

5. Сагадатов, А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.И. Сагадатов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2006. – 22 с.

6. Кузнецов, К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / К.С. Кузнецов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 19 с.

7. Бондаренко, В.М. Исследование и разработка общей методики расчета трубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе / В.М. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2007. – С. 242–244.

8. Бондаренко, В.М. Расчет прочности сталебетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе при центральной сжатии / В.М. Бондаренко, Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV междунар. науч.-метод. семинара: в 2-х т.; под общ. ред. Д.П. Лазовского, А.А. Холько. Новополоцк, ПГУ, 27–28 ноября 2008 г. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т. I. – С. 206–214.

9. Бондаренко, В.М. Применение бетонов на напрягающем цементе при изготовлении сталебетонных элементов / В.М. Бондаренко, И.П. Павлова // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – Брест: БрГТУ, 2009.

10. Протько, Н.С. Свойства и особенности применения расширяющей добавки РСАМ в технологии бетона и растворов / Н.С. Протько // Строительная наука и техника. 2007. – № 5. – С. 123–130.

11. Рекомендации по проектированию составов бетонов с компенсированной усадкой или самоуплотнением. – Брест: БГТУ, 2005. – 13 с.

12. Калиновская, Н.Н. Технологические свойства, прочность и эффективное применение бетона, модифицированного гиперпластификатором ГП-1 / Н.Н. Калиновская // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 74–83.

УДК 624.014.001.24 (476.7)

РАБОТА СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ» В ПРЕДЕЛАХ И ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Люстибер В.В.

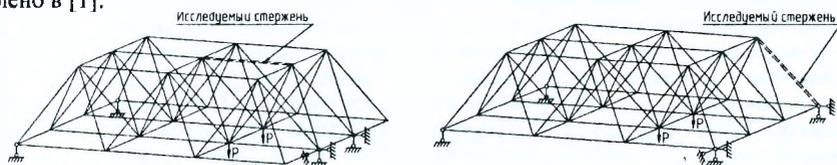
Введение. При расчете металлических конструкций особое внимание необходимо уделять вопросу устойчивости всей конструкции в целом, а также отдельных ее стержней. От того, насколько велика разница между значением расчетной длины сжатого элемента, вычисленным по действующим нормам, и значением действительной расчетной длины стержня, входящего в состав конструкции, в значительной степени зависит надежность и экономичность предлагаемой конструкции. Рассматриваемая проблема особенно актуальна для «новых» конструкций, получивших внедрение в практику строительства сравнительно недавно, к коим, безусловно, относится и металлическая стержневая конструкция системы «БрГТУ».

Учитывая вышесказанное, была поставлена цель – оценка надежности конструкций системы «БрГТУ» исходя из величины запасов, заложенных при расчете сжатых стержней по действующим нормам.

Ниже впервые представлены основные результаты исследований работы сжатых стержней системы «БрГТУ» в пределах и за пределами упругих деформаций, включающие также и выводы, сделанные при изучении явления потери устойчивости сжатых стержней системы «БрГТУ» в области упругопластических деформаций.

Методика испытаний. Исследование работы стержней в области упругих деформаций выполнены на фрагменте высотой 1555 мм с размерами в плане в осях нижних поясов 6600х6600 мм и в осях верхних поясов 4400х4400 мм. Размер стороны квадратной ячейки поясных сеток в данном случае составил 2200х2200 мм. В зависимости от того, какой стержень исследовали, принимали такую расстановку опор, при которой максимальное усилие возникало именно в этом стержне (рисунок 1, а и 1, б). Исследования работы стержней за пределами упругих деформаций выполнены на двух фрагментах высотой 1500 мм по центрам узлов с размерами ячеек верхней и нижней поясной сеток 1500х1500 мм. Стержневые элементы обоих фрагментов изготовлены из круглых стальных бесшовных горячекатаных труб сечением 60х4 мм по ГОСТ 8732 из стали марки сталь 20 по ГОСТ 1050. Полая сфера узлового элемента первого фрагмента изготовлена из листового проката стали марки 09Г2С толщиной 16мм и имела наружный диаметр $D=212$ мм. Для второго и третьего фрагмента соответствующие характеристики узлового элемента, выполненного из той же марки стали, имели следующие значения: толщина полой сферы – 10 мм, наружный диаметр – $D=160$ мм. Для сопряжения стержней в узлах применены высокопрочные болты класса прочности 12.9 по DIN 933 и гайки по DIN 934 из стали марки 40X (для первого фрагмента – болты и гайки М30, для второго – М20).

