

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ЮФУ)**

УДК 539.3

Код ГРНТИ 30.19.15

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор института математики,  
механики и компьютерных наук  
им. И.И. Воровича

\_\_\_\_\_ М.И. Карякин  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

**ОТЧЕТ**

**по научно-исследовательской работе**

**«Анализ и оптимизация проекта усиления арочного структурного покрытия  
на ТРЦ «Горизонт» с использованием Программы N\_2015»,  
выполняемой ЮФУ в соответствии с договором №213-01-14/2016-20 от 01.06.2016.**

**вид отчета:** заключительный

**Руководитель проекта** \_\_\_\_\_ **А. В. Наседкин**

Ростов-на-Дону

2016

## Список исполнителей

### **Руководитель темы,**

доктор ф-м наук, профессор \_\_\_\_\_ А. В. Наседкин (введение, заключение,  
общее редактирование)

### **Исполнители темы:**

Доктор ф-м наук, профессор \_\_\_\_\_ С. Н. Шевцов (раздел 2)

Канд. ф-м наук \_\_\_\_\_ А. А. Ляпин (разделы 1, 2)

Канд. техн. наук \_\_\_\_\_ С. А. Ляпина (раздел 3)

Ст. научн. сотр. \_\_\_\_\_ Е. В. Рожков (раздел 2)

### **Соисполнители:**

Консультант по N\_2015

канд. техн. наук \_\_\_\_\_ Б. А. Пушкин (разделы 1, 2)

Инженер \_\_\_\_\_ П. Е. Гузиков (раздел 3)

ООО "СК ЮГЭНЕРГОСПЕЦСТРОЙ"

## Содержание

	стр.
<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Раздел 1. Численный анализ вариантов усиления каркаса покрытия</b>	<b>5</b>
1.1 Исходные данные и результаты численного анализа каркаса покрытия	5
1.2 Оценка объемов работ по усилению каркаса покрытия	6
1.3 Результаты верификационных испытаний программы N_2015	7
1.4 Технические решения по усилению покрытия	8
<b>Раздел 2. Экспериментальное исследование жесткости сопряжений</b>	<b>10</b>
2.1 Исходные положения	10
2.2 Методика определение $R_p$	11
2.3 Методика и результаты определение $R_{\Sigma}$	11
2.4 Методика и результаты сравнения значений $R_{\Sigma}$ и $R_p$	14
<b>Раздел 3. Техничко-экономический анализ вариантов усиления</b>	<b>15</b>
3.1 Вводные замечания	15
3.2 Затраты на усиление сжатых стержней по СНиП II-23-81*	15
<b>Заключение</b>	<b>17</b>
<b>Приложения</b>	<b>18</b>
<u>Приложение 1.</u> Оценка технического состояния арочного структурного покрытия...	
<u>Приложение 2.</u> Задание на проектирование. <i>Проект усиления арочных покрытий...</i>	
<u>Приложение 3.</u> ТЗ по расчету структуры на дополнительные нагрузки от 18.03.16 г.	
<u>Приложение 4.</u> Сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00877	
<u>Приложение 5.</u> Свидетельство о поверке NIVEL 210 №39422-08	
<u>Приложение 6.</u> Верификация программы N_2015 средствами пакета ANSYS	
<u>Приложение 7.</u> Нагрузки, передаваемые на колонны от каркаса покрытия	

## Введение

Объект исследования - структурный каркас арочного покрытия над ресторанным двориком в ТРЦ «Горизонт», который был спроектирован и возведен кисловодским ЗАО «Завод металлоконструкций» в 2004г согласно ТЗ от 06.04.04г ОАО «Ростовский Промстройинипроект».

В каркасе покрытия применены элементы системы «Кисловодск», в которых вместо муфт S32 использованы муфты S36. При этом контактные поверхности муфт и болтов выполнены сферическими для плотного сопряжения с коническими поверхностями узловых элементов и втулок.

В 2011 году ОАО «Ростовский Промстройинипроект» провел детальное обследование технического состояния упомянутого каркаса покрытия, которое выявило ряд отклонений от проекта. В 2012 году ЗАО «Завод металлоконструкций» выпустил документ «Оценка технического состояния арочного структурного покрытия корпуса 4 (литера Х9) ТРЦ «Горизонт» с учетом результатов обследования, выполненного ОАО Институт «Ростовский Промстройинипроект» в 2011г.». Этот документ (Приложение 1) принят за основу в настоящем исследовании.

Исследование выполняется на основании Договора между ЮФУ и РО ЦНИИПСК от 01.06.16г, который заключен в соответствии с ТЗ ТРЦ «Горизонт» от 18.03.16 г (Приложение 2). В соответствии с этим ТЗ РО ЦНИИПСК разрабатывает проект усиления каркаса покрытия, обеспечивающий восприятие дополнительной временной нагрузки от рекламных конструкций, подвешиваемых к каркасу (Приложение 3).

Согласно Договору от 01.06.16г ЮФУ должен передать РО ЦНИИПСК исходные данные для проектирования, позволяющие найти экономически оптимальный вариант усиления каркаса. При этом должны быть удовлетворены современные нормативные требования, изложенных в актуализированных редакциях СНиП, а именно, в СП 16.13330.2011 и СП 20.13330.2011.

Выполнение этого задания стало возможным благодаря разработке и сертификации программы расчета структурных каркасов N-2015 (Приложение 4), которая вполне соответствует п.10.2.6 СП 16.13330.2011. Сведения о программе N-2015 можно найти по адресу <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/>.

