

АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ / ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.1>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БОЛЬШЕПРОЛЁТНОГО ЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА «ФАВОРИТ» В Г. АРХАНГЕЛЬСКЕ

Научная статья

Кучин М.В.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

* Корреспондирующий автор (kuchin.m[at]edu.narfu.ru)

Аннотация

В процессе анализа объектов-аналогов, выявлены их достоинства, недостатки и приведена сравнительная таблица, подобран рациональная схема покрытия. Выполнен сравнительный анализ трёх вариантов системы стабилизации применяемого мембранного покрытия. Построена конечно-элементная модель, а также произведены расчёты основных несущих элементов, таких как мембрана покрытия, опорный контур, центральное и промежуточное кольца, вантовая система и ответственных узлов покрытия как аналитически, так и в программно-вычислительном комплексе (SCAD Office) с учётом различных статико-геометрических параметров и сочетаний нагрузок. Производится расчёт здания на прогрессирующее обрушение, с аналогией по СКК «Петербургский» – выключение из работы связей мембраны с опорным контуром.

Ключевые слова: большепролётное здание, мембрана, конечно-элементная модель, ванты, ветровые нагрузки, прогрессирующее обрушение.

DESIGN OF A LARGE-SPAN BUILDING OF THE MULTIFUNCTIONAL SPORTS COMPLEX "FAVORIT" IN ARKHANGELSK

Research article

Kuchin M.V.*

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

* Corresponding author (kuchin.m[at]edu.narfu.ru)

Abstract

In the process of analyzing analog objects, their advantages and disadvantages are identified, and a comparative table is presented, a rational coating scheme is selected. A comparative analysis of three variants of the stabilization system of the applied membrane coating is carried out. A finite-element model was constructed, and calculations of the primary bearing member, such as the coating membrane, the support contour, the central and distant rings, the roof system and the critical coating nodes were performed both analytically and, in the software, and computing complex (SCAD Office), in accordance with various static and geometric parameters and combinations of loads. The calculation of the building for progressive collapse is made, on the example of the «Peterburgskij» SCC – excluding the connections of the membrane with the reference contour.

Keywords: large-span building, membrane, finite-element model, cable stays, wind loads, progressive collapse.

Введение

Большой вклад в развитие данной темы и обзор объектов с подвесными, вантовыми и мембранными покрытиями внесли Морозов А.П. [1], Курбатов О.А. [2], Качурин В.К. [3], Травуш В.И. [4], Колчунов В.И. [5] и др. Данные труды послужили базой для данной работы.

Многофункциональный спортивный комплекс (МФСК) «Фаворит» запроектирован в городе Архангельске по адресу Садовая 8 (на данный момент стадион «Динамо» – рисунок 1) состоит из основной части (крытый многофункциональный зал) и 4-этажной пристройки для административных и вспомогательных целей.

Цель работы: выполнить анализ конструктивных решений на предмет оценки факторов прогрессирующего обрушения.

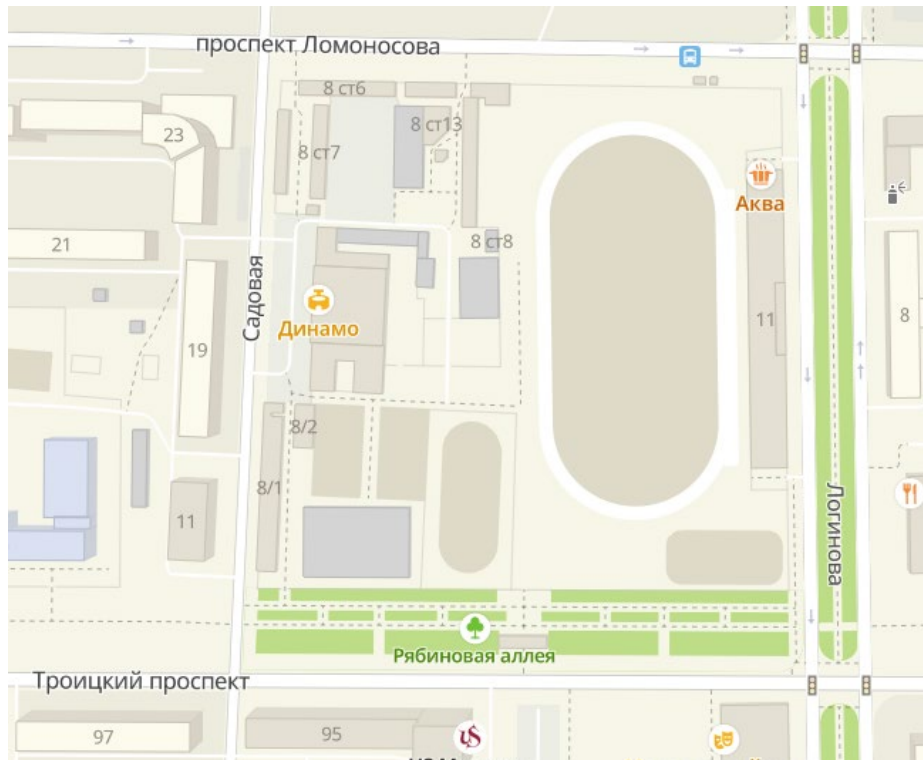


Рис. 1 – Карта-схема участка проектирования [6]

Основная часть

В процессе работы был произведён анализ конструктивных особенностей объектов аналогов для выявления наиболее рационального конструктивного решения покрытия. Сравнивались:

- Дворец спорта «Юбилейный» (СПб): покрытие по радиальной двухпоясной вантовой схеме – рисунок 2;
- Плавательный бассейн в Олимпийском комплексе (МСК): покрытие по схеме жёсткой вантовой фермы – рисунок 3;
- Спортивно-концертный комплекс Петербургский: покрытие по мембранной схеме с системой стабилизации – рисунок 4.

