



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2015, ТОМ 21, НОМЕР 2, 63–79

УДК 624.012.4

(15)-0328-1

КОМПЛЕКСНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ БАГАТОГРАННИХ СТОЯКІВ

І. М. Гаранжа

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: garigo@mail.ru*

Отримана 18 травня 2015; прийнята 26 червня 2015.

Анотація. У статті розглянуто комплекс експериментальних досліджень напружено-деформованого стану (НДС) металевих багатогранних гнутих стояків (БГС), проведених у два етапи на базі Центру випробування будівельних конструкцій ДонНАБА. Розглянуті стояки призначені для використання як базису для конструкцій міської інфраструктури. У процесі досліджень вивчався характер руйнування натурних конструкцій (на прикладі восьмигранних освітлювальних стояків), а також напружено-деформований стан фрагментів натурних БГС як консольних елементів від дії згинального навантаження. Виконано порівняльний аналіз експериментально отриманих значень параметрів ПДВ із результатами чисельних досліджень, що вказав на придатність розрахункової моделі БГС для використання в інженерних розрахунках.

Ключові слова: металеві багатогранні стояки, експериментальні дослідження, випробувальний полігон, випробувальна зала, напружено-деформований стан, натурні конструкції, експериментальні моделі, тензометрія.

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МНОГОГРАННЫХ СТОЕК

И. М. Гаранжа

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: garigo@mail.ru*

Получена 18 мая 2015; принята 26 июня 2015.

Аннотация. В статье рассмотрен комплекс экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) металлических многогранных гнутых стоек (МГС), проведенных в два этапа на базе Центра испытания строительных конструкций ДонНАСА. Рассматриваемые стойки предназначены для использования в качестве базиса для конструкций городской инфраструктуры. В процессе исследований изучался характер разрушения натурных конструкций (на примере восьмигранных осветительных стоек), а также напряженно-деформированное состояние фрагментов натурных МГС как консольных элементов от действия изгибающей нагрузки. Выполнен сравнительный анализ экспериментально полученных значений параметров НДС с результатами численных исследований, указавший на пригодность расчетной модели МГС для использования в инженерных расчетах.

Ключевые слова: металлические многогранные стойки, экспериментальные исследования, испытательный полигон, испытательный зал, напряженно-деформированное состояние, натурные конструкции, экспериментальные модели, тензометрия.

RESEARCH EXPERIMENTAL COMPLEX OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL POLYGONAL POLES

Igor Garanzha

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.
E-mail: garigo@mail.ru*

Received 18 May 2015; accepted 26 June 2015.

Abstract. An experimental research complex of metal multifaceted poles' (MMP) stress-strain state (SSS) is performed in two stages: the research of six natural structural of MMP with high $H = 7.5$ и 10.5 m at the DonNACEA Tower Testing Station and a SSS laboratory studying of fragments natural structures of metal multifaceted poles. The purpose of experimental research at the 1st stage is to identify specific zones of poles' probable destruction and deformability, at the 2nd stage – (considering to the first stage's results) is determination the structure's stress-strain state at the joint work of the octagonal pole's fragment, and its base, and also verification of convergence results with theoretical assumptions. For the research we used the load tests method and the tensometry method of determining the stress strain in the structural body. Tests of natural structures performed according to a pre-designed program. For laboratory researches the special experimental stand has been designed. Ultimately determine the sufficient convergence of numerical and experimental studies' results of the multifaceted poles' SSS. So, the adequacy of finite element computational model for use in an engineering design has been confirmed.

Keywords: metal polygonal poles, experimental researches, tower test station, testing hall, stress-strain state, nature structures, experimental models, tensometry.

Введение

Многогранные гнутые стойки как инновационные строительные конструкции на территории Украины нуждаются в экспериментальном изучении их НДС, а также в механических испытаниях натуральных конструкций с целью повышения качества их проектирования. В ближайшей перспективе такой тип сооружений (или их модификации, например «многогранные трубобетонные стойки») может быть применен в качестве конструкций городской инфраструктуры, а именно опор воздушных линий электропередачи, осветительных стоек, башен мобильной связи, опор контактной сети городского и железнодорожного транспорта и т.д.

Анализ результатов расчета конструктивных элементов металлических восьмигранных стоек по существующим аналитическим методикам [1–8] и МКЭ [9–11], реализованном в программно-вычислительных комплексах SCAD и Lira, по-

казал их существенные расхождения. Это стало основной причиной для проведения экспериментальных исследований многогранных стоек, направленных на подтверждение или опровержение результатов численных исследований и формирование наиболее рациональной конечно-элементной модели для расчета таких конструкций в программно-вычислительных комплексах.

Цели и задачи экспериментальных исследований НДС

Экспериментальные исследования НДС металлических многогранных стоек выполнены в два этапа:

I этап – исследование шести натуральных конструкций НДС высотой $h=7,5$ и $10,5$ м на испытательном Полигоне Донбасской национальной академии строительства и архитектуры;

II этап – лабораторные исследования НДС фрагментов натуральных конструкций металлических многогранных стоек.

Цель экспериментальных исследований состоит на I этапе в определении характерных зон вероятного разрушения стоек и их деформативности, на II этапе – (с учетом результатов I этапа) определение параметров напряженно-деформированного состояния конструкций при совместной работе фрагмента восьмигранной стойки и ее базы, а также проверке сходимости результатов с теоретическими предпосылками.

Для достижения поставленных целей в ходе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- определение схемы загрузки и значений расчетных нагрузок натуральных конструкций МГС и их фрагментов;
- проведение статических нагрузочных испытаний шести натуральных конструкций металлических восьмигранных стоек;
- выполнение экспериментальных исследований на трех фрагментах натуральных металлических восьмигранных гнутых стоек (с разными геометрическими параметрами поперечного сечения);

- проведение сравнительного анализа результатов численных и экспериментальных исследований с целью формирования рациональной расчетной модели металлических многогранных стоек на основе полученной сходимости результатов.

Методика выполнения натурных нагрузочных экспериментальных исследований конструкций металлических МГС

Стойки закреплялись на силовом полу испытательного полигона при помощи специальных тумб и струбцин и испытывались в проектное положение на расчетную нагрузку согласно заранее разработанных схем загрузки (в зависимости от геометрических параметров стойки – высоты и размеров сечения).

