



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2013, ТОМ 19, НОМЕР 4, 191–202

УДК 624.074.43

(13)-0297-1

ВПЛИВ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ СТИКУВАННЯ ЦАРГ НА НДС ОБОЛОНОК МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБ

В. В. Губанов, В. М. Василев, А. В. Голиков, А. Н. Кульчицький

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: a.kulchytskyu@gmail.com*

Отримана 23 вересня 2013; прийнята 22 листопада 2013.

Анотація. У статті викладена методика по проведенню лабораторного експерименту на масштабній моделі ділянки димової труби (вузол сполучення циліндричної і конічної частини) з метою визначення впливу геометричного відхилення у вигляді ексцентриситету стикування царг на напружено-деформований стан оболонок металевих димових труб. За результатами натурного обміру масштабної моделі були виявлені і описані геометричні відхилення у вигляді ексцентриситету стикування царг, локальної вгнутості. За отриманими даними побудована кінцево-елементна модель в програмному комплексі AnsysWorkbench, що дозволяє враховувати вплив геометричних відхилень на несучу здатність оболонок металевих димових труб. На першому етапі, з метою визначення достовірності чисельних моделей, для ділянки з ексцентриситетом зроблено порівняння чисельних і експериментальних даних. Порівняння за еквівалентним напруженням (σ_{eq}) показало різницю 1...15 %. На другому етапі зроблено порівняння σ_{eq} на ділянках з геометричним відхиленням і без нього як для чисельних моделей, так і для експериментальних.

Ключові слова: димова труба, геометричні відхилення, еквівалентні напруження, місцеві напруження, масштабна модель, концентрація напружень.

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА СТЫКОВКИ ЦАРГ НА НДС ОБОЛОЧЕК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

В. В. Губанов, В. Н. Васильев, А. В. Голиков, А. Н. Кульчицкий

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: a.kulchytskyu@gmail.com*

Получена 23 сентября 2013; принята 22 ноября 2013.

Аннотация. В статье изложена методика по проведению лабораторного эксперимента на масштабной модели участка дымовой трубы (узел сопряжения цилиндрической и конической части) с целью определения влияния геометрического отклонения в виде эксцентриситета стыковки царг на напряжённо-деформированное состояние оболочек металлических дымовых труб. По результатам натурного обмера масштабной модели были выявлены и описаны геометрические отклонения в виде эксцентриситета стыковки царг, локальной вогнутости. По полученным данным построена конечно-элементная модель в программном комплексе AnsysWorkbench, позволяющая учитывать влияние геометрических отклонений на несущую способность оболочек металлических дымовых труб. На первом этапе, с целью определения достоверности численных моделей, для участка с эксцентриситетом произведено сравнение численных и экспериментальных данных. Максимальная разница по эквивалентным

напряжениям (σ_{eq}) составила 15 %. На втором этапе произведено сравнение σ_{eq} на участках с геометрическим отклонением и без него как для численных моделей, так и для экспериментальных.

Ключевые слова: дымовая труба, геометрические отклонения, эквивалентные напряжения, местные напряжения, масштабная модель, концентрация напряжений.

THE INFLUENCE OF ECCENTRICITY ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL CHIMNEYS SHELLS

Vadim Gubanov, Volodymyr Vasylev, Olexandr Golikov, Artem Kulchytskyy

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.
E-mail: a.kulchytskyy@gmail.com*

Received 23 September 2013; accepted 22 November 2013.

Abstract. Methodology for conducting laboratory experiments using a scale model of the chimney section (conjugation node of cylindrical and conical parts) has been given to determine the effects of geometrical deviation in the form of eccentricity on the stress-strain state of shells of metal chimneys in this article. According to the result of the full-scale measurement of a scale model, there were identified and described the geometrical variations in the form of eccentricity and a local dimple. Using the obtained data, a FE model in the software package Ansys Workbench 14,0 was built, which allows taking into account the influence of geometrical deviations on the bearing capacity of the shells of metal chimneys. On the first phase the comparison of numerical and experimental data was made for the purpose of determining the validity of numerical models for the area of eccentricity. The comparison on equivalent stresses (σ_{eq}) showed the difference 1–15 %. On the second phase a comparison between sections with and without geometrical deviation provided, for the numerical models and for the pilot ones.