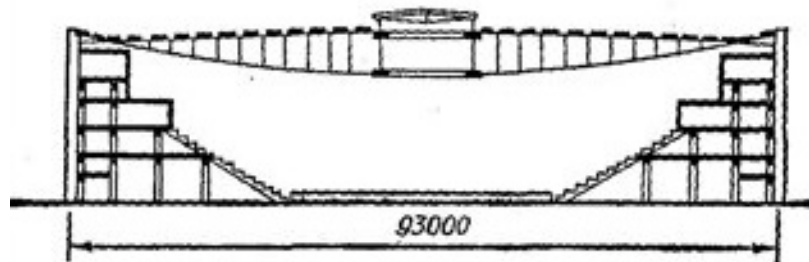


Рис. 2 – Общий вид и конструктивная схема дворца спорта «Юбилейный» диаметром 100 м, г. Санкт-Петербург [7]

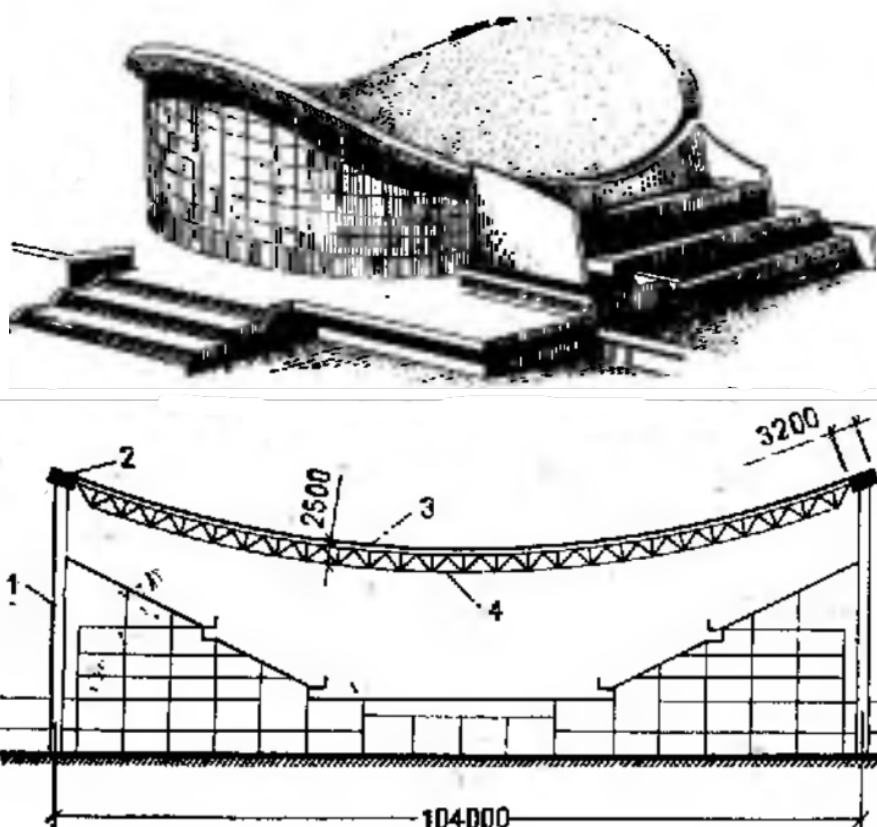


Рис. 3 – Общий вид и конструктивная схема бассейна Олимпийского комплекса пролётом 104 м, г. Москва [7]

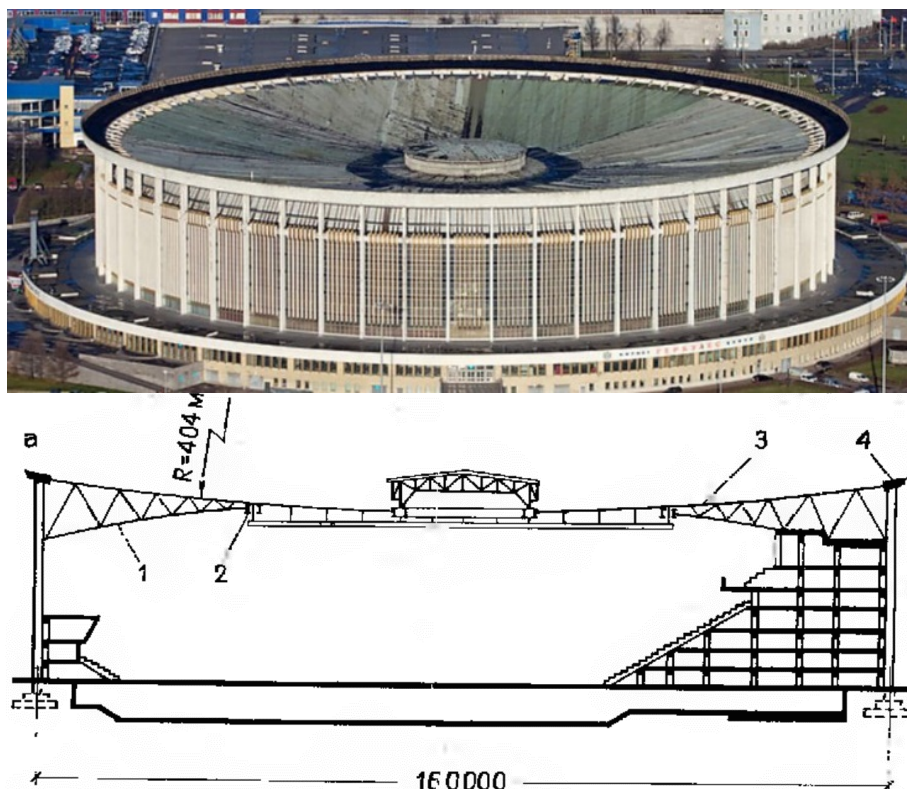


Рис. 4 – Общий вид и конструктивная схема здания СКК «Петербургский», диаметром 160 м, г. Санкт-Петербург [7]

Наиболее предпочтительным и интересным с точки зрения исследования было принято покрытие по мембранной схеме – таблица 1. Кроме всего, СКК «Петербургский» может послужить наглядным примером реального прогрессирующего обрушения в следствии неправильной технологии демонтажа и нарушении ТБ при сносе здания в 2019 г.