Металлические восьмигранные стойки (8), установленные на силовом полу (1), нагружались до расчетной нагрузки N_p , которая создавалась натяжением силового троса (7) через силовую башню нормального режима (3) с помощью механических лебедок (см. рис. 1). Любая трещина или видимая деформация любой

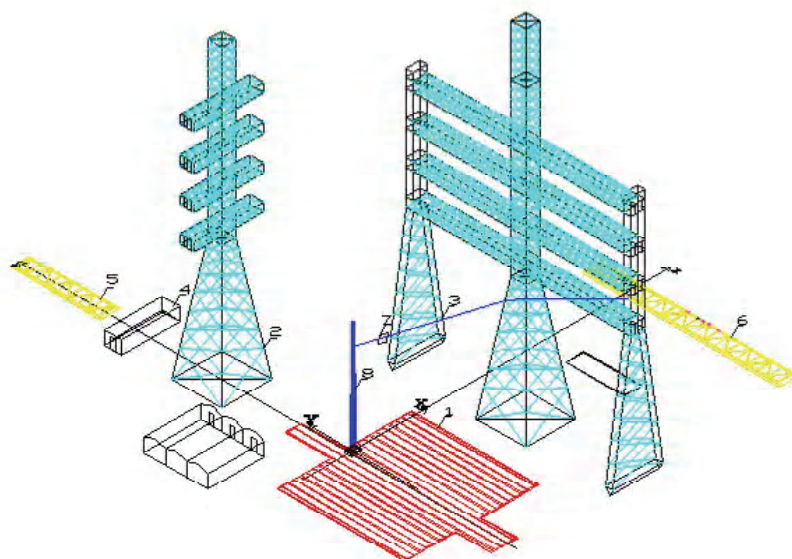


Рисунок 1. Схема испытательного полигона с исследуемой многогранной опорой: 1 – универсальный силовой пол; 2 – силовая башня нормального режима; 3 – силовая башня аварийного режима; 4 – площадка с лебедками; 5 – силовая площадка для полиспастов нормального режима; 6 – силовая площадка для полиспастов аварийного режима; 7 – динамометр; 8 – испытываемая опора.

детали, которая может повлиять на работу конструкции металлической многогранной стойки, рассматривалась как разрушение (отказ конструкции).

Исследуемые металлические стойки на полигоне приведены на рис. 2.

Нагрузки на стойки производятся ступенями в % от расчетной нагрузки: 50, 70, 90, 95 и 100 % [12–17, 21–27]. После каждого этапа загрузки проводились этапы полной разгрузки испытуемой стойки и выдерживалось время до полного возвращения конструкции в исходное положение.

Опоры под нагрузкой очередного этапа выдерживаются до полной стабилизации деформаций в контролируемых точках. Таковыми точками для всех шести испытуемых опор были приняты:

- крайняя вертикальная точка стойки (точка 1);
- точка приложения испытательных нагрузок (в реалии – точка крепления осветительного оборудования) (точка 2).

Примеры геометрических схем исследуемых восьмигранных стоек с указанием их геометрических параметров и контролируемых точек приведены на рис. 3.

Точность всех измерительных устройств проверялась непосредственно перед экспериментом.

Прикладываемые нагрузки к опорам по схемам загрузки измерялись в точках их приложения. Этап нагружения засчитывался, если все прикладываемые нагрузки находятся в пределе $\Delta N = \pm 2\%$ от номинального значения на текущем этапе.

Для каждой ступени нагружения измерялись продольные отклонения стоек в контролируемых точках f_x , мм с помощью геодезических приборов в плоскости приложения нагрузки. Опоры нагружаются до расчетной 100 % нагрузки N_p .

Результаты экспериментальных исследований натуральных конструкций металлических восьмигранных стоек

Натурные исследования несущей способности металлических восьмигранных стоек показали повышенную деформативность и несовершенство их конструкции. Об этом свидетельствовали следующие, характерные практически для всех испытуемых стоек, разрушения (рис. 4), наступившие еще до достижения расчетных нагрузок на стойки (табл. 1):

- потеря устойчивости стенки стоек;
- отрыв опорных ребер;
- деформация опорной плиты;
- трещина в сварных швах крепления стойки к базе.

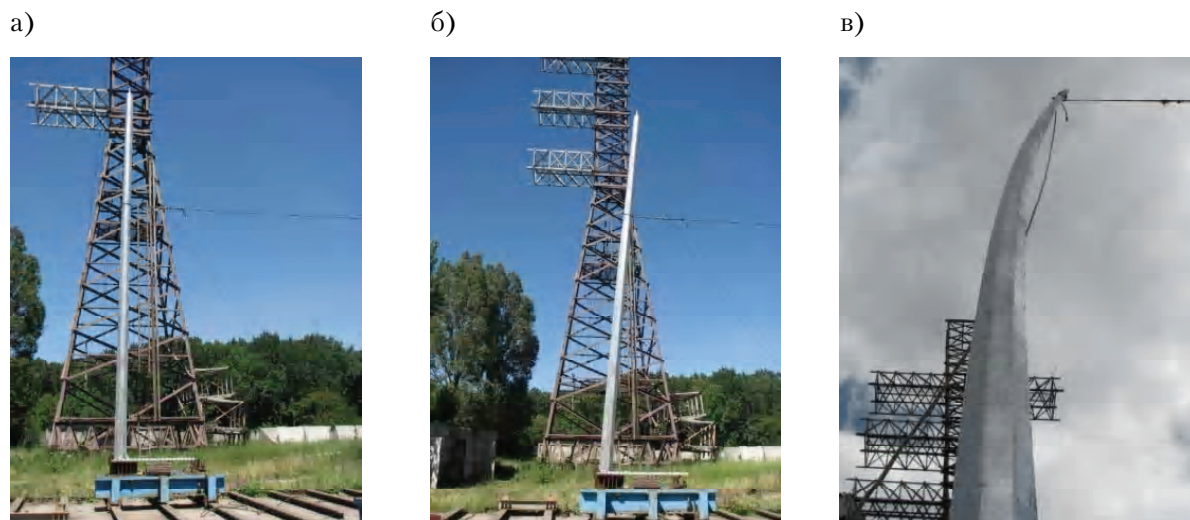


Рисунок 2. Исследуемые металлические стойки в рабочем положении на силовом полу испытательного Полигона ДонНАСА: а, б) высотой $h=10,5$ м; в) высотой $h=7,5$ м.

Вышеперечисленные разрушения восьмигранных стоек позволили определить зоны (приопорные зоны стоек и их базы), по которым вероятнее всего произойдет разрушение металлических многогранных конструкций в условиях эксплуатации.

Повышенная деформативность стоек, разрушение конструкций до наступления расчетной нагрузки указали на необходимость детального анализа современных методик по расчету многогранных стальных стоек. К таким относятся метод конечных элементов, реализованный в программно-вычислительных комплексах SCAD и Lira [9–11], а также аналитические методики, предлагаемые нор-

мативными документами и специальной литературой [1–8].

Методика выполнения лабораторных экспериментальных исследований НДС фрагментов натуральных конструкций МГС

Как уже говорилось, в качестве объекта экспериментальных исследований были приняты фрагменты натурной конструкции стальных восьмигранных гнутых стоек замкнутого коробчатого сечения, выполненных в виде усеченного конуса с постоянной толщиной стенки по высоте совместно с восьмиболтовой базой.