Keywords: steel chimney, geometrical deviation, equivalent, local stresses, scale model, the stress concentration.

Формулировка проблемы

Металлические дымовые трубы и газоотводящие стволы – это высотные тонколистовые цилиндрические конструкции, предназначенные для отвода отработанных газов в верхние слои атмосферы с последующим их рассеиванием.

Методики расчёта данных сооружений на прочность, устойчивость [1, 6, 8, 11, 12], определение динамической реакции сооружения [8, 10] разработаны достаточно полно.

Расчёт тонколистовых конструкций, к которым относятся металлические дымовые трубы и газоотводящие стволы, необходимо выполнять с учётом нормативных документов [1, 11], в которых приведены указания по необходимости учёта геометрических отклонений. Данные указания не являются полными и не охватывают все виды и размеры геометрических отклонений. В данных источниках приводятся граничные размеры этих отклонений (допуски), но

в реальных конструкциях встречаются размеры отклонений, выходящие за границы данных допусков. Из работ [3–5, 10] известно, что в зонах с геометрическими отклонениями возникают местные всплески напряжений. Следовательно, актуальной задачей является определение размеров геометрических отклонений и их вклад в общее напряжённо-деформированное состояние сооружения.

В работах [3–5] начаты исследования по изучению и определению локальных напряжений на участках металлических дымовых труб.

В [11] приводятся допуски на случайный эксцентриситет, но они зависят только от класса изготовления конструкции и не зависят от толщин стыкуемых элементов. Очевидно, что чем меньше толщина элементов, тем влияние эксцентриситета будет большим при одних и тех же значениях эксцентриситета. В данном нормативном документе говорится, что случайный

эксцентриситет должен оцениваться двумя параметрами, а именно:

$e_{a,max}$ – максимально допустимый случайный эксцентриситет (максимальное значение для класса изготовления $C - 4$ мм);

U_e – параметр случайного эксцентриситета (максимальное значение – $0,30$).

Так, для исследуемой масштабной модели величина максимального случайного эксцентриситета равна 4 мм, а $U_e = e_{a,max} / t = 4/3 = 1,33$, что превышает значение, приведенное в [11]. На исследуемом участке параметр U_e меняется в диапазоне от $0,33$ до $1,33$.

Цель исследования

Определение характеристики напряжённо-деформированного состояния узлов металлических дымовых труб с геометрическими отклонениями.

Задачи исследования

1. На основании численных и экспериментальных исследований определить напряжённо-деформированное состояние оболочек металлических дымовых труб с геометрическим отклонением в виде эксцентриситета стыковки царг.
2. Обосновать целесообразность применения численных моделей при исследовании влияния геометрических отклонений на напряжённо-деформированное состояние оболочек металлических дымовых труб.
3. Определение коэффициента концентрации напряжения в зоне с геометрическим отклонением в виде эксцентриситета.

Объект исследования

Характеристика изменения напряжений в зонах с геометрическими отклонениями.

Предмет исследования – напряжённо-деформированное состояние металлических дымовых труб с геометрическими отклонениями (для случая геометрического отклонения в виде эксцентриситета).

Основной материал

При обследовании были выявлены металлические дымовые трубы и газоотводящие стволы,

которые эксплуатируются с различного рода дефектами и повреждениями, снижающими несущую способность, а следовательно, и срок эксплуатации сооружения. Некоторые дефекты и повреждения, характерные для данных сооружений, представлены на рисунке 1.

В дальнейшем дефекты и повреждения, связанные с изменением геометрии сооружения, назовём как «геометрические отклонения». Основными видами геометрических отклонений для данного вида сооружений являются: эллипсность, эксцентриситет стыковки царг, увод кромок и локальная вогнутость оболочки. Наиболее распространённые из них представлены на рисунке 2.

На основании проведенных обследований 15 сооружений на территории Донецкой области, из которых 9 дымовых труб и 6 газоотводящих стволов в решётчатом каркасе, были определены наиболее часто встречающиеся геометрические отклонения. Количественная характеристика которых представлена на рисунке 3.

