|  |  |
| --- | --- |
|  | ***Н****аучно-****и****сследовательский* ***ц****ентр* ***СтаДиО*** |
| *Свидетельство СРО «АПОЭК» «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов».* *Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.***123098, Москва, пл. акад. Курчатова, 1, т. (499)706-8810, e-mail:** ***stadyo@stadyo.ru*****, Web-site: *www.stadyo.ru*** |

Инв. № ПЗ/2020-12-1 *“Утверждаю”*

Генеральный директор ЗАО НИЦ СтаДиО

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_***А.М. Белостоцкий***

“\_\_\_” \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2021 г.

**Научно-технический отчет**

по договору № ПЗ/2020-12 от 11 декабря 2020 года

**Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению для реконструкции Объекта (включая Арену и Некапитальные сооружения): «Реконструкция спортивно-концертного комплекса Петербургский», расположенного в квартале, ограниченном проспектом Ю. Гагарина, ул. Кузнецовская, пр. Космонавтов, ул. Бассейная, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса»**

Руководители работы:

член-корр. РААСН, проф., докт. техн. наук

***А. М. Белостоцкий***

зав. отделом расчетных исследований

канд. техн. наук ***Д.С. Дмитриев***

Исполнители:

канд. техн. наук ***А.С. Павлов***

канд. техн. наук ***А.И. Нагибович***

|  |  |
| --- | --- |
|  | ***Н****аучно-****и****сследовательский* ***ц****ентр* ***СтаДиО*** |
| *Свидетельство СРО «АПОЭК» «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов».* *Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.***123098, Москва, пл. акад. Курчатова, 1, т. (499)706-8810, e-mail:** ***stadyo@stadyo.ru*****, Web-site: *www.stadyo.ru*** |

Ивн. № ПЗ/2020-12-1

**Научно-технический отчет**

по договору № ПЗ/2020-12 от 11 декабря 2020 года

**Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению для реконструкции Объекта (включая Арену и Некапитальные сооружения): «Реконструкция спортивно-концертного комплекса Петербургский», расположенного в квартале, ограниченном проспектом Ю. Гагарина, ул. Кузнецовская, пр. Космонавтов, ул. Бассейная, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса»**





# Введение

В соответствии с заданием на проектирование, календарным планом, и рабочими соглашениями в отчете представлены:

• Краткое описание природных условий района расположения проектируемого объекта.

• Описание численных методик, алгоритмов и реализующих программных комплексов, расчета статического и динамического напряженно-деформированного состояния.

• Описание разработанных и верифицированных подробных конечно-элементных моделей Объекта, адекватно отражающие их геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние (глава 3).

• Методику расчета на прогрессирующее обрушение в соответствии с СП 385.1325800.2018.

• Результирующие параметры напряженно-деформированного состояния, прочности, устойчивости и динамики несущих конструкций Объекта при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий.

В заключении, на базе выполненных исследований делается вывод о достоверности полученных расчетами критериальных параметров, определяющих прочность, устойчивость конструкций Объекта к прогрессирующему обрушению.

# Исходные данные

Материал для стальных конструкций:

– для пластин и труб всей системы распорок (внутри фермы и на крыше) толщиной стенки до 10 мм включительно – С345-5, с толщиной стенки более 10 мм – С355-5.

– для основных труб в фермах (диаметр более 500 мм) — C390 или аналог.

При расчете на прогрессирующее обрушение принимаются нормативные прочностные и деформационные характеристики материалов. Повышающие коэффициенты по не учитываются.

Нагрузки и воздействия:

### - Постоянная нагрузка

### - Полезная нагрузка

### - Снеговая нагрузка

Расчет конструкций покрытия на устойчивость к прогрессирующему обрушению выполняется на семь расчетных сценариев:

– Сценарий 1. Разрушение колонны А12, входящей в связевой блок.

– Сценарий 2. Разрушение опорной колонны основной фермы А13.

– Сценарий 3. Разрушение нижнего пояса основной фермы А13.

– Сценарий 4. Разрушение верхнего пояса основной фермы А13.

– Сценарий 5. Разрушение раскоса основной фермы А9.

– Сценарий 6. Разрушение продольной фермы А11-А10.

– Сценарий 7. Разрушение элемента связи А12-А11.

В качестве базовых сценариев для монолитных железобетонных конструкций высотной части сооружения были выбраны следующие зоны расположения локального разрушения:

– Сценарий 1. Разрушение колонны по оси 132/И;

– Сценарий 2. Разрушение колонны по оси 152/И;

– Сценарий 3. Разрушение колонны по оси 136/Е;

– Сценарий 4. Разрушение колонны по оси 514/К3;

– Сценарий 5. Разрушение колонны по оси 236/И;

– Сценарий 6. Разрушение колонны по оси 232/Е;

– Сценарий 7. Разрушение колонны по оси 614/К3;

– Сценарий 8 (9). Разрушение колонны по оси 216/И;

– Сценарий 9 (10). Разрушение колонны по оси 224/И;

– Сценарий 10 (11). Разрушение колонны по оси 600/К3;

– Сценарий 11 (12). Разрушение колонны по оси 224/Е.