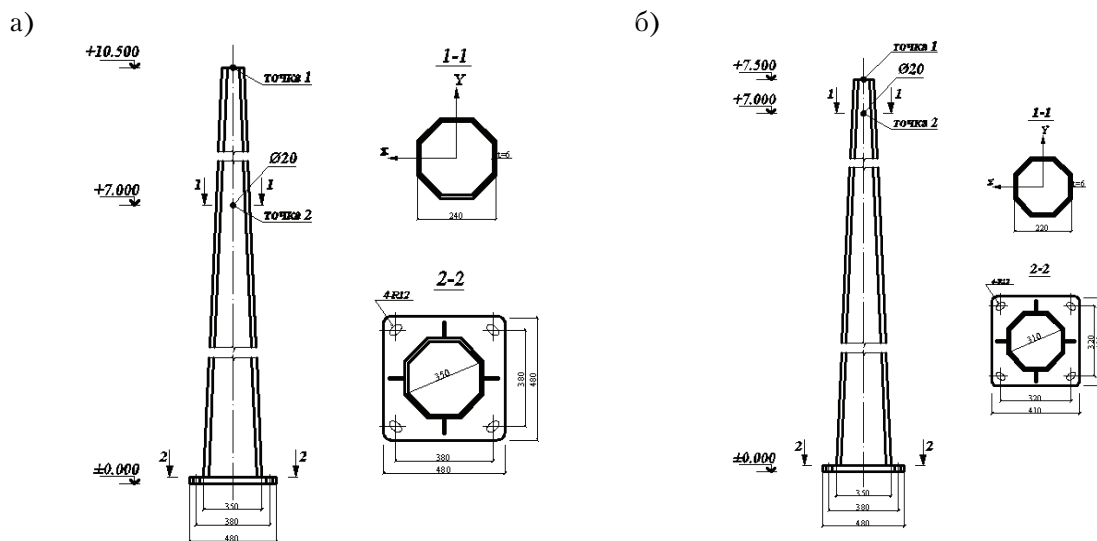


Рисунок 3. Геометрические схемы исследуемых стоек: а) МГС-1 $h=10,5$ м; б) МГС-2 $h=7,5$ м.



Рисунок 4. Разрушение металлических восьмигранных стоек: а) отрыв опорного ребра, деформация опорной плиты, трещина шва крепления стенки к базе опоры; б) потеря местной устойчивости стенки.

Таблица 1. Повреждения исследуемых металлических восьмигранных стоек

Марка опоры	Момент первого повреждения, кН	Описание повреждения
МГС–1	11,3	Отрыв опорного ребра, трещина в сварных швах крепления стойки к базе
МГС–2	9,2	Деформация опорной плиты ($f = 4$ мм), трещины в сварных швах
МГС–3	6,7	Деформация опорной плиты ($f = 3$ мм), сжатое ребро начало вдавливаться, трещины в сварных швах
МГС–4	7,3	Деформация опорной плиты ($f = 4$ мм), трещины в сварных швах крепления стойки к базе
МГС–5	3,8	Трещины в сварных швах крепления стойки к базе, деформация опорной плиты ($f = 2$ мм)
МГС–6	4,0	Разрыв шва крепления опорного ребра к стойке, трещины в сварных швах крепления стойки к базе

В процессе эксперимента проводились исследования тех зон, которые являются наиболее напряженными как сжатием, так и растяжением в стойке, нейтральные зоны с нулевыми напряжениями, а также зоны сжатия и растяжения в базе. Таковыми зонами были определены (на основании численных исследований и натурного эксперимента):

- приопорные зоны стойки МГС, расположенные перпендикулярно направлению действия экспериментальной нагрузки (максимальные сжимающие и растягивающие напряжения);
- зоны, расположенные в базе между отверстиями под болты, работающие на сжатие, и ближайшей гранью стойки (максимальные сжимающие и растягивающие напряжения);
- зона с нулевыми значениями напряжений, расположенная на нейтральной оси стойки, рассматривалась как контрольная.

Для проведения экспериментальных исследований была запроектирована и изготовлена экспериментальная установка. Экспериментальные исследования осуществлялись в испытательном зале кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Расчетное сопротивление сталей определялось на основании сертификата на металл и [18].

Для загрузки экспериментальной модели испытательной нагрузкой использован гидравлический домкрат ДГ-20, хорошо моделирующий действительные условия нагружения узловой нагрузкой и тарированный (с целью определения цены деления шкалы манометра) на механическом прессе.

Общая схема экспериментального стенда для исследования НДС фрагментов натуральных конструкций МГС представлена на рис. 5.

Экспериментальные модели представляют собой восьмигранные стальные гнутые стойки, полученные как фрагмент натурной конструкции осветительной восьмигранной опоры, выполненной из стали марки С245, с разными геометрическими параметрами поперечных сечений. Длина каждой модели $h=2$ м (рис. 6).

Нагрузка на конструкции металлических фрагментов натуральных МГС прикладывалась ступенями по 10 % от расчетной при помощи гидравлического домкрата ДГ-20, работающего на основе маслостанции. Между каждым этапом загрузки проводилась полная разгрузка экспериментальной модели и выдерживалось необходимое количество времени для возвращения конструкции модели в исходное положение. Нагрузочные испытания проводились по загрузению в зависимости от геометрических параметров экспериментальных моделей МГС. Продолжительность каждой ступени

пени загрузки ограничивалось временем (≈ 1 минута), необходимым для измерения отклонений, нагрузок и визуального осмотра модели [12–17, 21–27]. Модель под нагрузкой очередного этапа выдерживается до полной стабилизации деформаций в контролируемых точках. Нагрузки прикладывались так, чтобы не возникало никаких динамических воздействий.

Для измерения внутренних деформаций в теле моделей МГ при исследованиях использовались проволочные петлевые тензодатчики [19] сопротивления с базой 20 мм (для стойки) и 10 мм (для базы) на бумажной основе (марки ПКБ с электрическим сопротивлением $R=200$ Ом), выпущенных «Заводом опытных конструкций, изделий и оборудования» Госстроя СССР. Для наклейки тензодатчиков на конструкцию использовался клей «Цианопан». Расположение тензодатчиков на модели приведено на рис. 7, 8. Зоны расположения тензодатчиков на экспериментальных моделях МГС определялись на основе предварительно проведенного численного исследования моделей, результаты которого приведены на рис. 8.

Выбор тензодатчиков с базой 10 и 20 мм обусловлен исследованием действительного НДС в местах между сварным швом крепления МГС к базе и отверстиями под анкерные бол-

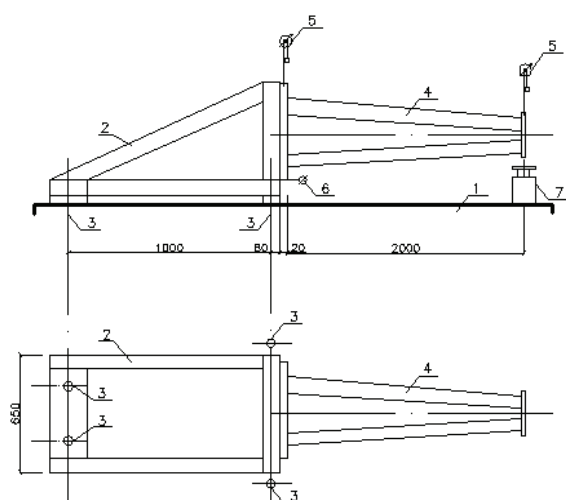
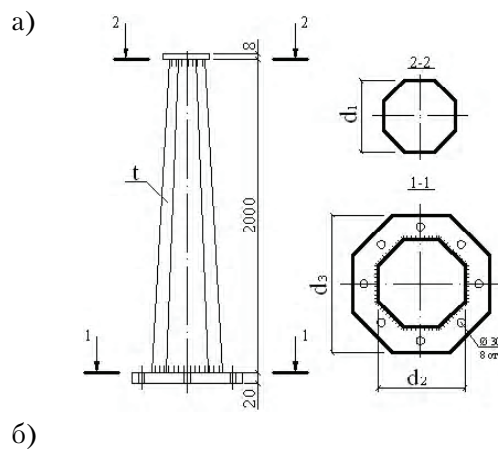


Рисунок 5. Схема испытательного стенда фрагментов МГС: 1 – силовой пол; 2 – опорная рама; 3 – анкерные; 4 – испытываемый фрагмент МГС; 5 – прогибомеры ПАО-6; 6 – индикатор часового типа ИЧ-10; 7 – гидравлический домкрат ДГ-20.