Некоторые причины возникновения геометрических отклонений можно разграничить на следующие:

- в процессе проектирования – случай резкого изменения толщины стыкуемых элементов;
- в процессе изготовления – зависит от допусков оборудования на вальцовку и сваривание элементов;
- в процессе транспортировки – некачественное закрепление элементов конструкции, приводящее к изменению геометрии, например возникновению эллипсности или изменению радиуса свальцованных листов;
- в процессе монтажа – зависит от качества изготовления и квалификации работников, выполняющих работы;
- в процессе эксплуатации – зависит от силовых факторов, в которых эксплуатируется сооружение (например, для дымовых труб с большим диаметром локальное распределение ветровой нагрузки по периметру оболочки может привести к возникновению эллипсности).

Подготовка экспериментальной модели

Исследования проводились на масштабной модели узла сопряжения цилиндрической и

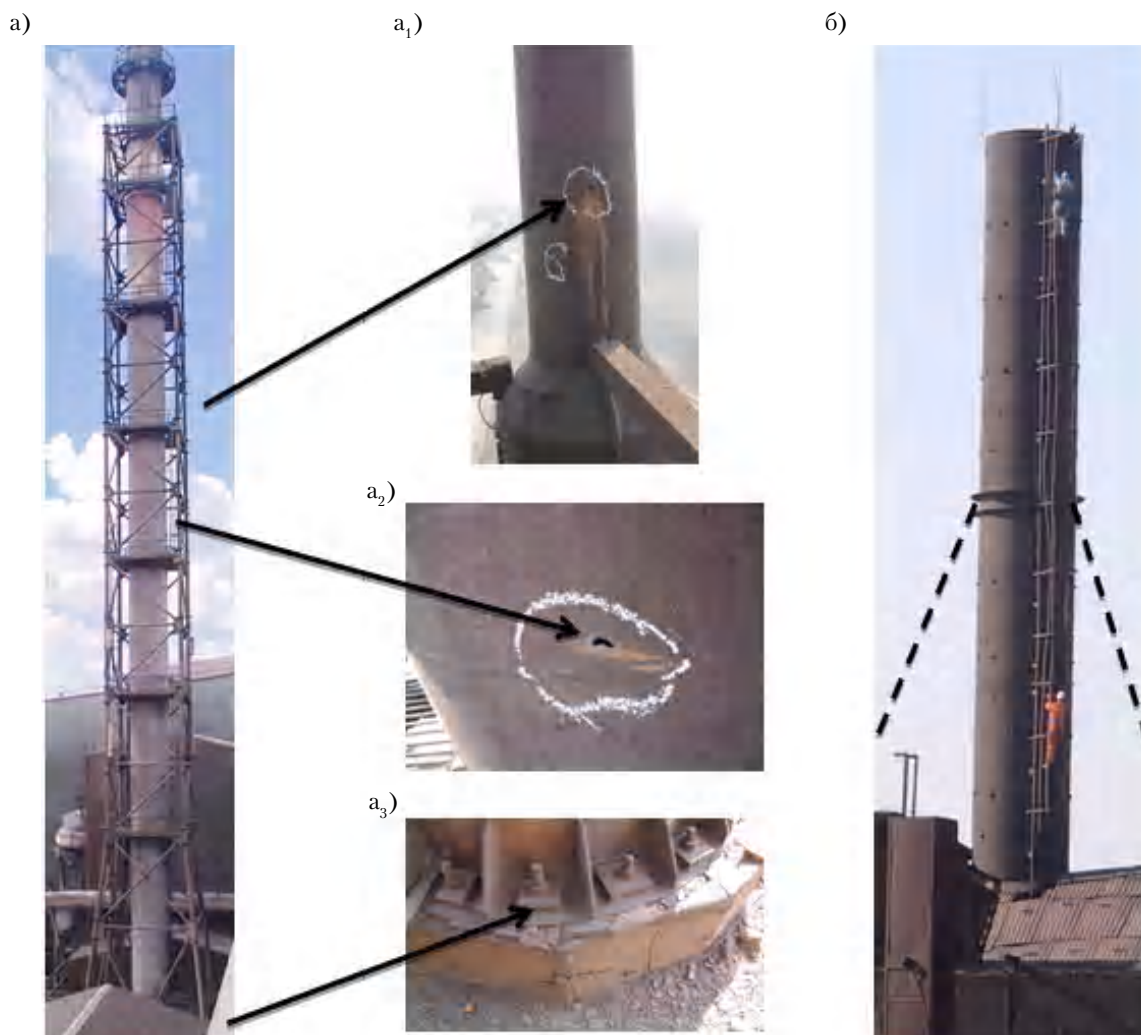


Рисунок 1. Дефекты и повреждения: а) газоотводящих стволов: а₁) прогар в несущем каркасе; а₂) прогар в оболочке газоотводящего ствола; а₃) разрушение опорного фундамента; б) металлических дымовых труб – отсутствуют оттяжки, предусмотренные проектом.