Нагружение осуществлялось через два нижних узла фрагмента с помощью гидравлических домкратов ступенями по 10кН до нагрузки, составляющей 80% от предельной, и далее непрерывно до начала потери устойчивости наиболее нагруженным сжатым стержнем. На промежутке времени, характеризуемом значительным нарастанием прогиба стержня, значение узловой нагрузки поддерживалось на одном уровне. При испытании значение узловой нагрузки определяли с помощью динамометра, относительные деформации в трех сечениях исследуемого стержня путем снятия показаний тензорезисторов, сближение концов стержня определяли как среднее показание двух прогибомеров. Более подробное описание системы нагружающих траверс, расположения тензорезисторов на поверхности трубы, а также регистрирующей аппаратуры представлено в [1].



а) – к исследованию сжатого пояса; б) – к исследованию сжатого опорного раскоса
Рисунок 1 – Схемы опирания фрагмента I

Вид фиксирования данных, характеризующих напряженно-деформированное состояние сжатого пояса (рисунок 2, а) и сжатого опорного раскоса (рисунок 2, б), определялся методом их снятия. На этапах ступенчатого нагружения показания тензорезисторов и прогибомеров снимали после каждой ступени приложения нагрузки. В момент непрерывного нагружения показания тензорезисторов снимали с частотой 10Гц, а показания прогибомеров записывались на две видекамеры. При этом включение всех трех фиксирующих приборов производилось одновременно.

Для получения достоверных результатов значительное внимание было уделено определению действительных характеристик материала и геометрических размеров поперечных сечений труб.



Предел текучести материала труб исследуемых стержней определяли согласно [2, 3] при испытании на растяжение стандартных образцов на универсальной испытательной машине ИР 5145-500 Ивановского ОАО «Точприбор». Заготовки для образцов отрезали от проката на заводе при изготовлении стержневой фрагмента.

Рассматривая полученные зависимости « σ - ϵ » и принимая во внимание результаты исследований пластичной стали 37, выполненных Рейном и Мемлером, установлено, что сталь весьма близко следовала диаграмме идеального упругопластического тела. Вывод сделан на основании того, что практически все диаграммы имеют выраженный «зуб текучести», на участке диаграммы от «нулевой» точки до верхней точки «зуба текучести» отклонение от линейного закона ничтожно, а площадка текучести при этом имеет значительную протяженность (более 2%).

Предел текучести $\sigma_y = 29,4 \text{ кН/см}^2$ получен как среднее значение всех обработанных результатов (интервал значений составил от $28,69 \text{ кН/см}^2$ до $30,60 \text{ кН/см}^2$). Определить предел пропорциональности экспериментальным путем не представлялось возможным, учитывая, что для большинства сталей $\sigma_p/\sigma_y = 0,8..0,85$, предел пропорциональности условно принят равным $0,8\sigma_y = 23,52 \text{ кН/см}^2$.

Измерение толщины стенки труб производили до изготовления стержневых элементов с помощью штангенциркуля с точностью $0,05 \text{ мм}$ в восьми точках, равноудаленных друг от друга по периметру сечения. Измерение наружного диаметра труб производили в четырех сечениях. Каждое из последующих сечений при этом было повернуто на 45° по отношению к предыдущему. В результате обработки данных, полученных для 20 заготовок, была определена средняя толщина стенки трубы, принятая для дальнейших расчетов равной $3,87 \text{ мм}$. Разброс в значениях номинального наружного диаметра труб, равного 60 мм , в более чем 80% измерений не превысил $0,1 \text{ мм}$, ввиду чего за расчетный наружный диаметр принято его номинальное значение.