ты, при этом не приближаясь к ним минимум на 30 мм, для того чтобы краевые эффекты в этих зонах не повлияли на конечный результат. Указанное расположение тензодатчиков на рис. 7 необходимо для получения точной информации о НДС в характерных зонах, а именно: нормальных и касательных напряжений в стойках и базе, а также перемещений характерных точек конструкции испытываемой модели.

Выбор тензодатчиков с базой 10 и 20 мм обусловлен размерами конечных элементов, используемых в расчетных моделях МГС при численных исследованиях НДС, а также их результатами. Указанное расположение тензодатчиков (см. рис. 8) необходимо для получения информации о НДС в характерных зонах, а именно: нормальных и касательных напряжений в стойке и базе, а также перемещений характерных точек конструкции испытываемой модели при помощи прогибомеров ПАО-6.

Для проверки тензочувствительности и цены деления датчиков была выполнена их контрольная тарировка на эталонной консольной балке. Средняя цена деления датчиков, наклеенных на клею «Цианопан», составила



Марка	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	t , мм
МГС-1	325	350	650	6
МГС-2	290	280		6
МГС-3	225	220		5

Рисунок 6. Экспериментальные модели МГС: а) геометрическая схема моделей; б) типоразмеры моделей.

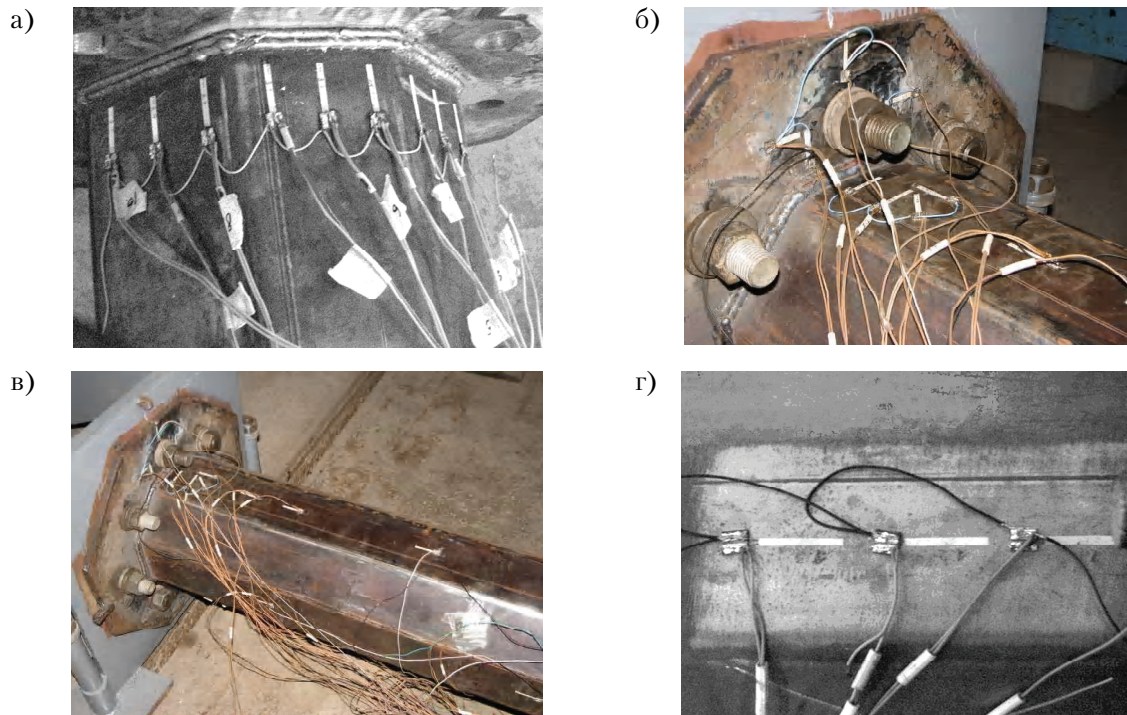


Рисунок 7. Расположение тензодатчиков в исследуемых зонах моделей: а) зона растяжения стойки; б), в), г) сжатая и нейтральная зона стойки, зона растяжения базы.

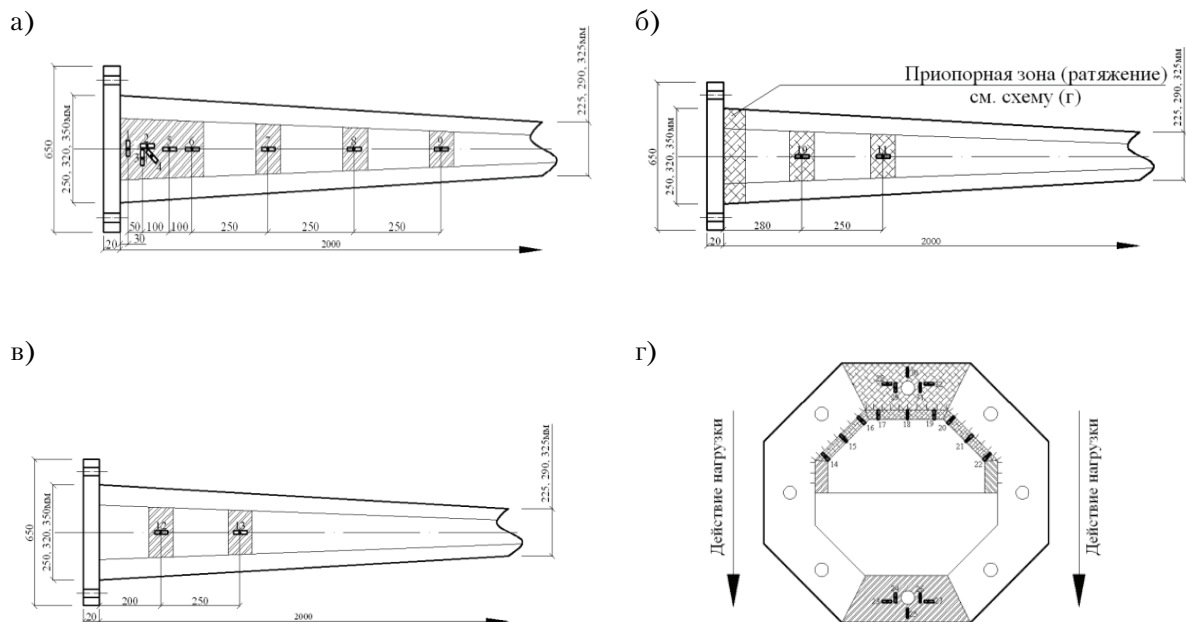


Рисунок 8. Схема расположения датчиков на моделях МГС (по зонам): а) зона сжатия стойки; б) зона растяжения стойки; в) нейтральная зона стойки; г) пропорциональная зона растяжения стойки + зоны растяжения и сжатия базы.