Для монолитных конструкций стилобатной части были разработаны следующие сценарии локального разрушения:

– Сценарий 12. Разрушение колонны по оси 620/К10;

– Сценарий 13. Разрушение колонны по оси 516/К11;

– Сценарий 14. Разрушение колонны по оси 514/К4;

– Сценарий 15. Разрушение колонны по оси 726/К4;

– Сценарий 16. Разрушение колонны по оси 708/К6.

Расчетные сценарии прогрессирующего обрушения для трибун сформированы для трех вариантов, в каждом из которых отказывает один из двух опорных узлов подтрибунных косоуров:

– Сценарий 17. Разрушение опорного узла подтрибунного косоура по оси 348 верхнего яруса трибун;

– Сценарий 18. Разрушение опорного узла подтрибунного косоура по оси 356 нижнего уровня нижнего яруса трибун;

– Сценарий 19. Разрушение опорного узла подтрибунного косоура по оси 356 среднего яруса трибун.

# Программное обеспечение расчетов

Для дискретизации по пространству и решения соответствующих краевых задач применяется универсальный и мощный современный численный метод механики – метод конечных элементов (МКЭ). Матричное уравнение движения геометрически линейной системы (малые перемещения и деформации) в форме метода перемещений



Для решения системы линейных алгебраических уравнений статического равновесия



В рамках спектральных динамических расчетов (в частности, и для анализа пульсационной составляющей ветровой нагрузки) или самостоятельно решается частная проблема собственных значений





Определение напряженно-деформированного состояния при регламентированных статических и динамических (ветровая пульсация) воздействиях производится в верифицированном программном комплексе ЛИРА-САПР 2019 R2.1, реализующем метод конечных элементов, а также требования нормативных сводов правил по нагрузкам и воздействиям и на проектирование стальных и железобетонных конструкций.

# Расчетные модели

Заказчиком переданы файлы AutoCAD с комплектом чертежей актуального проектного варианта объекта «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу: Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, пр. Юрия Гагарина, д. 8, кадастровый номер 78:14:0007633:3082, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса».