Таблица 1 – Обзор объектов-аналогов

Наименование объекта	Конструктивные особенности	Слабые стороны схемы
Дворец спорта «Юбилейный»	Несущий элемент – ванты. Парное расположение вант в одной вертикальной плоскости – малодеформативное покрытие в следствие работы вогнутых вант как несущих, а выгнутых как стабилизирующих. Соединение вант осуществляется оттяжками – канаты (хорошая материалоемкость) и несущая способность.	Наличие массивного и сложно рассчитываемого опорного контура (и не всегда одного) для восприятия распора от вант. Сложность отвода атмосферных вод и снега. Сравнительно сложный монтаж.
Плавательный бассейн в Олимпийском комплексе	Несущий элемент – ферма. Настил не участвует в расчёте на прочность и жёсткость. Использование дешёвых металлов. Сравнительно простой монтаж. Отсутствует необходимость стабилизации покрытия.	Очень металлоёмкие из-за использования профилей вместо канатов. В итоге получается массивная конструкция – уменьшение строительного объёма. Требуется опорный контур с высокой несущей способностью, так как конструкция получается тяжёлой.
СКК «Петербургский»	Несущий элемент – мембрана (металлическая пластина), она же выполняет ограждающую функцию. Высокая индустриализация из-за простоты транспортировки материала.	Требуется стабилизация. Сложные конструктивные решения улов восприятия распора.

Для проектирования были определены климатические параметры холодного и тёплого периодов года, на кафедре ИГОиФ С(А)ФУ были получены геологические условия участка (скважины №2234а и №2236а).

Фундамент: в здании имеется 3 типа фундамента:

- под колонны основной части: фундамент мелкого заложения с несимметричной удлиненной подошвой для предотвращения опрокидывания от горизонтального воздействия;

- под колонны пристройки: фундамент мелкого заложения с симметричной подошвой, жёстким узлом сопряжения колонны с фундаментом;

- под подошву подпорной конструкции колонны основной части – наклонная плита.

Несущий каркас.

- Пристройка: колонны; монолитное ребристое с основными и второстепенными балками перекрытие. Высота пристройки – 15 м (4 этажа высотой по 3,2 м) и подвальный этаж высотой 2,5 м.

- Основная часть: радиально расположенные по диаметру окружности 104 м железобетонные колонны высотой 17,3 м сечением 2 × 0,4 м, воспринимающие вес железобетонного опорного кольца и распора от вантовой системы стабилизации покрытия. Пол первого этажа устроен по монолитной плите по грунту с выравнивающим слоем и устройством деформационных швов.

Покрытие.

- Пристройка: устраиваются аналогично перекрытиям, но с увеличением сечения основных балок и созданием уклонов 1:40 к водосборным воронкам.

- Основная часть.

Мембранное покрытие (стальные листы толщиной от 6 до 12 мм). Стрела провисания мембраны составляет 4,84 м. Покрытие состоит из: мембраны, утеплителя, стяжки, кровельного материала. Для уменьшения ветрового воздействия на внешнем контуре опорного кольца имеются аэродинамические надстройки – ветровые планки [7].

Опорное кольцо К1 железобетонное сечением 3,7 × 1,5 м. Работает на сжатие с изгибом и кручением как замкнутый контур. Армирование кольца, а также узел сопряжения с мембраной приведены на рисунке 5.

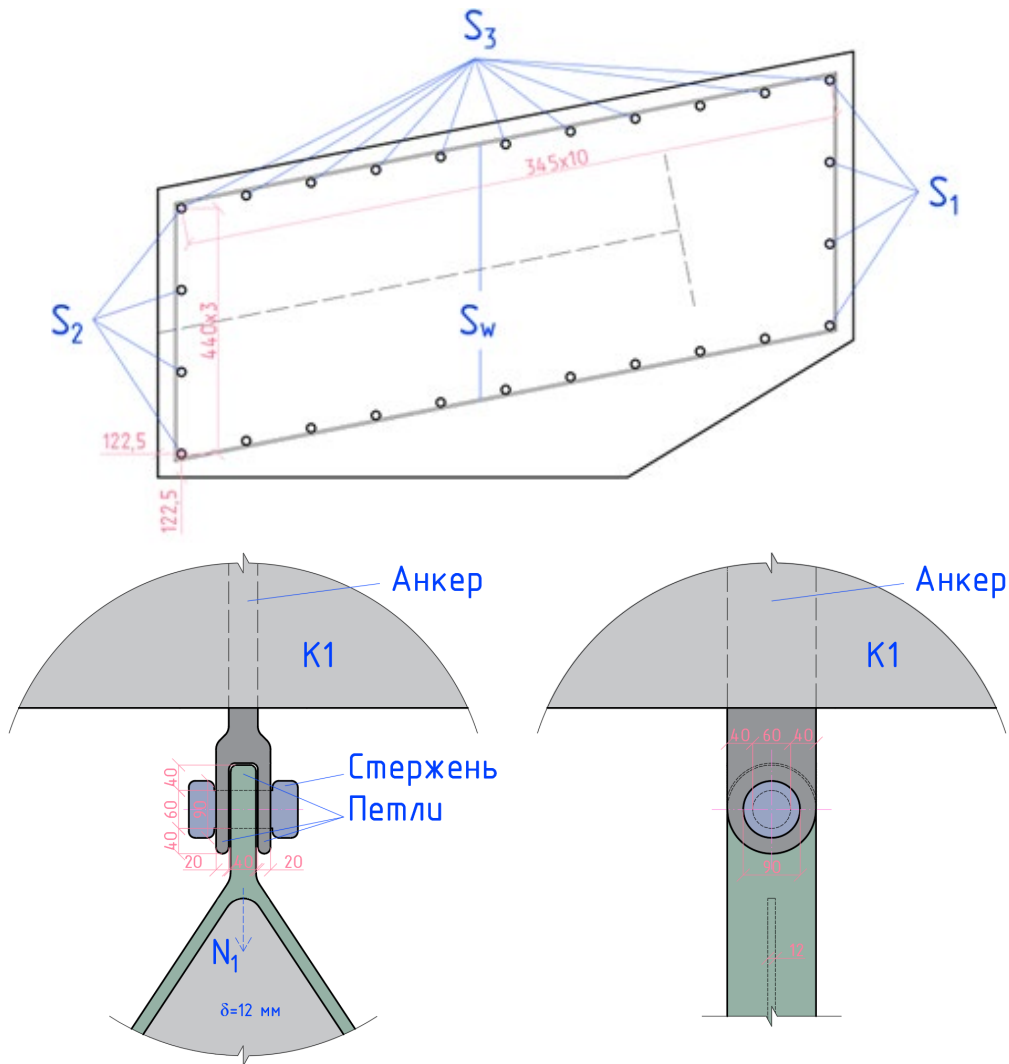


Рис. 5 – Армирование опорного кольца K1 и узел сопряжения с мембраной:

S_1 – арматура продольная растянутая A500 $\varnothing 45$ мм; S_2 – арматура продольная сжатая A500 $\varnothing 45$ мм; S_3 – арматура продольная конструктивная A300 $\varnothing 45$ мм; S_w – арматура поперечная A500 $\varnothing 12$ мм, шаг 180 мм

Центральное кольцо КЗ: стальное, составного сечения, из гнутых по радиусу 10 м стальных швеллеров и двутавров. Испытывают на себе растягивающие усилия от мембраны и вес подвесного оборудования. Узел крепления мембраны к КЗ – рисунок 6.