$C_{20}=3,71 \text{ кг/см}^2$ для датчиков с базой 20 мм и $C_{10}=3,75 \text{ кг/см}^2$ для датчиков с базой 10 мм.

Снятие показаний с тензодатчиков производилось с применением системы измерительной тензометрической СИИТ-3 (рис. 9, 10).

Согласно предварительному расчету расположение датчиков на моделях выполнялось по следующим характерным зонам (см. рис. 8):

- № 1–9 – зона сжатия стойки;
- № 10–11 – зона растяжения стойки;
- № 12–13 – нейтральная зона стойки (границы стойки с нулевыми напряжениями);
- № 14–22 – приопорная растянутая зона стойки (по трем граням);
- № 23–27 – зона растяжения в базе модели;
- № 28–32 – зона сжатия в базе модели.

Для проведения лабораторных экспериментальных исследований напряженно-деформи-

рованного состояния конструкций металлических МГС была проведена выборка результатов численных исследований, которые используются для сравнения с экспериментальными результатами с целью определения их сходимости. Результаты численных исследований НДС на примере металлической восьмигранной модели МГС-1 приведены на рис. 11. Этапы загрузки для моделей МГС приведены в табл. 2...4.

Обработка результатов эксперимента производилась по методикам, описанным в [14, 17, 19, 20] в программном комплексе «EXCEL». На основании показаний тензодатчиков по загрузкам в результате обработки были определены значения кольцевых, меридиональных и касательных напряжений в исследуемых зонах экспериментальных моделей металлических



Рисунок 9. Измерительная тензометрическая система СИИТ-3.

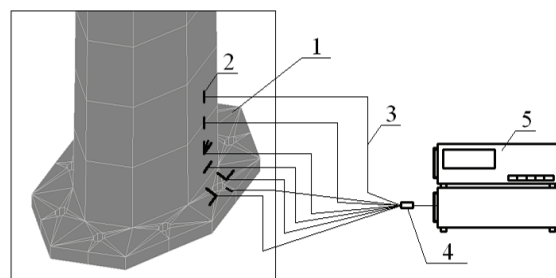


Рисунок 10. Схема снятия показаний с тензодатчиков (на примере сжатой зоны МГС): 1 – экспериментальная модель МГС; 2 – петлевые тензодатчики; 3 – медные кабели передачи электрического сигнала; 4 – компенсационный датчик; 5 – тензометрическая измерительная система СИИТ-3.

Таблица 2. Загрузка № 1 фрагмента натурной модели «МГС 1 + база»

Ступени загрузки модели МГС														
10 %			20 %			30 %			40 %			50 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
0,4	0,39	0,41	0,8	0,78	0,82	1,2	1,18	1,22	1,6	1,57	1,63	2,0	1,96	2,04
60 %			70 %			80 %			90 %			100 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
2,4	2,35	2,45	2,8	2,74	2,86	3,2	3,14	3,26	3,6	3,53	3,67	4,0	3,92	4,08

Таблица 3. Загрузка № 2 фрагмента натурной модели «МГС 2 + база»

Ступени загрузки модели МГС														
10 %			20 %			30 %			40 %			50 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
0,3	0,294	0,306	0,6	0,588	0,612	0,9	0,882	0,918	1,2	1,176	1,224	1,5	1,47	1,53
60 %			70 %			80 %			90 %			100 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
1,8	1,764	1,836	2,1	2,058	2,142	2,4	2,352	2,448	2,7	2,646	2,754	3,0	2,94	3,06

Таблица 4. Загрузка № 3 фрагмента натурной модели «МГС 3 + база»

Ступени загрузки модели МГС														
10 %			20 %			30 %			40 %			50 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
0,2	0,196	0,204	0,4	0,392	0,408	0,6	0,588	0,612	0,8	0,784	0,816	1,0	0,98	1,02
60 %			70 %			80 %			90 %			100 %		
N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %	N	-2 %	+2 %
(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)	(T)
1,2	1,176	1,224	1,4	1,372	1,428	1,6	1,568	1,632	1,8	1,764	1,836	2,0	1,96	2,04

стоек, а также построены графики зависимости напряжений и перемещений от прикладываемой нагрузки.

Фрагменты натуральных конструкций восьмигранных стоек в экспериментальном положении на испытательном стенде приведены на рис. 12.

Для экспериментального изучения действительной работы конструкций стальных многогранных стоек применяются методы механического моделирования испытаний с соблюдением критериев простого подобия:

- модель и натура геометрически подобны;
- нагрузки, действующие на модель и натуру, подобны;
- безразмерные величины (μ , коэффициент трения, ϵ) одинаковы, т. е. их масштабные множители равны 1;
- материал модели и натуре может быть разным, но должен подчиняться закону Гука;
- коэффициенты подобия для напряжений и модули упругости одинаковы.

Соблюдение всех вышеперечисленных критериев подобия обеспечивается тем, что экспериментальные модели МГС являются фрагментами натуральных конструкций.

Результаты лабораторных экспериментальных исследований НДС фрагментов натуральных конструкций МГС

Анализ результатов лабораторных экспериментальных исследований моделей МГС заключается в сравнении численных и экспериментальных результатов, а именно проверке их сходимости. В данном случае интересующими параметрами для сравнения являлись напряжения в характерных зонах конструкции (определенные по результатам численных исследований) и перемещения крайних верхних точек конструкции.

Результаты сравнения численных и экспериментальных исследований (по характерным зонам конструкции) на примере экспериментальной модели МГС-1 приведены на рисунках 13...16, а также в таблицах 5, 6.

Изгибные напряжения по толщине стенки стоек лабораторно не изучались по причине невозможности установки тензодатчиков на внутренней поверхности моделей МГС. Поэтому сравнение значений напряжений на внешней и внутренних поверхностях моделей МГС выполнено только по результатам численных исследований.