Программа N-2015 позволяет определить параметры, влияющие на несущую способность  $N^*$  каждого сжатого стержня и расчетное значение  $N^*$  с учетом жесткости его сопряжения со смежными элементами каркаса. Однако, для надежного применения

программы N-2015 в данном конкретном случае потребовалось в ходе исследования поставить и решить две задачи:

- 1) верифицировать процедуру вычисления  $N^*$ ;
- 2) экспериментально подтвердить, что в исследуемом каркасе покрытия фактические жесткости сопряжения элементов не ниже принимаемых в расчете.

Процедура вычисления параметров сжатого стержня по программе N-2015 верифицирована с применением программного комплекса ANSYS (Приложение 6). Результаты верификация приведены в разделе 1 (п. 1.3.2).

Методика, средства и результаты экспериментального исследования жесткости сопряжения элементов в структурном каркасе покрытия ТРЦ «Горизонт» описаны в разделе 2. Наиболее ответственным из использованных средств измерения является инклинометр NIVEL 210 фирмы Leica с погрешность измерения углов наклона 1 угл.сек.

Свидетельство о поверке NIVEL 210 №39422-08 приведено в Приложении 5.

## **Раздел 1. Численный анализ вариантов усиления каркаса покрытия**

### **1.1 Исходные данные и результаты численного анализа каркаса покрытия**

1.1.1 Цель анализа состоит в том, чтобы получить исходные данные для проектирования и оптимизации проекта усиления каркаса.

Существующий каркас покрытия симметричен относительно вертикальной продольной плоскости Y-Z. На данном этапе анализа, когда на каркас воздействуют только нагрузки симметричные относительно той же плоскости, анализу подлежит половина каркаса. Она снабжена в плоскости симметрии дополнительными опорными связями, которые препятствуют движению узлов каркаса вдоль оси X.

Принципиальный момент в проекте усиления каркаса – введение трех затяжек, соединяющих опорные узлы арочной структуры. Схема расположения затяжек, усиливающих каркас, приведена на листе 2.

Размеры сечений на схемах расположения элементов (листы 1.1 и 1.2) даны в таблице 1.

1.1.2 Приняты расчетные нагрузки на каркас покрытия следующих типов:

1. Постоянная от собственного веса конструкций покрытия:

- на неостекленной части покрытия - 90 кг/м<sup>2</sup>;

- на остекленной части покрытия - 80 кг/м<sup>2</sup>.

2. Временная снеговая:

2a - равномерно распределенная - 120 кг/м<sup>2</sup>;

2b - со снеговым мешком у стены  $\mu = 4.7$ .

3. Временная от рекламных конструкций:

3a - в соответствии с ТЗ (прил.3) первый вариант;

3b - в соответствии с ТЗ (прил.3) второй вариант;

3c - в соответствии с ТЗ (прил.3) третий вариант.

Нагрузки типа 1 и 2 приведены к узловым нагрузкам в уровне верхнего пояса каркаса. Нагрузки типа 3 в соответствии с ТЗ (прил.3) представлены в виде узловых ( $P=0.45t_c$ ) в уровне нижнего пояса.

1.1.3 Алгоритм и результаты вычисления усилий в элементах каркаса.

Минимальное и максимальное значения расчетного усилия  $N$  для каждого стержня каркаса определяются в следующей последовательности.

1.1.4 По программе N\_2015 вычисляются векторы расчетных усилий при каждом из принятых вариантов нагружения в отдельности:

$N_1$  - соответствующий нагрузке от собственного веса конструкций покрытия;

$N_{2a}$  - соответствующий равномерно распределенной снеговой нагрузке;

$N_{2b}$  - соответствующий снеговой нагрузке при наличии мешка;

$N_{3a}$  - соответствующий нагрузке от рекламных конструкций в первом варианте;

$N_{3b}$  - соответствующий нагрузке от рекламных конструкций во втором варианте;

$N_{3c}$  - соответствующий нагрузке от рекламных конструкций в третьем варианте.

1.1.5 Для каждой группы векторов, соответствующих однотипным и различающимся по схеме нагрузкам, формируются векторы минимальных и максимальных значений расчетного усилия:

$N_{2min}, N_{2max}$  - соответствующие снеговой нагрузке;

$N_{3min}, N_{3max}$  - соответствующие нагрузке от рекламных конструкций.

Эти векторы вычисляются автоматически по специальной дополнительной программе, которая сравнивает значения усилий в строках векторов, полученных по п.1.3.1, выбирает и фиксирует минимальные и максимальные значения усилий. При этом в выборе участвуют и «нулевые» векторы, которые соответствуют отсутствию временных нагрузок.

1.1.6 Вычисляются векторы минимальных и максимальных усилий, соответствующие суммарному воздействию всех видов нагрузок:

$$N_{min} = N_1 + N_{2min} + N_{3min} ;$$

$$N_{max} = N_1 + N_{2max} + N_{3max} .$$

Полученные таким путем результаты численного анализа выведены на схему расположения элементов каркаса (листы 3, 4).

1.1.7 К результатам численного анализа каркаса покрытия относятся нагрузки, которые покрытие передает на колонны здания, представленные в виде таблицы в Приложении 7. Указанное в таблице направление нагрузок соответствует системе координат, принятой на схемах расположения элементов (листы 1.1, 1.2); нумерация колонн соответствует их маркировке на тех же листах.

## 1.2 Оценка объемов работ по усилению каркаса покрытия

1.2.1 Сравнительной оценке подлежат объемы работ по усилению или замене стержней каркаса, которые необходимы при учете и без учета изгибного взаимодействия стержней в узлах. Учет этого взаимодействия, позволяет увеличить расчетную несущую способность  $N^*$  сжатых стержней в той или иной мере, которая зависит от жесткости сопряжения  $\rho$  стержневых и узловых элементов структурного каркаса.