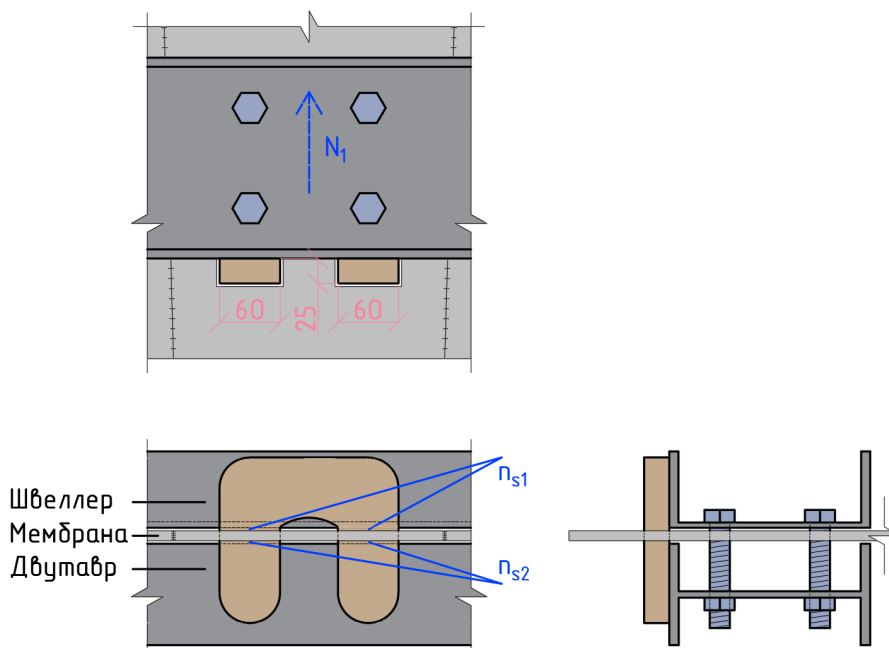


Рис. 6 – Узел крепления мембраны к центральному кольцу КЗ

Среднее кольцо К2: стальное, составного сечения из гнутых по радиусу 50 м спаренных швеллеров. Воспринимает растягивающие усилия от системы стабилизации и веса подвесного оборудования, крепится к мембране через подвески.

Система стабилизации выполнена по схеме Людовского. Ванты натянуты между колоннами и кольцом К2; натяжение вант выполняется домкратами со стороны колонны. Выгиб ванты 1,2 м обязателен для корректной стабилизации покрытия от пассивного ветрового воздействия. Выгиб обеспечивается посредством устройства между мембраной и вантами оттяжек – канатов с натяжением. Узел крепления вант к колоннам и кольцу К2 – рисунок 7.