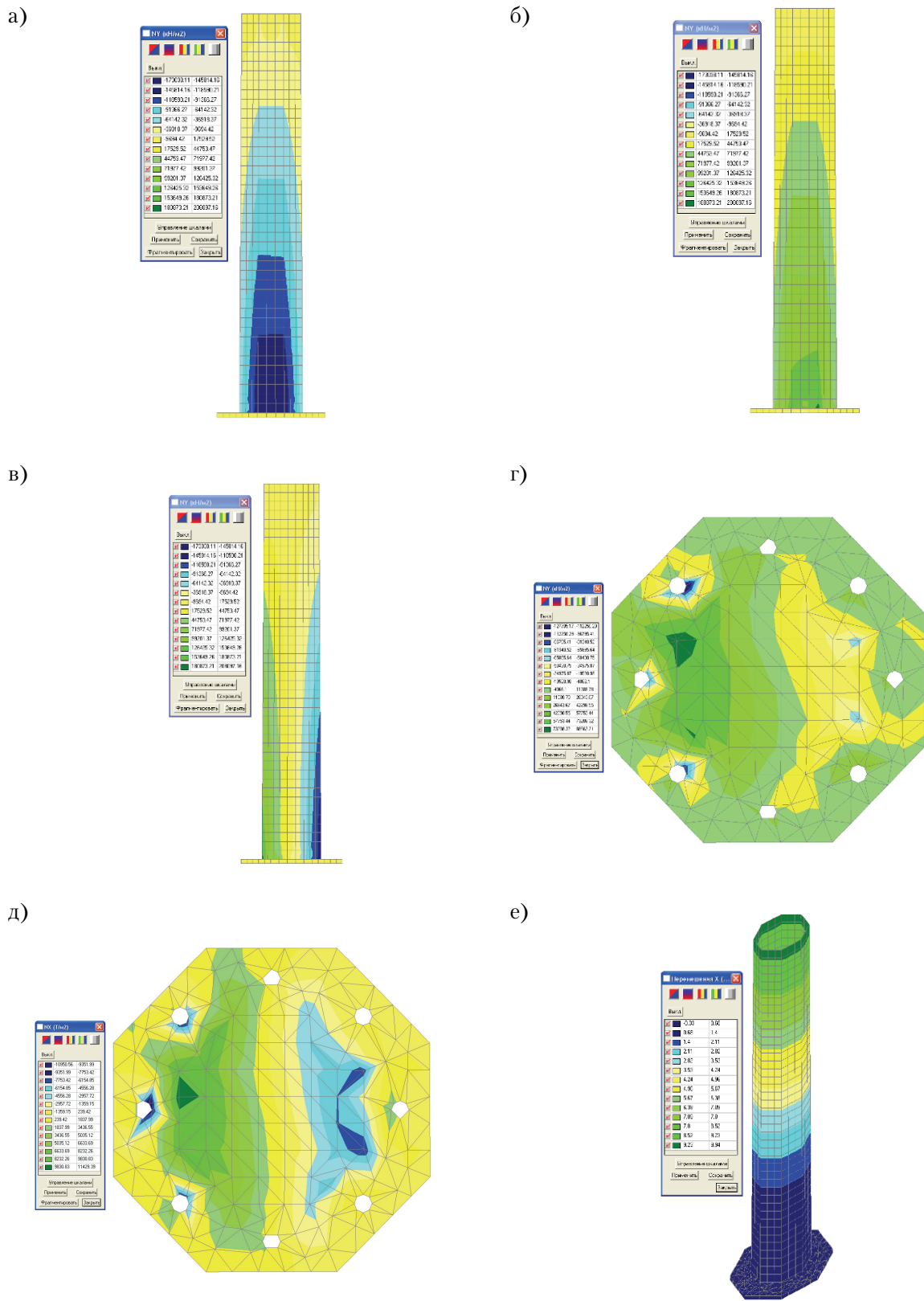


Рисунок 11. Зоны исследования модели МГС-1 по результатам численных исследований ее НДС: а) зона max сжатия в стойке (σ_y , МПа); б) зона max растяжения в стойке (σ_y , МПа); в) нейтральная зона стойки ($\sigma_y=0$); г) база стойки (σ_y , МПа); д) база стойки (σ_x , МПа); е) перемещения верха стойки (f, мм).



Рисунок 12. Экспериментальные модели МГС высотой $h=2$ м и количеством граней $n=8$, на экспериментальном стенде.

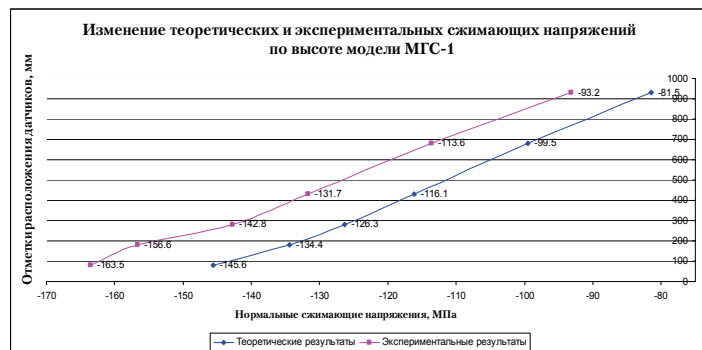


Рисунок 13. Сравнение теоретических и экспериментальных значений нормальных напряжений σ_y , в зоне сжатия моделей по высоте модели МГС-1.



Рисунок 14. Сравнение теоретических и экспериментальных значений нормальных напряжений σ_y , в опорной зоне растяжения модели МГС-1.

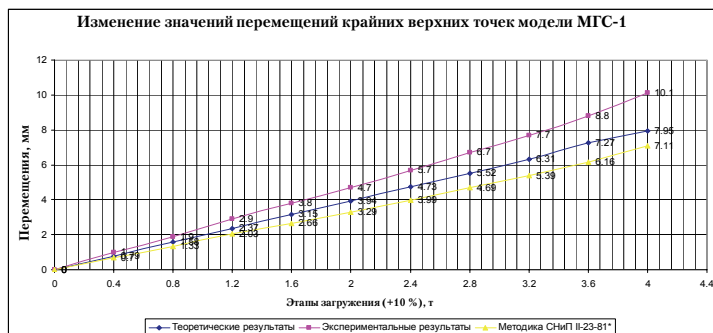


Рисунок 15. Приращение значений перемещений крайних верхних точек модели по этапам нагружения модели МГС-1.

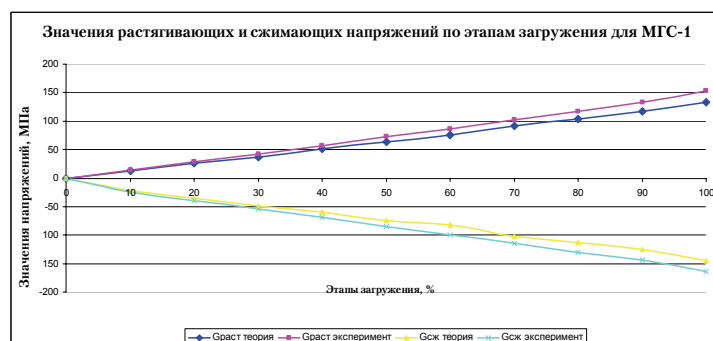


Рисунок 16. Изменение значений растягивающих и сжимающих напряжений в зонах тах напряжения и сжатия стойки (точки № 2, 18) по этапам нагружения модели МГС-1.