Принимая во внимание действительные размеры поперечного сечения, реальные характеристики сечения составили: площадь поперечного сечения $A = 6,82 \text{ см}^2$, момент инерции $J = 27 \text{ см}^4$, момент сопротивления $W = 9 \text{ см}^3$, радиус инерции $i = 1,99 \text{ см}$.

Обработка показаний тензорезисторов. В качестве исходных данных принимался ряд последовательных значений относительных фибровых деформаций поверхности трубы, полученных для каждой ступени нагружения

(пошаговое нагружение) и для фиксированного отсчета времени (непрерывное нагружение). Все расчеты для удобства были сведены в таблицу. Перевод показаний тензорезисторов в напряжения выполнен по формуле закона Гука, с учетом неизменности модуля упругости, равного $E=2,06 \cdot 10^4$ кН/см². По фибровым напряжениям для двух взаимно ортогональных плоскостей найдены осевые напряжения (σ_y^N и σ_z^N) и напряжения от изгиба (σ_y^M и σ_z^M). Осевые усилия получены умножением осевого напряжения на площадь поперечного сечения. За истинное значение осевого усилия принималось среднее значение результатов, полученных для трех сечений. Изгибающие моменты, действующие в двух взаимно ортогональных плоскостях, определяли по крайевым напряжениям от изгиба умножением краевого напряжения на момент сопротивления. По полученным моментам M_y и M_z определяли максимальный момент M , действующий в сечении, и угол между плоскостью действия максимального момента и одной из начальных плоскостей (Y либо Z). Эксцентриситет действия усилия в сечении определяли делением максимального момента M на осевое усилие N .

Основные результаты испытаний. Как отмечалось выше, испытания заканчивались после достижения исследуемым стержнем своего предельного состояния. За критическое усилие принято максимальное усилие, которое смог воспринять стержень. Значительный интерес с точки зрения работы стержня в закритической области представляет впервые полученная зависимость «усилие в стержне - сближение концов», построенная вплоть до полной потери устойчивости элемента. Две такие характерные зависимости представлены ниже (рисунок 3).

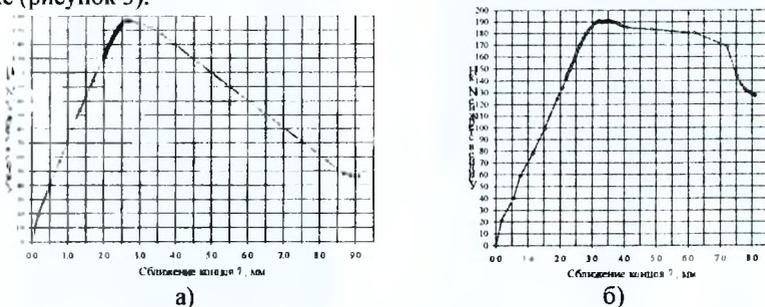
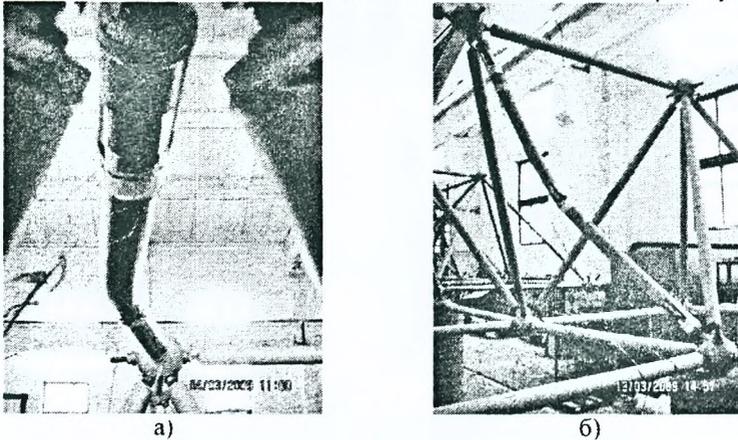