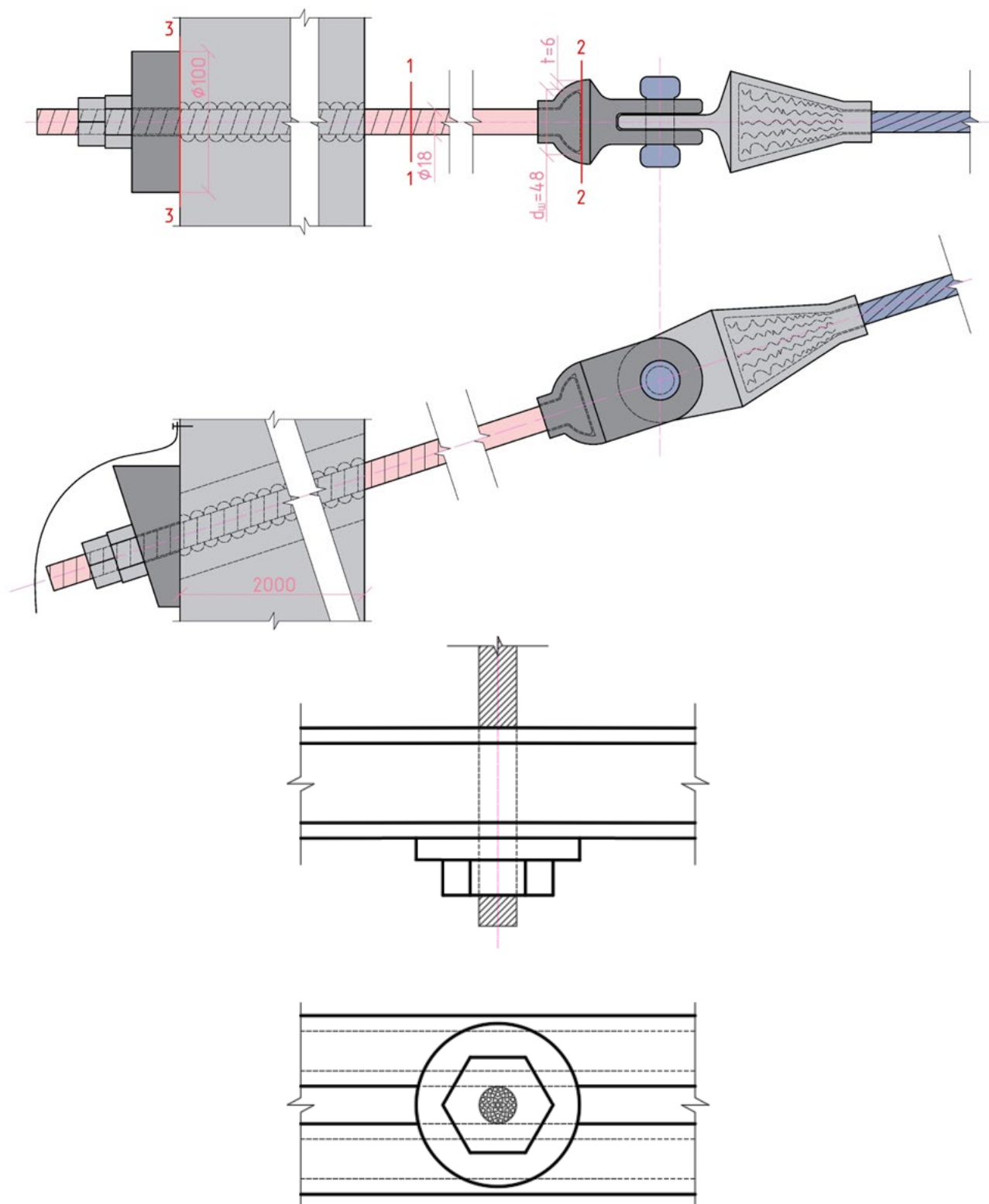


Рис. 7 – Узел крепления ванты к колонне

Ограждающая конструкция стен – вентилируемый фасад с объёмными металлокассетами и рассчитанной толщиной утеплителя толщиной 150 мм.

При разработке проекта использовались программные комплексы: AutoCAD; SCAD Office [8], модель представлена на рисунке 9; Sketch Up. Аналитически (методами строительной механики и сопротивления материалов) рассчитаны ответственные элементы и узлы.

В работе выполнен расчёт фундаментов основной части по СП 22.13330.2016 [9]. Результаты расчёта фундамента – рисунок 8. Так как колонны основной части имеют значительные горизонтальные воздействия, был выполнен аналитический расчёт на потерю устойчивости по плоскому сдвигу подошвы.

Проверка для уровня подошвы удовлетворена		
Расчётное сопротивление грунта в уровне подошвы фундамента	245,773	кН/м ²
Среднее давление от нагрузок (включая вес тела фундамента, грунта и пола) в уровне подошвы фундамента	197,162	кН/м ²
Осадка определена для основания в виде упругого полупространства		
Осадка основания	19,104	мм
Просадка от нагрузок	0	мм
Просадка от веса грунта	0	мм
Сумма осадки и просадки	19,104	мм
Глубина сжимаемой толщи	4,375	м

Отчёт сформирован 2022.05.17 18:02:11 (UTC+03:00) программой ЗАПРОС (64-бит), версия: 21.1.9.9 от 16.04.2021

Рис. 8 – Результаты расчёта фундамента основной части [8]

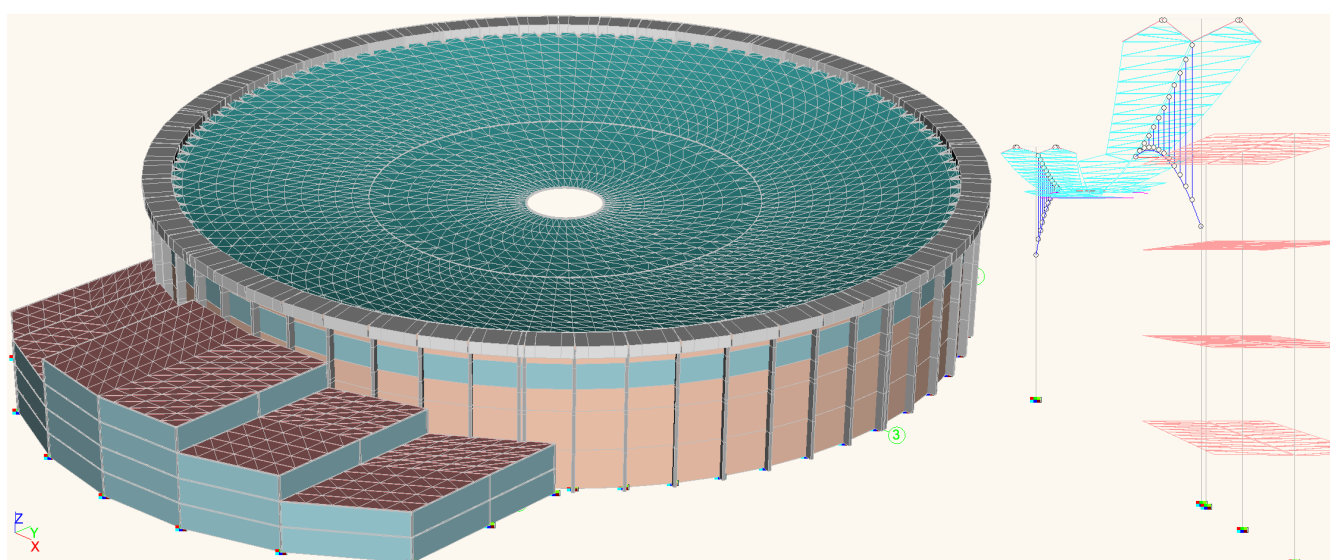


Рис. 9 – Модель, созданная в ПК SCAD++ (общий вид и фрагмент)

Расчёт системы стабилизации на неблагоприятное сочетание: ветровая нагрузка [10], [11], постоянные нагрузки [10]. Выполнено вариантное проектирование системы стабилизации тремя способами:

- 1) пригруз – железобетонное сборное покрытие по мембране из блоков заводского изготовления высотой $h = 0,2$ м;
- 2) введение в конструкцию радиальных изгибно-жестких балок в виде двутавров 35Ш1 по ГОСТ Р 57837–2017 [12];
- 3) изменение геометрии покрытия с помощью натяжения вантовых ферм. Результат расчёта представлен в таблице 2.

После сравнении результатов выбран третий вариант стабилизации.

Таблица 2 – Результаты расчётов вантовых ферм

№ оттяжки	$A_{грi}, м^2$	$N_{отi}, кН$	$A_{отi}, мм^2$	$N_{вант}, кН$	$A_{вант}, мм^2$
1	0,201	1,045	2,569	28,828	70,879
2	0,192	0,998	2,454		
3	0,183	0,951	2,338		
4	0,174	0,904	2,222		
5	0,165	0,857	2,107		
6	0,156	0,810	1,991		
7	0,147	0,763	1,876		
8	0,138	0,716	1,760		
9	0,129	0,669	1,644		
10	0,120	0,622	1,529		
11	0,111	0,575	1,413		

Для мембраны расчёт производится на следующее сочетание нагрузок: постоянная, от оборудования, натяжение вантовой системы и снеговая. На основании расчётов по I ГПС получены меридиональные и кольцевые усилия, а также необходимая толщина мембраны.