Таблица 5. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований модели МГС-1

Модель	Исследуемая зона	№ точки (датчика)	Значение σ_x или σ_y , МПа (МКЭ)	Значение σ_x или σ_y , МПа (эксперимент)	$\Delta_1, \%$ $\frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_m}{\sigma_{\text{э}}} \cdot 100\%$
МГС-1	Зона сжатия стойки	1	-22,5	-25,5	13,3
		3	-17,8	-20,5	15,1
		4	≈0	≈0	0
	Зона растяжения стойки	10	127,9	146,6	14,6
		11	108,8	123,9	13,9
	Нейтральная зона стойки	12	1,17	2,01	41,8
		13	0,91	1,66	45,2
	Зона сжатия в базе	23	-7,79	-9,2	17,3
		24	-15,9	-18,5	16,3
		25	-11,2	-12,9	15,4
	Зона сжатия в базе	26	-14,8	-17,3	16,7
		27	11,2	13,1	16,5
	Зона растяжения в базе	28	3,39	3,95	16,8
		29	6,2	7,2	14,9
		30	3,1	3,58	15,6
		31	7,7	9,04	17,5
32		-2,71	3,1	15,2	

Таблица 6. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований моделей стальных МГС (по перемещениям крайних верхних точек)

Наименование модели	Перемещения f_b , мм (СНиП)	Перемещения f_c , мм (МКЭ)	Перемещения f_s , мм (эксперимент)	$\Delta_1, \%$ $\frac{f_3 - f_m}{f_3} \cdot 100\%$	$\Delta_2, \%$ $\frac{f_3 - f_4}{f_3} \cdot 100\%$	$\Delta_3, \%$ $\frac{f_m - f_4}{f_m} \cdot 100\%$
МГС–1	7,11	7,95	10,1	21,3	29,8	10,6
МГС–2	7,37	8,41	10,6	20,7	30,5	12,4
МГС–3	13,51	15,37	18,9	18,7	28,5	12,1

Выводы

1. Экспериментально определены характерные разрушения в приопорной зоне многогранных стоек под действием изгибающей нагрузки. Таковыми являются потеря устойчивости стенки, отрыв опорных ребер жесткости и повышенная деформативность опорной плиты.
2. Испытания натуральных конструкций указали на повышенную деформативность конструкций МГС. Деформации исследуемых стоек превысили предельные нормативные значения в несколько раз.
3. Специально разработанный стенд позволил экспериментально изучить напряженно-деформированное состояние фрагментов натуральных конструкций МГС.
4. Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет говорить о достаточной сходимости результатов исследований по экспериментальной и конечно-элементной методике, что подтверждает рациональность применения последней в инженерных расчетах при проектировании конструкций на основе МГС.
5. Экспериментальные результаты подтверждают расчетные предпосылки о не влиянии

краевых напряжений на прочность стенки в приопорной зоне при действии расчетных нагрузок. Вопрос общей устойчивости стоек и влияния на нее краевых напряжений детально не исследовались в связи с соотношением конструктивных размеров и особенностями напряженно-деформированного состояния стоек (консольно-изогнутый элемент). Местная устойчивость стенки обеспечивается ребрами жесткости в приопорной зоне стоек.

6. Изгибные напряжения по толщине стенки стоек лабораторно не изучались по причине невозможности установки тензодатчиков на внутренней поверхности моделей МГС. Поэтому сравнение значений напряжений на внешней и внутренних поверхностях моделей МГС выполнено только по результатам численных исследований, которое показало различие в значениях меридиональных напряжений 6...9 %, в кольцевых 4...7 %, что свидетельствует о не влиянии изгибных напряжений по толщине стенки на ее НДС и подтверждает наличие двусосного напряженного состояния МГС.

Литература

1. Лессиг, Е. Н. Листовые металлических конструкций [Текст] / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеева, А. Г. Соколов. – М. : Издательство литературы по строительству, 1970. – 488 с.
2. Металлические конструкции [Текст] : учеб. для строит. спец. вузов. Т. 3 : Специальные конструк-

References

1. Lessig, E. N.; Lileeva, A. F.; Sokolov, A. G. In sheet form assembled steel sections. Moscow: Publishing house of literature according to civil engineering, 1970. 488 p. (in Russian)
2. Arzhakov, V. G.; Babkin, V. I.; Gorev, V. V. (Ed.). Metal Constructions. Volume 3: Special structure

- ции и сооружения / [В. Г. Аржаков, В. И. Бабкин, В. В. Горев и др.]; под ред. В. В. Горева. – [2-е издание]. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
3. Беляев, Н. М. Соппротивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. – [Издание четырнадцатое]. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
 4. Пешль, Т. Соппротивление материалов [Текст] / Т. Пешль; пер. с нем. Г. А. Вольперта. – М.: Гос-техтеориздат, 1948. – 380 с.
 5. Бирбер, И. А. Резьбовые и фланцевые соединения [Текст] / И. А. Бирбер, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 367 с.
 6. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций [Текст] / М-во монтажных и специальных строительных работ СССР, СО Стальсонтаж, ВНИПИ Пром-стальконструкция [и др.]. – М.: ЦБНТИ, 1989. – 52 с.
 7. Иосилевич, Г. Б. Общий метод расчета фланцевый соединений [Текст] / Г. Б. Иосилевич, С. Т. Ковган, Ю. В. Лукашук // Вестник машиностроения. 1980. № 16. С. 38–46.
 8. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03-85) / Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений. – М.: ЦНИИпромзданий, 1990. – 49 с.
 9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 618 с.
 10. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций [Текст] / [М. С. Барабаш, М. В. Лазнюк, М. Л. Мартынова, Н. И. Пресняков]; под редакцией проф. А. А. Нилова. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2008. – 326 с.
 11. Барабаш, М. С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій [Текст] / М. С. Барабаш, С. В. Козлов, Д. В. Медведенко. – К.: НАУ, 2012. – 572 с.
 12. ДСТУ ІЕС 60652:2002. Испытание опор воздушных линий электропередач механическими нагрузками [Текст]. – К.: Держстандарт Украины, 1979. – 10 с.
 13. Дубинич, Л. А. Современный подход к испытаниям элементов [Текст] / Л. А. Дубинич // Материалы второй российской с международным участием научно-практической конференции «Линии электропередачи 2006: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс», 5–8 июля 2006 г. – Новосибирск: Энергетик, 2006. – С. 298–309.
 14. Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений [Текст]: учебное пособие / Е. В. Горохов, В. Ф. Мушанов, В. Н. Васылев, А. А. Ягмур. – К.: УМК ВО, 1991. – 154 с. and construction. Moscow: High School, 2002. 544 p. (in Russian)
 3. Beliaev, N. M. Theory of strength of materials. Fourteenth edition. Moscow: Science, 1965. 856 p. (in Russian)
 4. Peshl, T. Theory of strength of materials. Moscow: Gosteh teorizdat, 1948. 380 p. (in Russian)
 5. Birber, I. A.; Yosilevich, G. B. Tapped and flanged connections. Moscow: Mechanical Engineering, 1990. 367 p. (in Russian)
 6. Guidelines for design, engineering, fabrication and assembly of flanged connections of steel engineering constructions. Moscow: TsBNTI, 1980. 52 p. (in Russian)
 7. Iosilevich, G. B.; Kovgan, S. T.; Lukashchuk, Yu. V. General method of design of flanged connections. In: *Mercury of machine industry*, 1980, № 16, p. 38–46. (in Russian)
 8. Textbook of hold-down bolts design for bonding building constructions and equipment (to SNiP 2.09.03-85). Moscow: TsNIIPromzdaniy, 1990. 49 p. (in Russian)
 9. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Calculation models of constructions and the possibility of their analysis. Kyiv: Steel, 2002. 618 p. (in Russian)
 10. Barabash, M. S.; Lazniuk, M. V.; Martynova, M. L.; Presniakov, N. I.; Edited by Nilov, A. A. State-of-the art technology of design and engineering of steel and wood constructions. Moscow: Publishing house of Association of Civil Engineering Institutions, 2008. 326 p. (in Russian)
 11. Barabash, M. S.; Kozlov, S. V.; Medvedenko, D. V. Computer technologies of structural steel design. Kyiv: NAU, 2012. 572 p. (in Ukrainian)
 12. DSTU IEC 60652:2002. Testing operation of support of overhead transmission lines by mechanical loading. Kyiv: GosStandart of Ukraine, 1979. 10 p. (in Russian)
 13. Dubinich, L. A. Modern approach to the component test. In: *Materials of the second Russian with international participation of research and practice conference «Power transmission lines 2006: design, civil engineering, operational experience and scientific and technological progress»*, 5–8th of July, 2006. Novosibirsk: Energetic, 2006, p. 298–309. (in Russian)
 14. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Vasylev, V. N.; Yagmur, A. A. Surveying and testing of load carrying structure of buildings and constructions. Textbook. Kyiv: UMK VO, 1991. 154 p. (in Russian)
 15. Aronov, R. I. Structures testing. Textbook. Moscow: High School, 1974. 187 p. (in Russian)
 16. Zolotukhin, Yu. D. Engineering constructions testing: textbook for institutes with a degree in «Industrial and Civil Construction». Minsk: High School, 1983. 208 p. (in Russian)
 17. Kasatkin, B. S.; Kudrin, A. B.; Lobanov, L. M. et al. Experimental methods of strain analysis. Resource Book. Kyiv: Scientific thought, 1981. 584 p. (in Russian)