Лабораторные измерения  $\rho$  на натурных образцах сопряжения элементов «Кисловодск» позволили получить уточненные значения расчетной несущей способности  $N^*$  сжатых стержней, которые использованы в программе N\_2015 ( графа «сжатие с защемлением» в таблице 1.1).

Таблица 1.1

Марка №	Сечение	А мм <sup>2</sup>	Минимальная несущая способность (Тс) стержней каркаса		
			Сжатие без защемления	Сжатие с защемлением	Растяжение
1	Ф48х2.6	371	1.7	3.6	6.9
2	Ф57х3.2	541	3.3	5.9	10.1
3	Ф76х3.0	688	8.1	10.2	12.8
4	Ф102х4.0	1230	19.9	21.0	18.0
5	Ф114х6.0	2035	35.2	36.0	18.0
6	Ф127х6.0	2280	39.3	40.0	18.0

1.2.2 На листах 3, 4 приведены схемы расположения элементов каркаса, где у каждой линии, изображающей стержень, приведена цифра крупным кеглем, соответствующая его марке в таблице 1. Далее, у каждого стержня мелким кеглем дано значение расчетного усилия в нем, причем на листах 3, эти значения соответствуют  $N_{\min}$ , а на листах 4 -  $N_{\max}$ , (из значений суммарных усилий, полученных по п.1.3.3).

Путем сравнения расчетного значения усилия  $N_{\min}$  или  $N_{\max}$ , приведенного на схеме для каждого стержня, с его несущей способностью на сжатие или растяжение из табл. 1 можно определить, нуждается ли этот стержень в усилении или замене.

На листах 3.1 и 3.2 прямоугольниками отмечены сжатые стержни, нуждающиеся в усилении, когда их защемления не учтены. Их количество - 120 шт.

На листах 4.1 и 4.2 окружностями отмечены те стержни, в которых усилия превышают их несущую способность при растяжении. Они подлежат замене, их общее количество в каркасе – 6 шт.



Таким образом, с учетом заземления сжатых стержней по программе N\_2015 общее количество стержней, требующих усиления или замены уменьшается от 126 до 6 шт.

Эта оценка носит сугубо предварительный характер. Она лишь показывает, каков экономический потенциал уточненного метода расчета несущей способности сжатых стержней по программе N\_2015 и подтверждает целесообразность намеченных экспериментальных исследований, а также дополнительных верификационных испытаний программы N\_2015.

### 1.3 Верификационные испытания программы N\_2015

1.3.1 К числу функций, выполняемых по программе N\_2015, относится автоматическое вычисление коэффициента расчетной длины  $\mu$  для каждого сжатого стержня каркаса и соответствующего значения несущей способности стержня. Особенность и сложность этой операции состоит в анализе неплоской формы продольного изгиба стержня. Поэтому возникла необходимость дополнительных верификационных испытаний программы N\_2015 в отношении анализа работы сжатого стержня.

Сущность этих испытаний, проведенных с использованием программного комплекса ANSYS, состоит в том, чтобы на ряде примеров получить средствами ANSYS значения тех же параметров, которые были ранее вычислены по программе N\_2015, а затем сравнить результаты, полученные средствами N\_2015 и ANSYS.

1.3.2 Выполнено четыре примера построения полярного графика жесткости  $R$  эквивалентных связей, которые препятствуют повороту узловых элементов каркаса и, по существу, определяют степень заземления сжатых стержней по концам. В таблице 1.2 приведены результаты, полученные средствами N\_2015 и ANSYS.

Таблица 1.2

		Средство расчёта	<b>R</b> <sub>max</sub> [кг*м/рад]	<b>R</b> <sub>min</sub> [кг*м/рад]	<b>n</b> = <b>R</b> <sub>max</sub> / <b>R</b> <sub>min</sub>
Фрагмент 1	Без учета	ANSYS	18498	13858	1.33
	N	N_2015	17654	13580	1.3
	С учетом	ANSYS	16240	9453	1.71
	N	N_2015	15351	9030	1.7
Фрагмент 2 с учетом N		ANSYS	13401	10755	1.24
		N_2015	12768	10640	1.2
Фрагмент 3 с учетом N		ANSYS	14590	12079	1.2
		N_2015	14028	11690	1.2

Из таблицы 1.2 видно, что расчет по программе N\_2015 дает значения жесткостей сопротивления **R** достаточно близкие к эталонным, полученным с использованием ANSYS. При этом значения **R** по N\_2015 всегда несколько ниже, чем по ANSYS, что свидетельствует о большей безопасности расчетов по N\_2015.

Методика и некоторые другие результаты верификационных испытаний программы N\_2015 более подробно изложены в Приложении 6.

#### **1.4 Технические решения по усилению каркаса покрытия**

1.4.1 Каркас покрытия в целом усилен тремя одинаковыми затяжками по схеме, изображенной на листе 2. Конструкция соединения элементов затяжки между собой и с узловым опорным элементом показана на листе 5.

Каждая затяжка выполнена из четырех одинаковых элементов **1** из круглой стали длиной около 6 м с резьбовыми участками М36 по концам. Между собой эти элементы соединены резьбовыми муфтами **2**, а с опорными узловыми элементами каркаса - через фланцы **3**, которые подкреплены деталями **4** на сварке.