конической части дымовой трубы. Коэффициент масштабирования равен 2,67. Толщина оболочки – 3,0 мм.

По результатам натурных измерений с помощью шаблона (рис. 3) была определена зона с наибольшим геометрическим отклонением в виде эксцентриситета стыковки царг. Длина зоны эксцентриситета по образующей составляет 160 мм.

На исследуемом участке производилась зачистка поверхности металла с помощью наждачной бумаги с последующей наклейкой тензометрических датчиков. Применялись фольговые тензометрические датчики с базой 5 мм и сопротивлением 100 Ом. Наклейка тензометрических датчиков производилась в горизонтальном и вертикальном направлениях с целью

определения деформаций в кольцевом и меридиональном направлениях соответственно.

Общий вид и геометрические размеры масштабной модели приведены на рисунке 4.

Подготовка лабораторной установки

Испытания модели проводились на 250-тонном прессе. Нагружение осуществляется через металлический лист с размерами 750×750×50 мм, уложенный на верхнюю грань испытуемой модели. Под испытуемую модель укладывался линолеум.

На исследуемом участке производилась распайка проводов к тензометрическим датчикам с последующим их подключением к модулю ввода сигналов тензометрических датчиков

а)

в)

б)

г)



Рисунок 2. Геометрические отклонения: металлических дымовых труб: а) выпуклость/вогнутость оболочки; б) эксцентриситет стыковки цагр; газоотводящих стволов: в) вогнутость оболочки; г) увод кромок.

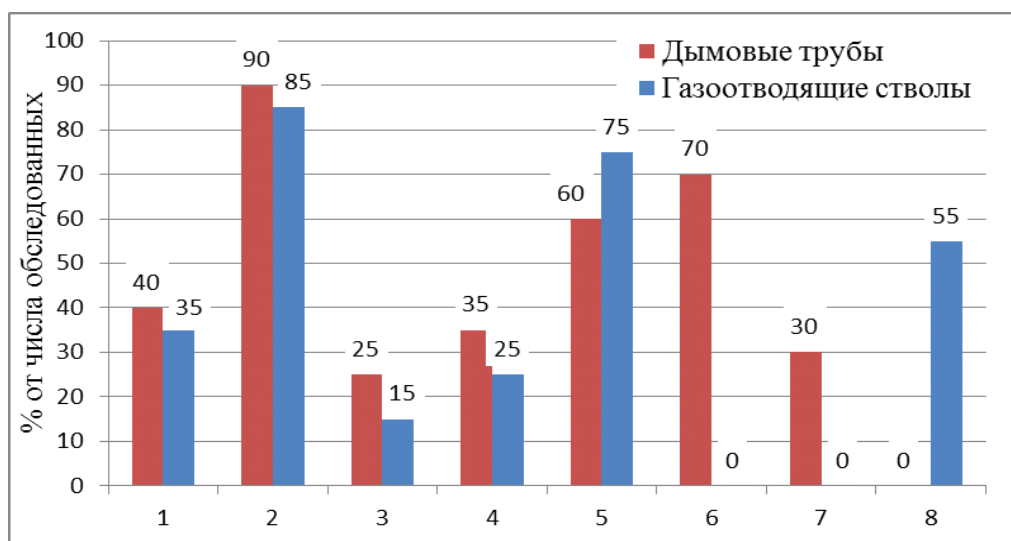


Рисунок 3. Количественная характеристика геометрических отклонений: 1. Разрушение элементов фундаментов. 2. Нарушение коррозионной защиты. 3. Вогнутость оболочки. 4. Эксцентриситет стыковки цагр. 5. Локальное уменьшение толщины оболочки. 6. Ослабление натяжения оттяжек. 7. Увод кромок стыковки цагр. 8. Прогар в металлической оболочке.

