)

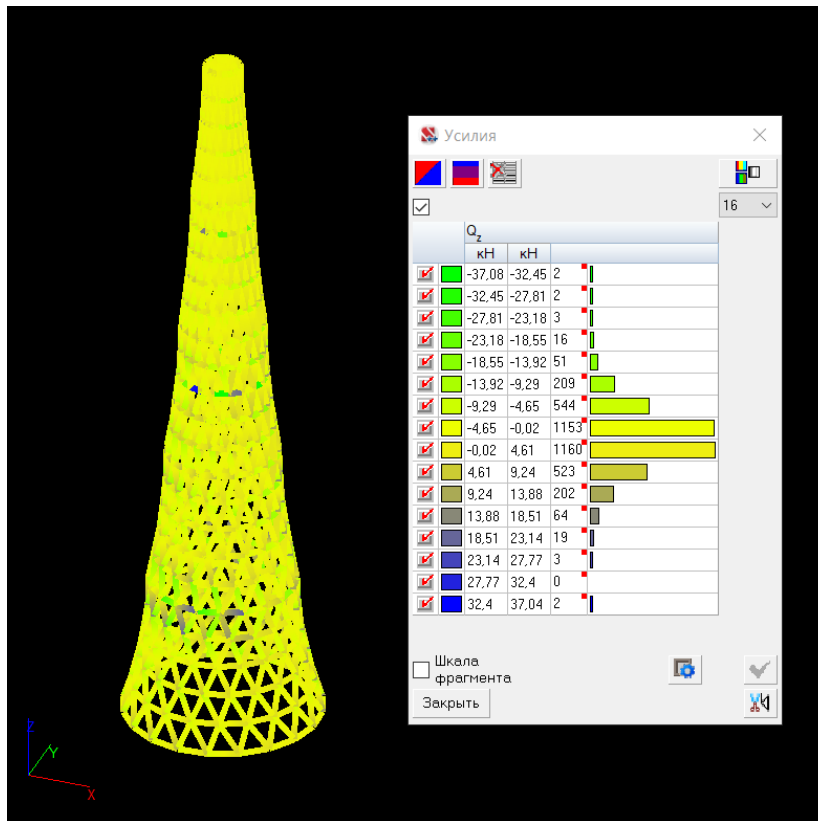


Рисунок 9 – Усилия Qz в стержнях (нагрузки для зимнего периода)

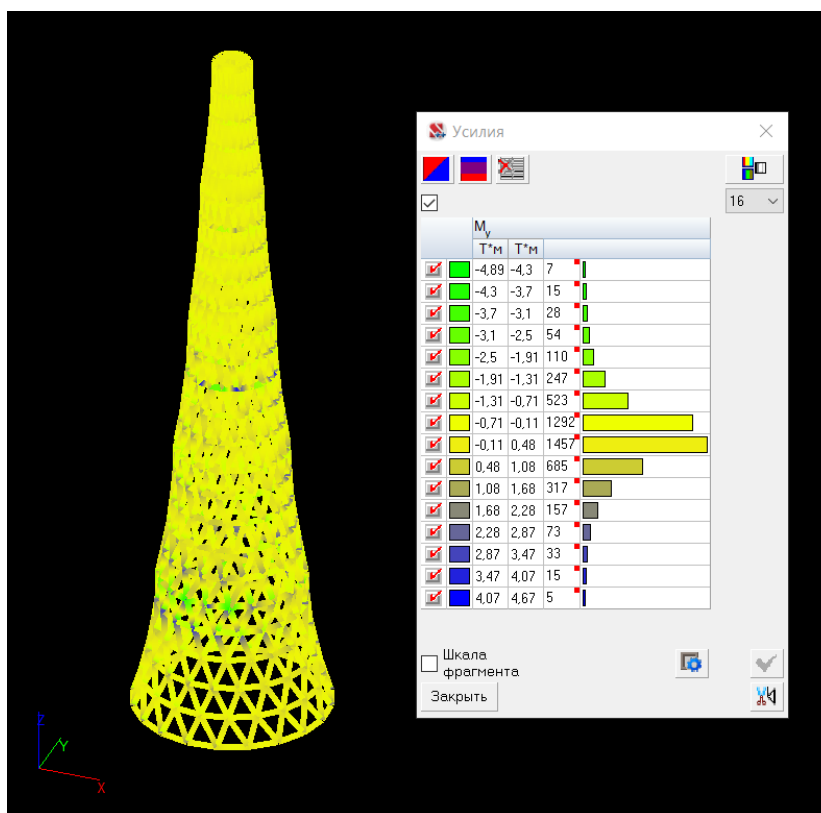


Рисунок 10 – Усилия My в стержнях (нагрузки для летнего периода)