Фланец **3** передает усилие от элемента затяжки **1** к опорному узловому элементу каркаса через резьбовые шпильки **5** (М16, сталь 40Х, класс 10.9) и траверсу **6**. При этом траверса контактирует с узловым опорным элементом через коническую поверхность бобышки **7** и сферическую поверхность грибка **8**, что обеспечивает передачу усилия затяжки строго в центр опорного узла.

Переходная конструкция, включающая позиции **3 – 8**, может быть установлена до монтажа элементов затяжки **1** и **2** и строго ориентирована в проектном положении относительно опорного узла при наличии второго грибка **8** и вставки **9**. Все эти операции могут быть значительно упрощены при наличии деталей **10**, поддерживающих шпильки **5** и всю переходную конструкцию.

Как показано на листе 2, в точках стыковки элементов **1** затяжка подвешена к узлам верхнего пояса каркаса с помощью гибких связей. Один из возможных вариантов горизонтальной развязки затяжек состоит в том, чтобы точки их подвески соединить гибкими связями с ближайшими узлами нижнего пояса структурного каркаса покрытия.

#### Примечания:

1. Все размеры, приведенные на листе 5, – ориентировочные.

2. *Возможна конструкция сопряжения элементов затяжки 1 между собой и с узловым опорным элементом с использованием высокопрочных (10.9) шпилек M22.*
3. *Горизонтальная развязка затяжек, по-видимому, должна варьироваться в зависимости от конкретного решения подвесных рекламных конструкций.*

1.4.2 Поэлементное усиление каркаса состоит в усилении или замене отдельных перегруженных стержней. Из данных, приведенных на листах 3, 4, видно:

- А.** Среди сжатых ( $N_{min}$ ) стержней марки 1 ( $\Phi 48 \times 2.8$ ) максимально нагруженный воспринимает усилие 2.5 тс, что значительно ниже несущей способности такого стержня при учете его защемления (3.9 тс по табл. 1). Такие стержни усилению не подлежат.
- Б.** Среди сжатых ( $N_{min}$ ) стержней марки 2 ( $\Phi 57 \times 3.2$ ) некоторые нагружены усилием, которое близко к их минимальной несущей способности при учете защемлений (5.9 тс по табл. 1). Необходимость усиления таких стержней вероятна.
- В.** Единственный стержень марки 3 ( $\Phi 76 \times 3.0$ ) нагружен сжимающим усилием 8.4 тс, которое незначительно превышает его несущую способность при игнорировании защемлений (8.1 тс) и значительно ниже его минимальной несущей способности (10.2 тс) при учете защемлений. Необходимость усиления этого стержня, как и сжатых стержней большего сечения практически маловероятна.
- Г.** Среди стержней, перегруженных растягивающим усилием ( $N_{max}$ ), опорные раскосы марки 2 над дополнительной колонной (1) требуют замены. Это же относится к стержням марки 1, хотя их перегрузку, которая составляет всего 2% можно считать допустимой.

Таким образом, на данном этапе требуется только техническое решение по усилению или замене перегруженных растянутых стержней, представленное на листе 7.

## **Раздел 2. Экспериментальное исследование жесткости сопряжений**

### **2.1 Исходные положения**

2.1.1 Программа N\_2015 включает процедуру автоматического вычисления ряда параметров, определяющих несущую способность каждого сжатого стержня в трубчатом структурном каркасе согласно СП 16.13330.2011. При этом учитываются значения усилий  $N$  в стержнях, сопряженных с ним, и их жесткостные параметры при изгибе:

- погонная жесткость  $r = EI/L$  [kg\*m/rad];
- жесткость сопряжения  $\rho$  [kg\*m/rad] стержня с узловым элементом (далее УЭ), которая представлена в виде точечной изгибной жесткости, расположенной в центре узла.

Если в каркасе выделить сжатый стержень  $i$ , то его продольному изгибу будут сопротивляться не только его собственные жесткости  $r_i$  и  $\rho_i$ , но также жесткости  $r_j$  и  $\rho_j$  тех стержней  $j$ , которые сопряжены со стержнем  $i$  по его концам 1 и 2. Суммарное влияние, которое оказывают  $j$  стержни на работу  $i$  стержня, дополненное влиянием его собственных  $\rho_i$ , можно имитировать введением по концам  $i$  стержня эквивалентных упругих связей, препятствующих повороту его торцов с жесткостью  $R_{i1}$  и  $R_{i2}$ . Отнеся жесткости  $R_{i1}$  и  $R_{i2}$  к погонной жесткости  $r_i$ , получим коэффициенты  $k_{i1}$  и  $k_{i2}$  защемления стержня  $i$  по его концам.

2.1.2 Одна из особенностей программы N\_2015 состоит в том, что  $k_1$  и  $k_2$  вычисляются во многих плоскостях, проходящих через ось  $i$  с интервалом  $12^\circ$ . Затем отыскиваются главные значения  $k_{1min}$ ,  $k_{1max}$ ,  $k_{2min}$ ,  $k_{2max}$  и положения главных плоскостей, соответствующие  $k_{1min}$  и  $k_{2min}$ . Далее вычисляются отношения  $n_1 = k_{1max}/k_{1min}$  и  $n_2 = k_{2max}/k_{2min}$ , а также угол  $\delta$  между главными плоскостями, которые соответствуют значениям  $k_{1min}$  и  $k_{2min}$ . В результате вычисляется коэффициент расчетной длины  $\mu_i$  сжатого стержня при неплоской форме его продольного изгиба (согласно п.10.2.6 СП 16.13330.2011) и его несущая способность при сжатии  $N_i^*$  (<http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/>).

Процедура вычисления этих параметров по программе N\_2015 при заданных значениях  $N$ ,  $r$ ,  $\rho$  верифицирована с помощью программного комплекса ANSYS (п. 1.3.2).