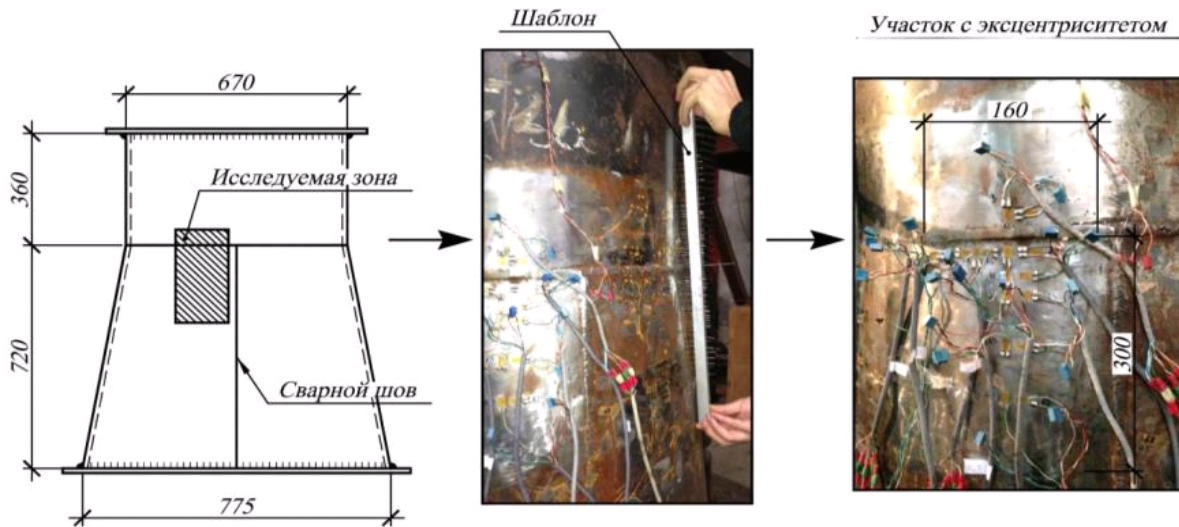


Рисунок 4. Общий вид и геометрические размеры масштабной модели.

МВ110-224.4ТД. Данная система позволяет снимать показания в реальном времени одновременно с 24-х тензометрических датчиков.

Общий вид испытательной установки приведен на рисунке 5.

Для получения достоверных данных обеспечивалась равномерная передача нагрузки от плиты пресса к верхней грани испытуемой модели. Контроль осуществлялся с помощью 4-х тензометрических датчиков, наклеенных в меридиональном направлении равномерно по периметру на высоте 40 мм от верхней грани испытуемой модели. Критерием являются показания тензометрических датчиков, разница которых по 4-м точкам не превышала 3 %.

Проведение лабораторного эксперимента

Нагружение модели производилось по принципу «нагрузка – разгрузка». Шаг нагружения 5 т. Максимальная приложенная нагрузка составила $P_{исп} = 55 \text{ т}$, что соответствует $0,4P_{cr}$, где $P_{cr} = 142 \text{ т}$ – критическая сила, полученная согласно [1].

Испытания модели проводились в упругой стадии работы материала.

Запись показаний тензометрических датчиков в мВ производилась на каждом шаге нагружения и разгрузки при помощи программного комплекса MasterScada. На основании известной чувствительности тензометрических датчиков, по формуле 1, осуществлялся переход от

показаний тензометрических датчиков к деформациям в масштабной модели.

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{4\Delta U}{U_{II}}, \quad (1)$$

где ΔU – разница первого и последующих показаний тензометрического датчика, мВ;
 U_{II} – характеристика прибора, равная 2,5 В;
 k – чувствительность тензометрического датчика – 2,3.