На основании анализа и обобщения этих материалов в программных комплексах ЛИРА-САПР были построены и верифицированы пространственные оболочечно-стержневые конечно-элементные модели несущих конструкций объекта.

``````````````````````````



Рис. 1. — Общий вид на полную расчетную модель

## Методика расчета на прогрессирующее обрушение стального покрытия

Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению производится в статической постановке согласно СП 385.1325800.2018. Расчетная комбинация включает гравитационные постоянные, длительные нагрузки и длительную часть кратковременных нагрузок, полученных с коэффициентом надежности по нагрузке 1.0.

Расчет производится в линейно-упругой постановке с проверкой сечений элементов по критериям.

На начальном этапе производится монтаж конструкции в состоянии, соответствующем режиму работы на основные сочетания.

На следующем этапе производится удаление конечного элемента по сценарию локального разрушения.

По полученным усилиям на сформированные комбинации, включающие пять типов снеговых нагрузок, производится проверка сечений по первому предельному состоянию на соответствие требованиям СП 16.13330.

## Методика расчета на прогрессирующее обрушение железобетонных конструкций

Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению производится в статической постановке согласно СП 385.1325800.2018. Расчетная комбинация включает гравитационные постоянные, длительные нагрузки и длительную часть кратковременных нагрузок, полученных с коэффициентом надежности по нагрузке 1.0.

Расчет производится в линейно-упругой постановке с проверкой сечений элементов по критериям СП 63.13330.

На начальном этапе производится монтаж конструкции в состоянии, соответствующем режиму работы на основные сочетания.

На следующем этапе производится удаление конечного элемента по сценарию локального разрушения.

По результатам расчетов производится расчет теоретического армирования конструкций по прочности, соответствующего особым комбинациям при локальном разрушении, которое сравнивается с расчетным армированием, полученным для основных сочетаний нагрузок и воздействий.

#

# Результаты расчетов стального покрытия

По результатам проведенных проверок коэффициенты несущей способности сечений по первому предельному состоянию (прочность, устойчивость) не превышают 0.98 (в запас не учитывается коэффициент условий работы, повышающий расчетное сопротивление стали и равный 1.1 по 5.3), кроме случая по сценарию 3.

Для сценария 3, согласно проведенным расчетам, раскосы связевых ферм (отмечен коэффициент превышения несущей способности 1.18) сохраняют устойчивое положение, напряжения и деформации находятся в пределах упругой работы, что объясняется запасом по действительной схеме работе стержня и запасе определения расчетной длины.

Нижний пояс связевой фермы по отдельному сечению имеет переход в пластическую стадию, что отмечается в проверках по СП 16.13330 с коэффициентом превышения 1.25 по несущей способности, но напряжения (398 МПа при 432.5 МПа предельных) и деформации (пластические деформации 1.4% при 7% предельных) не выходят за регламентированные СП 385.1325800.2018.



Рис. 2. — Сценарий 3. Разрушение нижнего пояса основной фермы А13. Вертикальные перемещения, мм

##

# Результаты расчета железобетонных конструкций

На основании проектных данных были разработаны и проанализированы 16 сценариев инициирующего локального разрушения с целью исследования устойчивости железобетонных конструкций к прогрессирующему обрушению.

В таб. 6.1 представлены сводные данные по изменению отношения площадей расчетного армирования по расчету на прогрессирующее обрушение к расчету на основные комбинации.

Таб. — Сводные данные по отношению расчетного армирования по расчету на прогрессирующее обрушение к расчету на основные комбинации

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Сценарий | Нижняя | Верхняя | Процент растяжения | Процент сжатия |
| 1 | 3.18 | 1.31 | 4.97 | 0.35 |
| 2 | 1.57 | 1.50 | 5.91 | 0.98 |
| 3 | 2.00 | 0.73 | 4.77 | 0.29 |
| 4 | 3.60 | 1.45 | 4.59 | 0.98 |
| 5 | 2.08 | 0.99 | 9.36 | 0.24 |
| 6 | 3.17 | 0.97 | 13.73 | 0.49 |
| 7 | 3.18 | 1.36 | 4.45 | 0.94 |
| 8 | 2.16 | 1.89 | 9.00 | 0.21 |
| 9 | 2.00 | 1.73 | 5.29 | 0.21 |
| 10 | 3.23 | 1.39 | 4.72 | 0.83 |
| 11 | 1.00 | 0.63 | 3.86 | 0.18 |
| 12 | 3.36 | 1.65 | 1.34 | 1.00 |
| 13 | 3.11 | 0.81 | 2.88 | 0.48 |
| 14 | 1.00 | 1.00 | 0.92 | 1.03 |
| 15 | 1.00 | 0.72 | 0.62 | 0.95 |
| 16 | 2.56 | 1.04 | 4.45 | 1.00 |
| Макс. | **3.60** | **1.89** | **13.73** | **1.03** |
| Мин. | **1.00** | **0.63** | **0.62** | **0.18** |
| Сред. | **2.39** | **1.20** | **5.05** | **0.64** |

На основании проведенных расчетов для участков плит перекрытий, расположенных над удаляемым конструктивным элементом необходимо усиление нижнего слоя армирования плит, как для пролетного участка, согласно приведенному графическому материалу. Средний коэффициент увеличения нижнего «надколонного» армирования 2.38, максимальный — 3.6. Наиболее опасные с точки зрения пролетного армирования зоны: у края перекрытия и в углу перекрытия, для который полная площадь армирования на погонный метр может достигать 26 см2/м.



Рис. 3. — Сценарий 3. Разрушение колонны по оси 136/Е. Колонны. Процент армирования

Для участков плит перекрытий в зоне соседних вертикальных элементов (колонн и перекрытий) требуется усиление надопорной арматуры согласно приведенному графическому материалу. Средний коэффициент увеличения надопорного армирования 1.19, максимальный — 1.89. При этом на стадии рабочего проектирования рекомендованное усиление надопорного участка перекрытий в зоне за границей капителей (при фоновом d12 А500 с шагом 200 мм) должно быть не менее d20 A500 с шагом 200 мм.

Конструктивные элементы колонн, расположенные над удаляемым элементом, работают на растяжение, что приводит к повышенному проценту армирований в уровне покрытия. Средний коэффициент увеличения армирования колонн от растяжения в результате прогрессирующего до 5.8 к теоретическому армированию.

# Выводы

Научно-исследовательская работа, выполненнаяе ЗАО НИЦ СтаДиО по договору № ПЗ/2020-12 от 11 декабря 2020 года «Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению для реконструкции Объекта (включая Арену и Некапитальные сооружения): «Реконструкция спортивно-концертного комплекса Петербургский», расположенного в квартале, ограниченном проспектом Ю. Гагарина, ул. Кузнецовская, пр. Космонавтов, ул. Бассейная, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса» и представленная в настоящем отчете, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Разработана и верифицирована пространственная оболочечно-стержневая конечноэлементная модель системы «свайное основание - сооружение» спортивно-концертного комплекса Петербургский и проведены расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению в статической постановке согласно СП 385.1325800.2018.
2. Выполнены расчеты конструкций покрытия (в рамках общей модели) на устойчивость к прогрессирующему обрушению в статической линейной постановке по 7 сценариям локальных разрушений.
3. Для секторов железобетонных конструкций проанализированы 16 выбранных сценариев локальных разрушений, на основании которых получены параметры напряженно-деформированного состояния и соответствующего ему расчетного армирования. С целью защиты от прогрессирующего обрушения все перекрытия в зонах опирания на колонны, углы сопряжения стен и торцы стен должны быть усилены каркасами от продавливания, равными по прочности бетонному сечению.
4. На основании выполненных расчетных исследований и в соответствии с пп. 2-3 настоящего заключения устойчивость сооружения к прогрессирующему обрушению по рассмотренным сценариям обеспечена.