2.1.3. Цель экспериментальной апробации N\_2015 состоит в том, чтобы установить, насколько значения  $\rho$ , заданные в программе N\_2015, соответствуют свойствам структурной конструкции на ТРЦ «Горизонт» и, если потребуется, скорректировать их.

Параметр  $\rho$  - величина случайная, зависящая от множества конструктивных и технологических факторов. Следовательно, метод исследования должен быть достаточно

прост и допускать многократное повторение измерений в различных зонах конструкции для набора статистического материала.

2.1.4 Предлагаемый метод состоит в прямом инструментальном измерении жесткости  $R_z$  (по п.1.1) с которой стержни, присоединенные к узловому элементу, сопротивляются его повороту в различных направлениях. Сравнение  $R_z$  с  $R_p$ , полученными путем расчета по N\_2015, дает возможность установить, насколько принятые в расчете значения  $\rho$  соответствуют их реальным значениям.

2.1.5. Средства определения  $R_p$  и  $R_z$  выбраны, исходя из необходимого уровня и реальных возможностей приобретения измерительной техники, а также из условий проведения измерений на ТРЦ «Горизонт». В частности, определение  $R_z$  практически возможно только в консольных зонах покрытия, где на отметке 5 м существует антресольное перекрытие. При этом для исследования доступны лишь узлы нижнего пояса покрытия, нагруженного только постоянной нагрузкой от собственного веса. Именно в таких узлах и при такой нагрузке будем вычислять  $R_p$ .

## 2.2 Методика определение $R_p$

2.2.1 Значения  $R_p$  невозможно получить по программе N\_2015 без удаления реального сжатого стержня  $i$  из каркаса, что, практически, невозможно выполнить при определении соответствующего  $R_z$ . Это затруднение преодолевается путем введения в каркас виртуальных стержней, присоединяемых к тем узлам каркаса, для которых мы вычисляем  $R_p$ . Чтобы уменьшить влияние виртуального стержня на работу каркаса, принимаем для него  $r$  и  $N$  минимально возможными. Жесткость сопряжения виртуального стержня с исследуемым узловым элементом -  $\rho_1 = \infty$ , а на другом его конце -  $\rho_2 = 0$ .

Следуя принятой системе измерения углов  $\phi$  поворота узла, ось виртуального стержня направлена вниз от узлового элемента вертикально или с отклонением от вертикали до  $5^\circ$ .

2.2.2 По программе N\_2015 команда Мю на панели «Коррекция» формирует таблицу параметров всех сжатых стержней, в т.ч. виртуальных. В таблице приведено главное значение  $k_{1min}$  и  $n_1 = k_{1max} / k_{1min}$  для того конца виртуального стержня, который жестко ( $\rho_1 = \infty$ ) прикреплен к узлу каркаса. Поскольку погонная жесткость  $r$  виртуального стержня задана, нетрудно найти главные значения жесткости закрепления узла:

$$R_{pmin} = k_{1min} * r \text{ и } R_{pmax} = n_1 * R_{pmin}.$$

2.2.3 Остается неизвестным положение главных плоскостей жесткости закрепления исследуемого узла в каркасе. Его можно найти, несколько изменив программу N\_2015.

Однако, здесь гораздо проще воспользоваться системой ANSYS, которая дает результаты вполне идентичные полученным по N\_2015 и в т.ч. о положении главных плоскостей.

## 2.3 Методика и результаты определение $R_z$

### 2.3.1 Методика испытаний и средства измерения.

В принципе, процесс определения  $R_z$  включает две операции:

- 1) приложение к узловому элементу (УЭ) каркаса момента  $M$  известной величины в одной из главных плоскостей сопротивления узла повороту;
- 2) измерение углов  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  поворота УЭ в плоскости  $M$  и в ортогональной к ней плоскости. Главное экспериментальное значение сопротивления  $R_z = M/\varphi_x$ .

Если плоскость приложения момента  $M$  близка к одной из главных плоскостей, должно выполняться условие  $\varphi_y < \varphi_x$ .

Средство приложения момента  $M$  представляет собой горизонтальный рычаг с регулируемым плечом  $L$ , который одним концом жестко соединен с УЭ нижнего пояса каркаса с возможностью его свободного вращения вокруг вертикальной оси узла. На другом конце рычаг снабжен нитью к которой подвешена масса  $P$ , нагружающая УЭ моментом  $M = P \cdot L$ .

Плечо  $L$  порядка 1м измеряется рулеткой с погрешностью  $\pm 5$ мм. Масса  $P$  измеряется электронным портативным безменом фирмы **VESTMASTER** в диапазоне от 0 до 20кг с погрешностью  $\pm 0.02$ кг.

В качестве средства измерения углов поворота  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  используется высокоточный двухосевой инклинометр **NIVEL 210** фирмы Leica. Он закрепляется на УЭ с помощью *испытательного приспособления* (лист8), позволяющего установить инклинометр строго горизонтально и поворачивать его вокруг вертикальной оси узла вместе с плоскостью приложения момента, определяемой положением рычага.

Работа с инклинометром NIVEL 210 осуществляется через компьютер по программе **Nivel Tool**. Погрешность измерения  $\varphi$  в диапазоне  $\pm 1.5$  mrad составляет  $\pm 0.005$  mrad.

Смотри, например : [http://gfk-leica.ru/katalog/datchiki/leica\\_nivel\\_210/](http://gfk-leica.ru/katalog/datchiki/leica_nivel_210/)

### 2.3.2 Описание испытательного приспособления.

На листе 8 изображена схема приспособления, которое может быть установлено на любом УЭ нижнего пояса каркаса и позволяет выполнить обе вышеупомянутые операции.