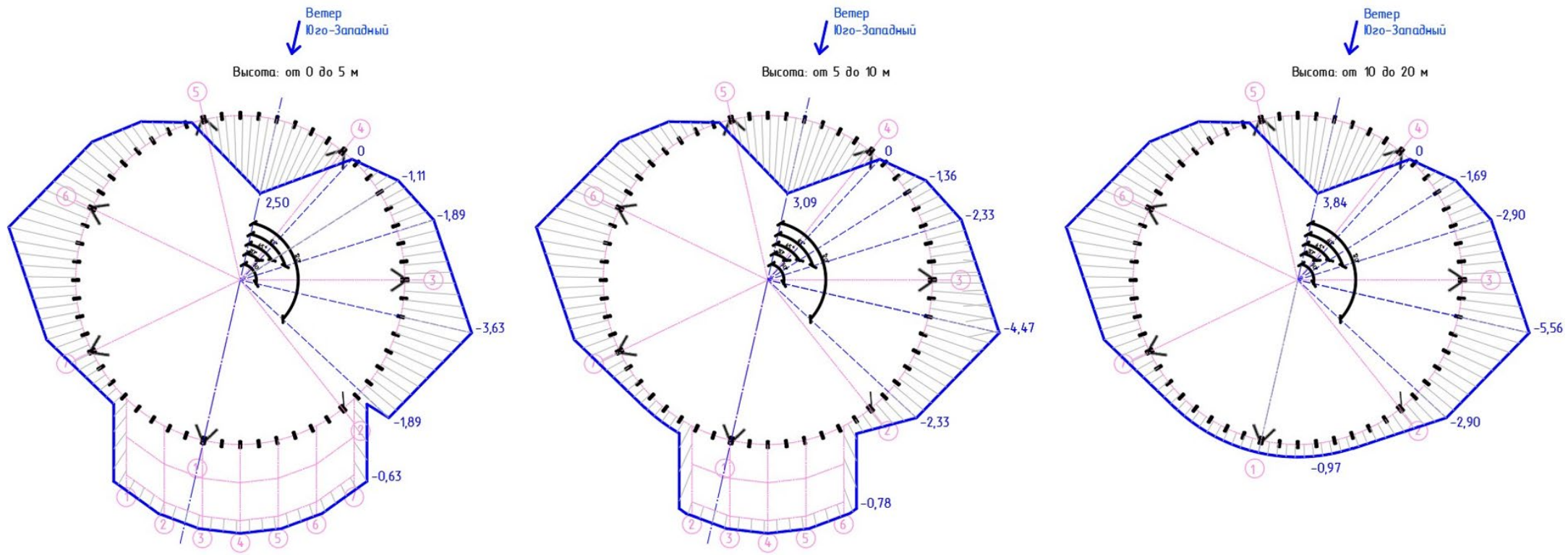
Были рассчитаны следующие узлы: крепление мембраны к центральному кольцу; крепление мембраны к опорному кольцу; крепление стабилизирующего ванта к колонне.

Снеговая нагрузка задана с различным модулем по мембране; ветровая с изменением по модулю и направлению по параболоиде [11]. Ветровое воздействие на фасады согласно схемам на рисунке 10.

Результаты, полученные в численном моделировании близки к полученным аналитическим методом, что свидетельствует о корректности заданной модели.

Крены колонн, деформации мембраны (рисунок 11) – не превышает нормативных значений [10].

Результаты аналитического и модельного расчётов – таблица 3



Расчёт давлений произведён по формуле (2.8) данной работы: $w = (w_0 \cdot k(z_e) \cdot c_e) \cdot (1 + \zeta(z_e) \cdot v)$, где $c_e = c_\beta \cdot k_\lambda$

β, \dots°	c_β	k_λ
0	1	0,63
30	0	
45	-0,7	
60	-1,2	
90	-2,3	
120	-1,2	
>120	-0,4	

$z, \text{ м}$	$k(z_e)$	(z_e)
От 0 до 5	0,5	1,22
От 5 до 10	0,65	1,06
От 10 до 20	0,85	0,92

Рис. 10 – Схемы изменения ветрового воздействия на фасады

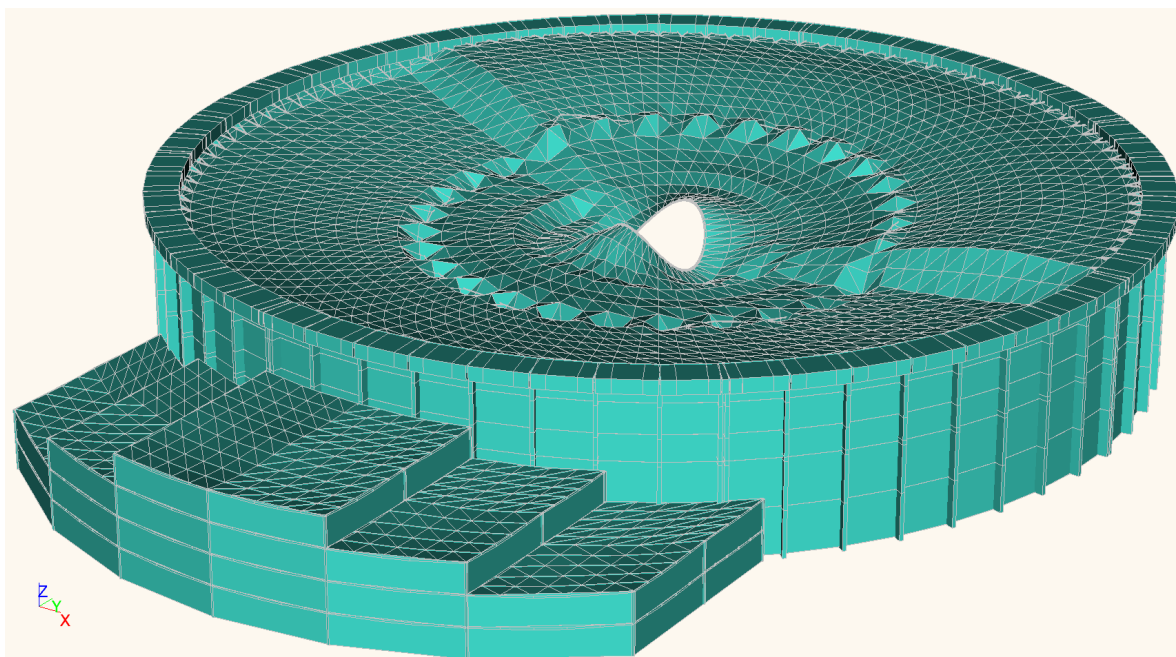


Рис. 11 – Деформированная конечно-элементная модель (SCAD++)