Рисунок 3 – Зависимости «усилие в стержне - сближение концов» для стержней, теряющих устойчивость в области упругопластических деформаций

Очертания зависимостей качественно соответствуют характеру потери устойчивости соответствующих стержней. Нарастание прогиба в середине стержня № 2 происходило достаточно быстро, в то время как стержень № 3 выпучивался плавно в течение продолжительного времени. При этом ни в одном из проведенных испытаний не зафиксировано мгновенной потери устойчивости, что в принципе не является обязательным для стержней, теряющих устойчивость в области упругопластических деформаций. Объяснить различие в представленных зависимостях можно более быстрым нагружением стержня № 2, а также отличными значениями характеристик материала труб в зоне развития пластических деформаций (в стержне № 2 пластические деформации, видимо, достигнуты ранее, а распределение свойств по сечению более равномерное).

Во всех случаях на стержневом элементе, потерявшем устойчивость, в средней части трубы выделяли искривленный отрезок с ярко выраженными участками пластических деформаций и прямолинейные участки, каждый длиной более чем треть полной длины трубы от торца элемента (рисунок 4).

Для всех стержней, испытанных в составе фрагментов II и III, отмечено возрастание эксцентриситета действия усилия в среднем сечении на протяжении всего испытания. В одном из крайних сечений стержня № 1 наблюдали постоянный рост эксцентриситетов, в другом – постоянное убывание. При этом отношение потерь устойчивости, составило около двух. При испытании № 2 (верхний пояс) и испытании № 4 (опорный раскос) отмечено увеличение эксцентриситетов в первом сечении, однако не столь существенное как в первом случае, и практические постоянные значения в третьем сечении. Для стержня № 3 характерно убывание эксцентриситетов на начальных этапах нагружения (до узловой нагрузки, составляющей треть от предельной) и увеличение на последующих этапах. Объяснить такие изменения эксцентриситетов можно как конструктивными особенностями стержневого элемента (резьбовые отверстия в гайках, установленных в торцах труб, имеют некоторое отклонение от оси трубы), так и присутствующими «рамными» моментами, возникающими вследствие конечных смещений и поворотов узлов.



а) – сжатый пояс; б) – опорный раскос
Рисунок 4 – Форма потери устойчивости сжатых стержней

Изменение абсолютных значений максимальных моментов качественно соответствует изменению эксцентриситетов действия усилий. Угол наклона плоскости главного момента к начальным плоскостям в период ступенчатого нагружения изменяется скачкообразно в положительном либо отрицательном направлении и, как правило, однозначно растёт либо уменьшается при непрерывном нагружении.

Авторами пространственной стержневой конструкции системы «БрГТУ» отмечалось, что при определении расчетной длины сжатого стержня необходимо принимать $\mu=1$. При этом геометрическая длина стержня принимается равной расстоянию между центрами узлов (полых сфер). Ниже оценка справедливости этого утверждения выполнена следующим образом. На гиперболу Эйлера (рисунок 5)

нанесены экспериментальные точки, каждая из которых соответствует критическому напряжению, полученному при исследовании устойчивости одного из семи упругих стержней, испытанных в составе фрагмента I. Как видно, значения гибкостей для всех точек попадают в интервал от 95 до 105, что несколько меньше гибкости, рассчитанной по предложенным выше допущениям и равной 111. Таким образом, можно утверждать, что действительная расчетная длина сжатого стержня несколько меньше длины принимаемой при расчете.