Инклинометр NIVEL210 размещен на базовом диске **1**, жестко прикреплен к нему и вместе они образуют *измерительный узел*. Последний может быть с помощью винтов **2** легко снят и вновь закреплен на ниже расположенном *юстировочном узле*.

Этот узел выполнен на базе геодезического *трегера*, дополненного несколькими деталями (выделены более жирным контуром).

Функция *юстировочного узла* состоит в том, чтобы перед измерениями приводить инклинометр в строго горизонтальное положение. Одновременно он позволяет контролировать значение угла между системами координат инклинометра и каркаса по азимутальной шкале **4** *трегера*.

*Юстировочный узел* сопрягается с *опорным узлом* посредством шпильки **6**, которая жестко соединена с диском **7**.

Одна функция опорного узла состоит в том, чтобы жестко соединить все вышележащие узлы и, в итоге, инклинометр с исследуемым узлом каркаса. Другая его функция состоит в том, чтобы обеспечить первичное, грубое горизонтирование инклинометра. Обе эти функции реализуются благодаря шарнирному сопряжению диска **7** со стойкой **10** и возможности фиксации их взаиморасположения винтами **9** через диск **8**. Кроме того в стойку **10** снизу ввинчена шпилька **11**, которая пронизывает УЭ.

Снизу на нее навинчена муфта **12**, входящая в *узел нагружения*, расположенный под исследуемым УЭ. Муфта **12** соединяет шпильку **11** со шпилькой **13**, на которой она зафиксирована штифтом.

На шпильку **13** навинчен также диск **14**, который передает момент, приложенный к нему от рычага **17**, на УЭ через четыре винта **15**, расположенные по его контуру.

2.3.3 Установка испытательного приспособления на очередной УЭ каркаса (лист 8) выполняется в следующей последовательности:

- 1) соединяют *опорный узел* с *юстировочным узлом*, и устанавливают их на УЭ, пропустив шпильку **11** сквозь вертикальное отверстие УЭ;
- 2) жестко соединяют *опорный узел* с УЭ и с *узлом нагружения*, навинтив на шпильку **11** и сильно затянув муфту **12**;
- 3) винтами **15** регулируют положение *узла нагружения* относительно УЭ;
- 4) устанавливают желаемое значение плеча **L**, перемещая точку подвеса нити к рычагу **17**;
- 5) соединяют рычаг **17** с *узлом нагружения*, надев его на шпильку **13** и закрепив гайкой;

- 6) придают диску **7** положение близкое к горизонтальному, несколько ослабив натяжение одного из трех винтов **9**, а затем снова его затянув;
- 7) ориентируют азимутальную шкалу **4** относительно осей координат (X, Y) каркаса, сначала несколько ослабив винты **5**, а затем снова их затянув;
- 8) устанавливают *измерительный узел*, надев базовый диск **1** на грибок **3**, и фиксируют его от вертикальных перемещений винтами **2**;
- 9) ориентируют *измерительный узел* относительно шкалы **4** и фиксируют винтами **2**;
- 10) юстируют винтами *трегера* горизонтальное положение инклинометра по его собственному круглому уровню;
- 11) соединяют *кабелем* инклинометр с *компьютером*, винтами *трегера* уточняют юстировку инклинометра по показаниям на мониторе.

#### 2.3.4 Результаты испытаний.

Регистрация и первичная обработка результатов измерений выполняется в табличной форме по программе EXCEL. Для каждого испытуемого УЭ в таблицу заносятся следующие исходные данные:

Столбец 1 - номер УЭ (присвоенный ему в процесс расчета) согласно схеме расположения на листе 9 с указанием положения УЭ относительно плоскости симметрии каркаса (л / п).

Столбец 2 – **P** – масса испытательного груза.

Столбец 3 – **L** – длина плеча рычага.

Столбец 4 – значение момента  $M = P \cdot L$ , прилагаемого к УЭ.

Столбец 5 – направление плеча **L** рычага и собственных координатных осей инклинометра (x, y) относительно осей координатных осей каркаса (X, Y).

В первой серии испытаний для каждого УЭ в столбце 5 предусмотрено четыре варианта направлений: X, - X, Y, -Y, которым соответствуют четыре значения азимутального угла  $\alpha$  между направлением **L** и осью X : 0, 180°, 90°, 270°.

Такие направления **L** были приняты после пробных испытаний, как наиболее просто реализуемые. Они оказались и достаточно близкими к главным плоскостям для большинства испытанных УЭ.

В последующих четырех столбцах зарегистрированы показания инклинометра, соответствующие каждому направлению **L** в соответствующих строках.

Столбцы 6,7 – «нулевые» показания инклинометра по осям x, y при отсутствии груза **P**.



Столбцы 8,9 –показания инклинометра по осям  $x, y$  после нагружения УЭ моментом  $P \cdot L$ .

Далее следуют столбцы с результатами первичной автоматической обработки результатов измерений.

Столбцы 10, 11 – значения угла поворота  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  УЭ под действием  $M$ .

Столбцы 12, 13 – частные экспериментальные значения жесткостей  $R_x = M/\varphi_x$  и  $R_y = M/\varphi_y$ , с которыми УЭ сопротивляется повороту под действием  $M$ .

Столбец 14 – усредненные экспериментальные значения  $n = R_{\max} / R_{\min}$  для каждого УЭ.