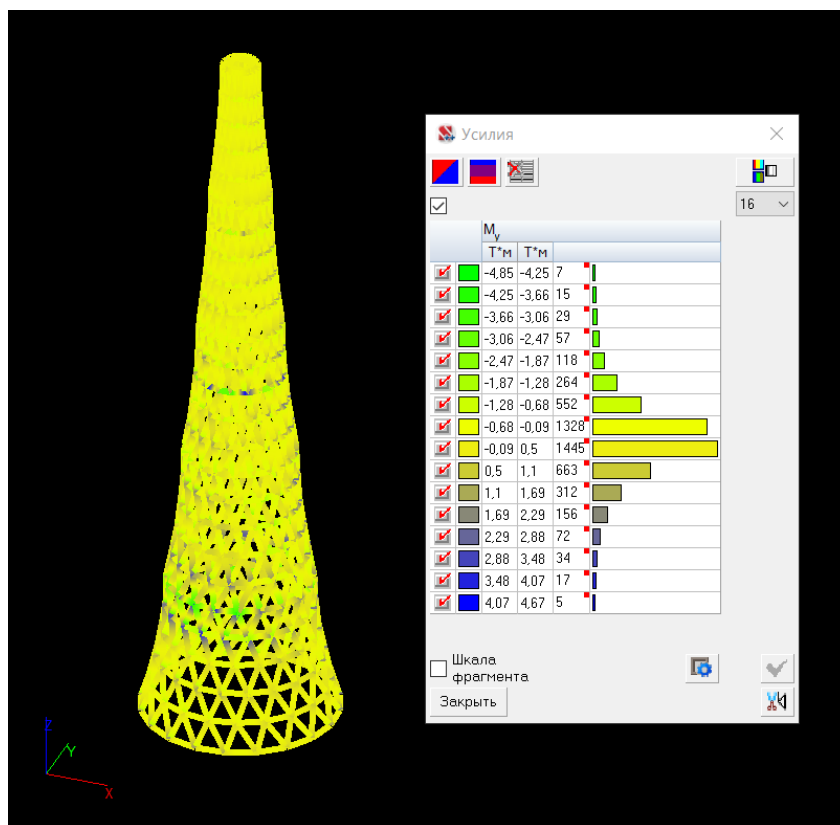


Рисунок 11 – Усилия M_y в стержнях (нагрузки для зимнего периода)

Заключение

Анализ распределения внутренних усилий (N , Q_z , M_y), (Рисунки 6-11) позволяет сделать обоснованные выводы о напряженно-деформированном состоянии исследуемой конструкции. В частности, в башне наблюдается равномерное распределение основных силовых факторов по всему объему конструкции, что свидетельствует об отсутствии значимых зон концентрации напряжений. Такое поведение указывает на эффективное восприятие нагрузок конструктивными элементами и способствует повышению общей устойчивости и долговечности сооружения. Данные результаты подтверждают верность выбранной модели и примененных расчетных методик для оценки прочностных характеристик конструкции.

Таким образом, проведенный расчет металлической башни в форме гиперboloида вращения и примененный современный метод её

проектирования могут быть эффективно использованы в современной строительной практике при возведении объектов любой степени сложности.

Использованные источники:

1. Щуцкий С.В., Черныш А.В., Болдырев А.С. Особенности расчета башен в форме сетчатого гиперboloида // Инженерный вестник Дона. 2019. №2. [URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5777]

2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85" / Минрегион России. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; ин-т ОАО «НИЦ Строительство»; РААСН и ГГО им. А.И. Воейкова, 2010. 80 с.

3. СНиП 2.01.07-85'. Нагрузки и воздействия. Москва: ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.

4. Курц, М. А., Слепынина Т. Н. Применение гиперboloидных конструкций в строительстве // Молодежь и наука: материалы международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов (26 мая 2023 г., г. Нижний Тагил). [URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/126822/1/978-5-9544-014-8_2023_059.pdf]

5. Гиперboloиды: однополостный и двуполостный // Математический форум Math Help Planet URL: [<https://mathhelpplanet.com/static.php?p=giperboloid>]

6. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко [и др.]. Москва: АСВ, 2004. с. 592.

7. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко [и др.]. Москва: АСВ. 2004. с. 288.

Информация о себе:

Уразаев Арслан Камилевич

Почтовый адрес: ул. Профсоюзная 140к2, кв. 204, Москва, Россия, 117321.

Телефон: 8 (996) 580-04-56.

Электронный адрес: arslan.urazaev@mail.ru