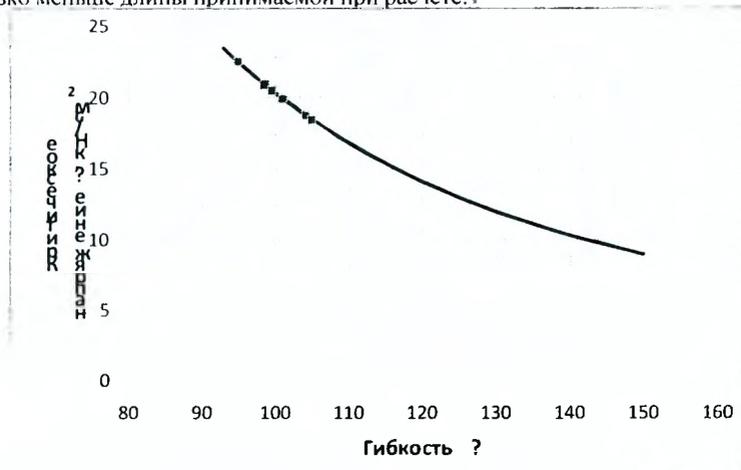
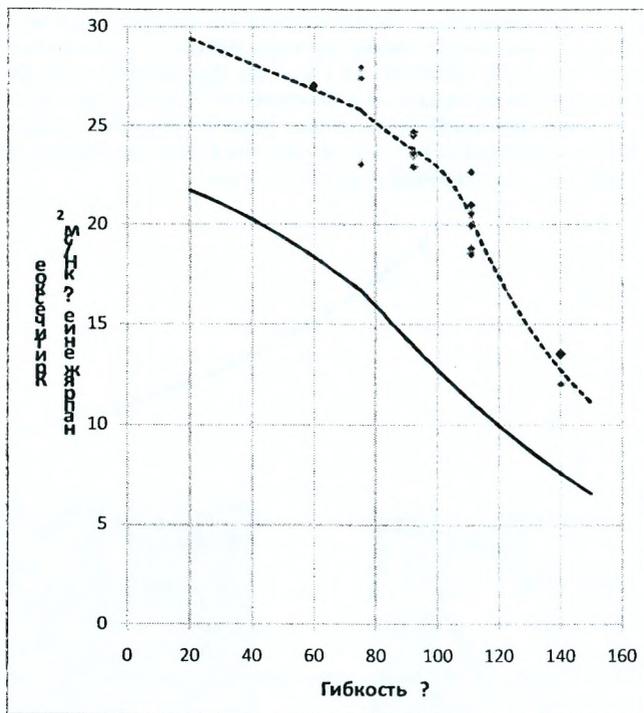


Рисунок 5 – Гипербола Эйлера с экспериментальными точками

На данном этапе исследований определить действительную расчетную длину сжатого стержня, теряющего устойчивость в области упругопластических деформаций, не представляется возможным. Причиной является отсутствие кривой критических напряжений для центрально сжатых шарнирно опертых стержней из круглой трубы с материалом, аналогичным материалу испытанных элементов за пределами применимости формулы Эйлера. В связи с этим оценка надежности конструкции системы «БРГТУ» выполнена с учетом положений, принятых при составлении действующих норм в области проектирования стальных конструкций.

Как известно, в [4] методика практических расчетов центрально-сжатых элементов приведена с использованием коэффициентов устойчивости при центральном сжатии φ , которые вычислены с учетом рекомендаций п. 5.7 [5] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_s / E}$. Учитывая эту зависимость и принимая во внимание физический смысл коэффициента продольного изгиба, была построена теоретическая кривая критических напряжений « σ - λ » (рисунок 6). Здесь же представлены результаты всех испытаний и аппроксимирующая экспериментальная кривая. Все точки нанесены по экспериментальным напряжениям и соответствующим им гибкостям, рассчитанным для стержней с учетом того, что коэффициент приведения расчетной длины принят $\mu=1$. Отметим здесь, что при построении «нормативной» кривой расчетное сопротивление стали принято по [4].