### 2.3.5 Обсуждение и дальнейшая обработка результатов испытаний.

Анализ результатов испытаний, представленных в сводной таблице на листах 10, выявил следующее:

**А.** Углы поворота УЭ в плоскости нормальной к плоскости приложения момента, как правило, малы по сравнению с углами поворота в плоскости момента. Это означает, что плоскости приложения момента достаточно близки к главным плоскостям.

**Б.** Значения  $R_x$ , полученные для одного и того же УЭ при приложении момента в одной и той же плоскости, но с противоположным знаком, в некоторых случаях сильно различаться (20 %). Это можно объяснить только тем, что сопряжения УЭ со стержнями каркаса могут обладать значительной случайной конструктивно-технологической асимметрией, приводящей к значительной асимметрии жесткостных характеристик УЭ.

**В.** Значения  $R_x$ , полученные для двух взаимосимметричных (л и п) УЭ достаточно сильно различаются по причине естественного непостоянства технологических условий изготовления и сборки элементов каркаса.

**Г.** Значения  $R_x$ , полученные для нескольких УЭ, имеющих совершенно одинаковые расчетные схемы соединения со стержневыми элементами, достаточно сильно различаются между собой (до 20%). Кроме причины, отмеченной в п.В, это можно объяснить и тем, что в расчетной схеме игнорируются фактические условия закрепления стержней на их противоположных концах, не стыкуемых с данным УЭ.

Приведенные замечания позволяют сделать следующие выводы:

1) полученные значения  $R_x$  в целом пригодны для сравнения с  $R_p$  (п.А), но сравнение  $R_x$  с  $R_p$  для каждого испытанного УЭ в отдельности затруднительно и малоинформативно (пп. Б, В, Г );

2) результаты испытаний УЭ (в т.ч. повторных) должны быть объединены в группы, обладающие единой расчетной схемой. Для каждой такой группы должны быть найдены единые значения  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$  для сравнения с  $R_{\text{pmax}}$  и  $R_{\text{pmin}}$ .

3)  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$  для группы могут быть найдены, например, осреднением, но более безопасно принять их, как наименьшие значения  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$  для данной группы УЭ.

## 2.4 Методика и результаты сравнения значений $R_{\text{э}}$ и $R_{\text{р}}$

2.4.1 В таблице сравнения  $R_{\text{э}}$  и  $R_{\text{р}}$  на листе 12 представлены именно минимальные значения  $R_{\text{э}}$  для каждой группы УЭ. Мерой сравнения являются отношения  $v = R_{\text{э}}/R_{\text{р}}$ .

Рассматривая значения, приведенные в таблице, можно заметить:

- во всех случаях  $v$  значительно больше единицы, что свидетельствует об определенной надежности результатов расчета;
- отношения  $v$  для  $R_{\text{max}}$  везде значительно ниже, чем  $R_{\text{min}}$ , что говорит о возможной принадлежности  $v$  для  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$  к различным генеральным совокупностям.

Статистическая оценка нижней границы  $v_{\text{н}}$  доверительного интервала, в котором может находиться  $v$  для  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$ , выполнена по программе EXCEL с доверительной вероятностью не менее 0.99 для трех вариантов выборки  $v$ :

- для  $v_{R_{\text{max}}}$ ,  $v_{\text{н}} = 1,17$ ;
- для  $v_{R_{\text{min}}}$ ,  $v_{\text{н}} = 1,19$ ;
- для  $v_{(R_{\text{max}}+R_{\text{min}})}$   $v_{\text{н}} = 1,05$ .

Еще три аналогичные выборки, представленные на листе 12, построены с учетом веса элементов, который соответствует количеству УЭ в данной группе (лист 11). Как видно из таблицы на листе 12 учет веса элементов практически не влияет на ширину доверительного интервала. Это можно трактовать, как подтверждение надежности полученных оценок.

2.4.2 Устойчивое и значительное превышение  $R_{\text{э}}$  по сравнению с  $R_{\text{р}}$  дает основания полагать, что приведенные в таблице 1.1 минимальные расчетные значения несущей способности сжатых стержней «с учетом защемления» действительно являются таковыми. Поскольку эти минимальные расчетные значения несущей способности стержней нигде не ниже расчетных значений сжимающих усилий в сжатых стержнях (листы 3.1, 3.2), их усиление в структурном каркасе покрытия ТРЦ «Горизонт» не требуется.

## **Раздел 3. Технико-экономический анализ вариантов усиления**

### **3.1 Вводные замечания**

В этом разделе сравнительному технико-экономическому анализу подлежат два варианта усиления каркаса покрытия на ТРЦ «Горизонт», которые содержат общий пункт, касающийся усиления каркаса в целом путем устройства затяжек (подраздел 1.4, п.1.4.1).

**Вариант А**, построен, исходя из определения несущей способности сжатых стержней каркаса при их шарнирном сопряжении в узлах (СНиП II-23-81\*).

**Вариант Б**, построен, исходя из определения несущей способности сжатых стержней каркаса с учетом жесткости их сопряжения в узлах по программе N\_2015 согласно п.10.2.6 актуализированной редакции СНиП II-23-81\*(СП 16.13330.2011г).

**Цель сравнительного анализа** состоит в том, чтобы оценить тот технико-экономический эффект, который дает использование программы N\_2015 в данном конкретном случае, и ее потенциальную эффективность.

Достижение обозначенной цели значительно упрощается тем, что уточненный расчет несущей способности сжатых стержней по программе N\_2015 вообще устраняет необходимость их усиления. Следовательно, технико-экономическое преимущество Варианта Б относительно Варианта А может быть определено, как сумма затрат на усиление сжатых стержней по Варианту А. Именно эти затраты оцениваются в нижеследующем подразделе.