15. Аронов, Р. И. Испытание сооружений [Текст] : учебное пособие для вузов / Р. И. Аронов. – М. : Высшая школа, 1974. – 187 с.
16. Золотухин, Ю. Д. Испытание строительных конструкций [Текст] : учебное пособие для вузов по специальности «Промышленное и гражданское строительство» / Ю. Д. Золотухин. – Минск : Высшая школа, 1983. – 208 с.
17. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст]. Справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и [др.]. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.
18. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88). Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]. – Введ. 01.01.86. – М. : Стандартинформ, 2006. – 24 с.
19. Руководство по тензометрированию строительных конструкций и материалов [Текст] / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М. : ОНТИ НИИЖБ, 1971. – 314 с.
20. Металлические конструкции. Элементы конструкций [Текст] / [В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов и др.]; под редакцией В. В. Горева. – М. : Высшая школа, 2004. – 551 с.
21. ASTM D 1143. Standard Load Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load [Текст]. – Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 2002. – 43 p.
22. Crowther, Carroll L. Load Testing of Deep Foundations [Текст] / Carroll L. Crowther. – New York etc. : Wiley, Cop., 1988. – 233 p.
23. Davisson, M. T. High Capacity of Steel Tower Structures [Текст] / M. T. Davisson. – Chicago : Illinois Institute of Technology, 1973. – 96 p.
24. ANSI/AISC-360-05. Specification for Structural Steel Buildings [Текст]. – Chicago, Illinois : American Institute of Steel Construction, 2005. – 256 p.
25. Goia, L. Experimental panel to study the influence of combined mechanic loads on overhead lines [Текст] / L. Goia, G. Gheorgita // The Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. – Reykjavik (Iceland) : Buildings & Structures, 1998. – P. 241–246.
26. Porterfield, M. L. Full-scale measurements on low-rise structure [Текст] / M. L. Porterfield, N. P. Jones // Proc. of International Conf. «Wind engineering into 21th century» / Larsen, Larose & Livesey (Eds). – Rotterdam : Balkema, 1999. – P. 1839–1846.
27. Full-scale field measurements of wind and structural response of lattice tower [Текст] / J. Shunmugasundaram, S. Gomathinayagam, P. Harikrishna, N. Lakshmanan // Proc. of International Conf. «Wind engineering into 21th century» / Larsen, Larose & Livesey (Eds). – Rotterdam : Balkema, 1999. – P. 1839–1846.
18. GOST 1497-84. Metals. Methods of tension test. Moscow: Standartinform, 2006. 24 p. (in Russian)
19. Guideline for strain measurement of engineering constructions and materials. Moscow: ONTINIIZhB, 1971. 314 p. (in Russian)
20. Gorev, V. V. (Ed.); Uvarov, B. Yu.; Fillipov, V. V. Metal Constructions. Constructions units. Moscow: High School, 2004. 551 p. (in Russian)
21. ASTM D 1143. Standard Load Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2002. 43 p.
22. Crowther, Carroll L. Load Testing of Deep Foundations. New York etc.: Wiley, Cop., 1988. 233 p.
23. Davisson, M. T. High Capacity of Steel Tower Structures. Chicago: Illinois Institute of Technology, 1973. 96 p.
24. ANSI/AISC-360-05. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2005. 256 p.
25. Goia, L.; Gheorgita, G. Experimental punnel to study the influence of combined mechanic loads on overhead lines. In: *The Eighth International Workshop on Athmosferic Icing of Structures*. Reykjavik (Iceland): Buildings & Structures, 1998, p. 241–246.
26. Porterfield, M. L.; Jones, N. P. Full-scale measurements on low-rise structure. In: *Proc. of International Conf. «Wind engineering into 21th century» / Larsen, Larose & Livesey (Eds)*. Rotterdam: Balkema, 1999, p. 1839–1846.
27. Shunmugasundaram, J.; Gomathinayagam, S.; Harikrishna, P.; Lakshmanan, N. Full-scale field measurements of wind and structural response of lattice tower. In: *Proc. of Intemational Conf. «Wind engineering into 21th century» / Larsen, Larose & Livesey (Eds)*. Rotterdam: Balkema, 1999, p. 1839–1846.

Гаранжа Ігор Михайлович — к. т. н., доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических решетчатых, многогранных листовых и трубобетонных опор воздушных линий электропередачи (ПЛ). Создание новых конструктивных решений опор ВЛ с применением прогрессивных технологий и материалов.

Гаранжа Игорь Михайлович — к. т. н., доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических решетчатых, многогранных листовых и трубобетонных опор воздушных линий электропередачи, создание новых конструктивных решений опор ВЛ с применением прогрессивных технологий и материалов.

Garanzha Igor — Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of the valid work steel lattice, multifaceted and composite supports of overhead power transmission lines, creation new constructive decisions of OPTL supports with application progressive technologies and materials.