Примечание:

- — — — — - кривая по [5];
- — — — — * * * * * - экспериментальная кривая

Рисунок 6 – Теоретическая кривая критических напряжений с экспериментальными точками

Как видно, критические напряжения, полученные во всех без исключения испытаниях, превышают предельно допустимые напряжения, рассчитанные по действующим нормам. Экспериментальные данные в области упругих деформаций могут быть аппроксимированы гиперболой Эйлера. В области малых гибкостей при $\lambda < 75$ предложено заменить кривую прямой, максимальная ордината которой при гибкости $\lambda = 20$ соответствует пределу текучести.

Учитывая вышесказанное, вполне оправдано в качестве расчетной схемы структурной конструкции системы «БрГТУ» принимать стержневую систему с шарнирным сопряжением стержней в узлах. Справедливость применения такой идеализированной системы для достоверного определения усилий в стержнях рассматриваемой конструкции подтверждена сопоставлением усилий, полученных при испытаниях и усилий, определенных численным путем. Так, разница между экспериментальными и численно установленными усилиями принимает положительные либо отрицательные значения в пределах до 5% для сжатых и растянутых стержней поясных сеток и раскосов и до 15% для сжатых опорных раскосов. Сравнительно малые, но имеющие место различия сопоставляемых величин объективно объясняются присутствующими погрешностями измерений и некоторым перераспределением усилий, обусловленным, в первую очередь, различными опорными реакциями.

При исследовании работы сжатого опорного раскоса фрагмента I для всех стержней, за исключением стержня теряющего устойчивость, установлена линейная зависимость между продольными усилиями, возникающими в стержнях, и испытательной нагрузкой, прикладываемой к нагружаемому узлам. В стержне, теряющем устойчивость, ближе к моменту наступления его предельного состояния эта зависимость нарушается. Существование линейных зависимостей, указывает на то, что в течение всего времени нагружения расчетная схема конструкции не изменяется.

Как отмечено в [1], узловая податливость влияет только на деформативность конструкций. При испытаниях фрагментов наблюдали превышение экспериментальных прогибов над их значениями определенными численно. При этом увеличение прогибов на начальных этапах нагружения происходило непропорционально росту испытательной нагрузки. Линейная зависимость установилась при значении узловой нагрузки составляющей 25-35% от предельной и сохранялась вплоть до потери устойчивости сжатого стержня. Деформативность пространственной конструкции в данном случае характеризуется особенностью работы узлового элемента на начальных этапах его нагружения.

Заключение. Проверку устойчивости упругих стержней, а также стержней, теряющих устойчивость в области упругопластических деформаций, вполне оправданно проводить в предположении шарнирного закрепления стержней в узлах. Такое допущение ни в коей мере не снижает надежности конструкции. Более того, сравнивая расчетную гибкость и гибкости, полученные для упругих стержней в результате обработки экспериментальных данных, важно отметить незначительную разницу в их значениях, что указывает на высокую экономическую эффективность конструкций системы «БрГТУ».

Список цитированных источников

1. Драган, В.И. Особенности работы структурных металлических конструкций системы «БрГТУ» / В.И. Драган, В.В. Люстибер // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1(49). – С. 80–86.
2. ГОСТ 10006-80 Трубы металлические. Метод испытаний на растяжение – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1998. – 8 с.
3. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1986. – 25 с.
4. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
5. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

УДК [69.008.6:692.426]:534.1

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО СООРУЖЕНИЯ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В Г. ВИТЕБСКЕ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мигель А.В.

Введение. Изменение собственной частоты колебания элемента конструкции, в зависимости от внутреннего осевого усилия, положено в основу проведения комплексных мероприятий по мониторингу технического состояния Летнего амфитеатра в г. Витебске, применительно к структурной системе УО «БрГТУ». В ходе проведенного этапа мониторинга было проанализировано свыше 150 элементов нижней поясной сетки и раскосов в опорных частях сооружения.