### **3.2 Затраты на усиление сжатых стержней по Варианту А (без учета заземлений).**

#### **3.2.1 Характер, объемы и условия выполнения работ.**

Рекомендуемое техническое решение по поэлементному усилению сжатых стержней каркаса представлено на листе 6. Это решение заключается в приварке к трубчатому корпусу диаметром 48 или 57мм трех усиливающих накладок из равнополочного уголкового профиля 25х3мм длиной около 3м. Накладки должны быть предварительно отрифтованы и перед сваркой достаточно точно зафиксированы на трубчатом корпусе. Погибь стержня, вызванная приваркой накладок должна быть минимально возможной (менее 10мм). **Все это требует привлечения сварщиков высокой квалификации.**

**Общее количество сжатых стержней, требующих усиления – 120 шт.** (листы 3.1, 3.2). Стержни, требующие усиления, расположены на отметке более 10 м над ресторанным двориком, где невозможно размещение опорных подмостей, т.е. **все выполняемые работы следует отнести к высотным**.

Использование подвесных стационарных подмостей нецелесообразно, поскольку сжатые стержни, требующие усиления расположены на плане каркаса, в общем, нерегулярно. Следовательно, **работы должны выполняться с временных подвесных подмостей**, которые следует перемещать от стержня к стержню по мере их усиления. При этом подмости должны удовлетворять не только общим требованиям техники безопасности при производстве сварочных работ, но и обеспечивать сварщикам достаточные удобства при наложении **различно расположенных швов, включая потолочные**.

Важнейшим условием, которое выдвигает Заказчик, является выполнение работ по усилению каркаса покрытия без помех для нормальной эксплуатации ТРЦ при обеспечении 100% безопасности для посетителей. Это условие может быть выполнено **только при выполнении работ в ночное время**.

### 3.2.2 Трудоемкость и продолжительность работ.

Будем исходить из предположения, что и сварочные и вспомогательные работы по перемещению подмостей выполняют сами сварщики в составе звена из 2-х человек. Тогда, продолжительность работ, связанных с усилением одного стержня может составить в среднем 5 часов, т.е. 10 чел-часов.

Общая трудоемкость составит  $10 \times 120 = 1200$  чел-часов

Общая продолжительность работ составляет 600 часов = 85 раб. дней = 4 месяца.

**При выполнении работ двумя звеньями их продолжительность составит 2 месяца.**

### 3.2.3 Стоимость работ и материалов .

**Стоимость работ по установке подвесных подмостей для одного стержня**

(площадью  $3 \times 3 = 9$  м<sup>2</sup> из досок толщиной 3см,

объемом  $9 \times 0.03 = 0.27$  м и весом около 200 кг)

можно минимально оценить, как перемещение груза весом 200 кг.

По расценкам на высотные работы

(<http://www.alpstroygroup.ru/podem-gruza-na-vysotu.html>)

стоимость перемещения подмостей с учетом работ по разборке и

закреплению настила на новом месте составит

2000 руб.

**Стоимость работ по приварке уголков одного стержня**

по (<http://www.alpstroygroup.ru/svarochnye-raboty-na-vysote.html>)

составляет 20 руб/см шва. При общей длине шва при усилении одного

стержня 600см цена сварки составляет  $20 \times 600 =$

12000 руб

**Стоимость материала усиливающих уголков одного стержня**

с учетом их порезки и рихтовки составляет 40 руб/кг.

При общем весе трех уголков (32 х 4мм длиной 2,8м) 16кг

их стоимость составит  $16 \times 40$

640 руб.

Таким образом, стоимость усиления одного сжатого стержня составляет 15 000 руб.

**Общие затраты на усиление 120-ти стержней составляют  $15\,000 \times 120 = 1\,800\,000$ руб**

## Заключение

Среди полученных результатов наиболее существенны следующие.

I. Верификационные испытания программы N\_2015 показали, что она всегда дает значения несущей способности сжатых стержней близкие, но несколько заниженные по сравнению с эталонными значениями, полученными с помощью программной конечно-элементной системе ANSYS.

Это означает, что принятые в N\_2015 дополнительные допущения обеспечивают большую безопасность результатов по сравнению с результатами, полученными в ANSYS.

II. Экспериментальное исследование структурного каркасе покрытия ТРЦ «Горизонт» показало, что жесткости сопряжений элементов в этом каркасе значительно выше, чем в стандартном каркасе «Кисловодск», параметры которого приняты за основу в программе N\_2015. Иными словами, фактическая несущая способность сжатых стержней в данном каркасе «с учетом заземления» превышает значения, приведенные в таблице 1.1.

Это позволяет сформулировать рекомендации по совершенствованию сопряжений элементов в структурных конструкциях подобных «Меро», в т.ч., «Кисловодск»:

- использовать в стержнях малого диаметра (от 48 до 76мм) шестигранные муфты S36;
- выполнять сопряжения шестигранной муфты с узловым элементом и головки болта с втулкой через сферические или конические поверхности, например, на шайбах.

III. В процессе планирования и проведения экспериментов отработана методика измерения жесткости сопряжения элементов в реальном структурном каркасе, уточнены требования к аппаратному обеспечению измерений, подготовлены средства измерений.

Тем самым создана база для использования экспериментальных методов в дальнейших исследованиях работы сжатого стержня в структурном каркасе.

IV. Полученными результатами I – III устранена необходимость в усилении 120-ти сжатых стержней каркаса и в итоге суммарный экономический эффект от данного исследования составил **1 800 000** рублей.

**Эта сумма более чем вдвое превышает объем затрат на исследования ЮФУ.**