Таблица 3 – Результаты аналитического расчёта и численного моделирования

Показатель	Результат аналитического расчёта	Результат расчёта в SCAD++
Напряжения мембраны кольцевые, кПа	143985	100004,59
Напряжения мембраны меридиональные, кПа	144778,33	169311,23
Усилия продольные в кольце К1, кН	15007	18435,86
Усилия продольные в кольце К2, кН	64,31	224,08
Усилия продольные в кольце К3, кН	1443	1388,71
Прогиб мембраны (I ГПС), м	0,324	0,460

Прогрессирующее обрушение.

Принятые элементы выключения из работы – связи мембраны с опорным кольцом (по аналогии с СКК Петербургский). Расчёт проводится на особое сочетание нагрузок [10].

Рассчитано 2 случая: с обрывом 5 и 15 связей. Результаты продемонстрированы на рисунке 12. На рисунке красным цветом выделены вышедшие из строя элементы, для которых значение максимального по величине коэффициента использования ограничений $K_{max} < 1$ [8]).

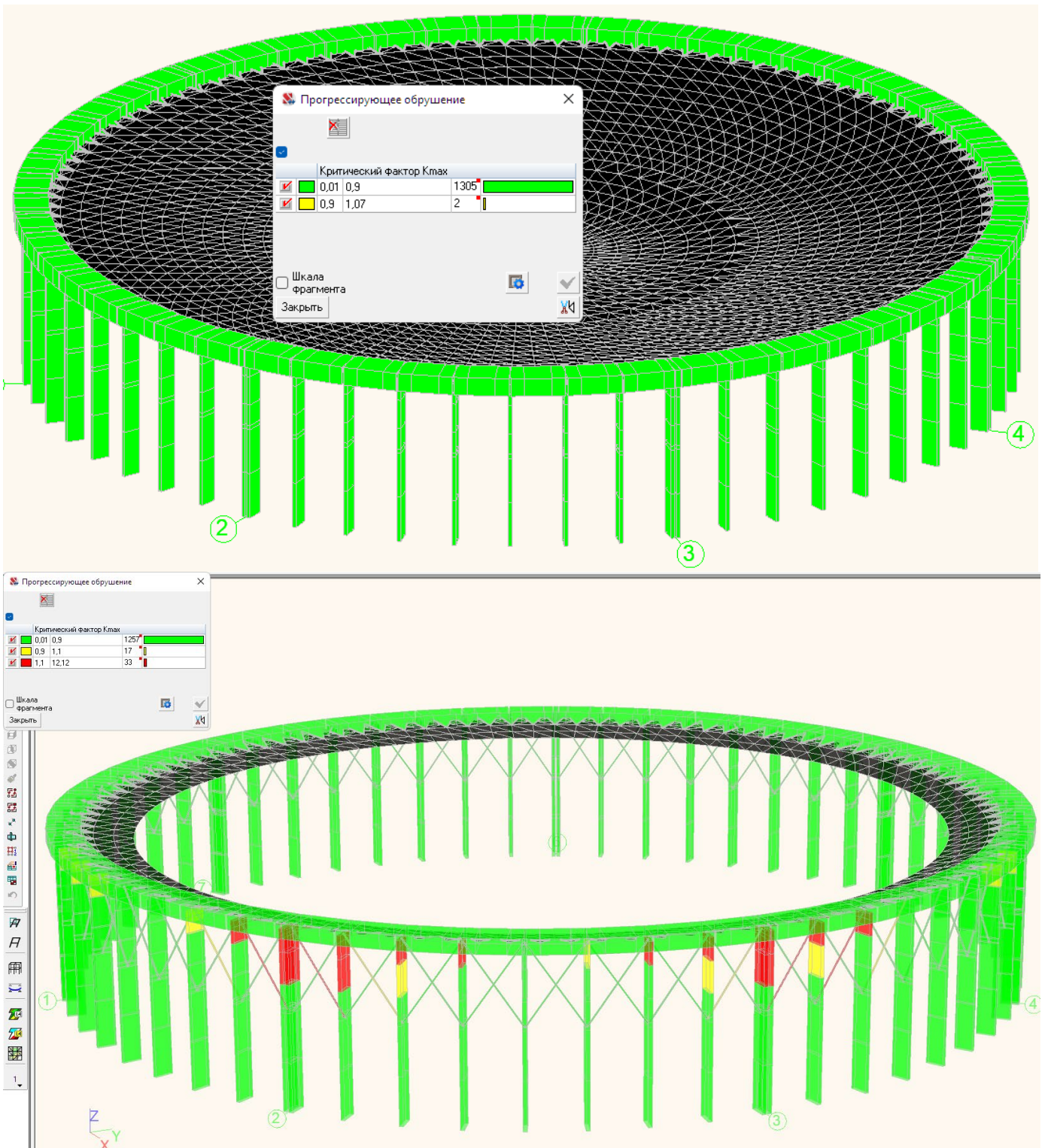


Рис. 12 – Результаты расчёта прогрессирующего обрушения

Выводы

Выполнен анализ особенностей конструктивных решений висячих вантовых и мембранного стального покрытий большепролётных спортивных сооружений.

Запроектировано здание многофункционального спортивного комплекса «Фаворит» в городе Архангельске с учётом опыта эксплуатации подобного объекта – СКК «Петербургский».

Построена математическая конечно-элементная модель здания, произведены расчёты ответственных узлов и элементов большепролётного (104 м) здания с мембранным стальным покрытием и вантовой системой стабилизации.

Выполнен расчёт на прогрессирующее обрушения при выключении из работы связей мембраны с опорным контуром запроектированного здания. Выход из стоя 15 связей является критическим, выход 5 связей не нарушает нормальной работоспособности конструкций.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Морозов А.П. Пространственные конструкции общественных зданий / А.П. Морозов, О.В. Василенко, Б.А. Миронков // Российская государственная библиотека – 1977. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007682023> (дата обращения: 08.01.2022).
2. Курбатов О.А. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы) / Ю.А. Дыховичный, П.Г. Еремеев, О.А. Курбатов и др. // Информационно-образовательный портал Totalarch – 1991. – URL: http://books.totalarch.com/modern_spatial_structures_reinforced_concrete_metal_wood_plastics (дата обращения: 08.01.2022).
3. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчёт / В.К. Качурин // Российская государственная библиотека – 1962. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006298630> (дата обращения: 08.01.2022).
4. Травуш В.И. Современные конструктивно-технологические решения сферических оболочек / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, В.Т. Ерофеев и др. // Научная электронная библиотека (elibrary.ru) – 2012. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18792163> (дата обращения: 08.01.2022).
5. Колчунов В.И. Пространственные конструкции покрытий / В.И. Колчунов, К.П. Пятикрестовский, Н.В. Ключева // Российская государственная библиотека – 2008. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004123148> (дата обращения: 08.01.2022).
6. Онлайн-сервисы 2ГИС // ООО «ДубльГИС». – URL: <https://2gis.ru/arkhangelsk/firm/6896665210391076/40.522794%2C64.549711?m=40.523993%2C64.549332%2F16.43> (дата обращения: 20.08.2021).
7. Трущёв А.Г. Пространственные металлические конструкции: учебное пособие для вузов / А.Г. Трущев // Информационно-образовательный портал Totalarch – 1983. – URL: http://books.totalarch.com/spatial_metal_structures (дата обращения: 23.08.2021).
8. RA.RU.AB86.H01187. Сертификат соответствия. Интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций Structure CAD Office. – от 2019-08-08. – М.: ООО ЦСПС Орган по сертификации программной продукции в строительстве, 2019.
9. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). – Введ. 2017-06-17. – М.: Стандартинформ, 2019.
10. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3). – Введ. 2017-06-04. – М.: Минстрой России, 2020.
11. Сobotка З. Висячие покрытия / З. Сobotка – перевод с чешского В.И. Агаджанов; М: Стройиздат, 1964. – 151 с.
12. ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельным гранями полок. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1). – Введ. 2018-06-01. – М.: Стандартинформ, 2020.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Morozov A.P. Prostranstvennye konstrukcii obshchestvennyh zdaniy [Space structures of public building] / A.P. Morozov, O.V. Vasilenko, B.A. Mironkov // Rossijskaya gosudarstvennaya biblioteka [Russian State Library] – 1977. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007682023> (accessed: 08.01.2022) [in Russian]
2. Kurbatov O.A. Sovremennye prostranstvennye konstrukcii (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy) [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics)] / Y.A. Dykhovichny, P.G. Eremeev, O.A. Kurbatov et al. // Informacionno-obrazovatel'nyj portal Totalarch [Information and educational portal Totalarch] – 1991. – URL: http://books.totalarch.com/modern_spatial_structures_reinforced_concrete_metal_wood_plastics (accessed: 08.01.2022) [in Russian]
3. Kachurin V.K. Teoriya visyachih sistem. Statcheskij raschyot [Theory of cable-stayed systems. Static calculation] / V.K. Kachurin // Rossijskaya gosudarstvennaya biblioteka [Russian State Library] – 1962. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006298630> (accessed: 08.01.2022) [in Russian]
4. Travush V.I. Sovremennye konstruktivno-tehnologicheskie resheniya sfericheskikh obolochek [Modern constructive and technological solutions of spherical shells] / V.I. Travush, V.D. Antoshkin, V.T. Erofeev et al. // Nauchnaya elektronnyaya biblioteka (elibrary.ru) [Scientific electronic library (elibrary.ru)] – 2012. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18792163> (accessed: 08.01.2022) [in Russian]
5. Kolchunov V.I. Prostranstvennye konstrukcii pokrytij [Spatial constructions of coatings] / V.I. Kolchunov, K.P. Pyatikrestovskiy, N.V. Klyueva // Rossijskaya gosudarstvennaya biblioteka [Russian State Library] – 2008. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004123148> (accessed: 08.01.2022) [in Russian]
6. Onlajn-servisy 2GIS [Online services 2GIS] // «2GIS» LLC – URL: <https://2gis.ru/arkhangelsk/firm/6896665210391076/40.522794%2C64.549711?m=40.523993%2C64.549332%2F16.43> (accessed: 20.08.2021) [in Russian]
7. Trushchev A.G. Prostranstvennye metallicheskie konstrukcii: uchebnoe posobie dlya vuzov [Spatial metal structures.: study guide for universities] / A.G. Trushchev // Informacionno-obrazovatel'nyj portal Totalarch [Information and educational portal Totalarch] – 1983. – URL: http://books.totalarch.com/spatial_metal_structures (accessed: 23.08.2021) [in Russian]
8. RA.RU.AB86.H01187. Sertifikat sootvetstviya. Integrirovannaya sistema prochnostnogo analiza i proektirovaniya konstrukcij Structure CAD Office. – ot 2019-08-08 [RA.RU.AB86.H01187. Certificate of conformity. Integrated system of strength analysis and design of structures Structure CAD Office. – dated 2019-08-08]. – М.: Privat CSPS Certification body for software products in construction, 2019 [in Russian]

9. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.01-83* (s Izmeneniyami N 1, 2, 3, 4). – Vved. 2017-06-17. [SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. With Amendments No. 1, 2, 3. – dated 2017-06-17]. – M.: Standartinform, 2019 [in Russian]
 10. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85* (s Izmeneniyami N 1, 2, 3). – Vved. 2017-06-04. [SP 20.13330.2016. Loads and actions. With Amendments No. 1, 2, 3. – dated 2017-06-04]. – M.: Ministry of Construction of Russia, 2020 [in Russian]
 11. Sobotka Z. Visyachie pokrytiya [Hanging coverings] / Z. Sobotka – translated from Czech by V.I. Agadzhanov; M: Stroyizdat, 1964. – 151 p. [in Russian]
 12. GOST R 57837–2017. Dvutavry stal'nye goryachekatanye s parallel'nym granyami polok. Tekhnicheskie usloviya (s Popravkoj, s Izmeneniem № 1). – Vved. 2018-06-01. [GOST R 57837-2017. Hot-rolled steel I-beams with parallel edges of flanges. Specifications. – dated 2018-06-01]. – M.: Standartinform, 2020 [in Russian]
-
-