Так как исследования проводились в упругой стадии, то по формуле 2 переходим от деформаций в точке к напряжениям.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (2)$$

где ε – деформация в точке, определяемая по формуле 1, мм/мм;

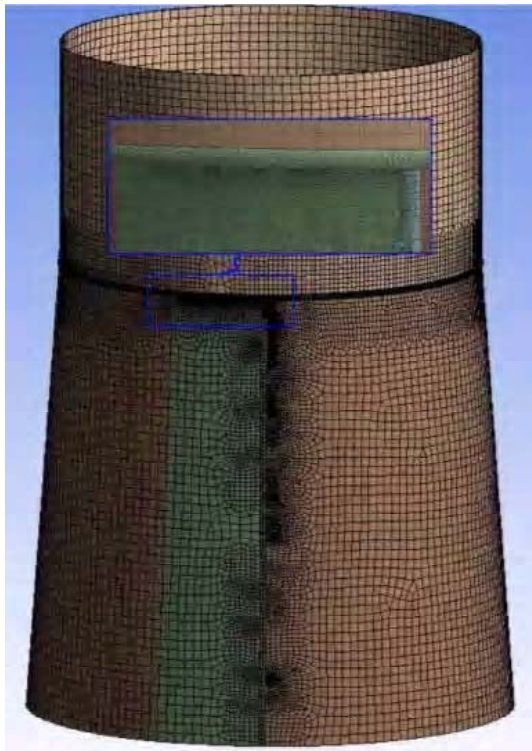
E – модуль упругости стали (Ст3), $2,1 \times 10^5 \text{ МПа}$.
Анализ и сопоставление результатов лабораторного эксперимента с результатами численных исследований.

По результатам предварительного обмера масштабной модели была создана конечно-элементная модель в программном комплексе AnsysWorkbench 14,0 для проведения численных исследований влияния геометрического отклонения в виде эксцентриситета на НДС оболочек металлических дымовых труб. В расчёт был включён сварной шов, который моделировался объёмными конечными элементами, а сама конструкция моделировалась оболочечными КЭ. Общий вид конечно-элементной модели представлен на рисунке 6.



Рисунок 5. Общий вид испытательной установки.

а)



б)

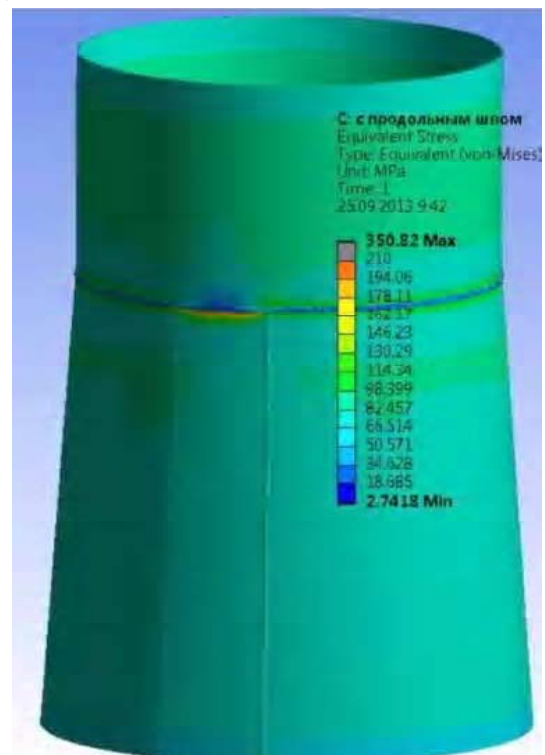


Рисунок 6. Общий вид конечно-элементной модели: а) КЭ модель; б) распределение эквивалентных напряжений на участке с эксцентриситетом ($P_{исп} = 55 \text{ т}$).

Из приведенного рисунка видно, что в зоне с геометрическим отклонением в виде эксцентриситета возникает местный всплеск напряжений.

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований будем проводить по значениям эквивалентных напряжений.

Эквивалентные напряжения определяются согласно IV теории прочности по формуле:

$$\sigma_{eq(IV)} = \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \cdot \sigma_y + \sigma_y^2}, \quad (3)$$

где σ_y – напряжения в кольцевом направлении, МПа;

σ_z – напряжения в меридиональном направлении, МПа.

Сравнение результатов численного и экспериментального исследований распределения эквивалентных напряжений по высоте экспериментальной модели в зоне с геометрическим отклонением приведены на рисунке 7.

По результатам исследований видно, что форма изменения напряжений по высоте модели для численного и лабораторного эксперимента совпадает. Максимальное отличие в пике σ_{eq} составило 15 %.

Размер зоны краевого эффекта, согласно [7], составляет:

$$l_{кр} = 0,585 \cdot \pi \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (4)$$

и равна $l_{кр} = 0,585 \cdot \pi \cdot \sqrt{340 \cdot 8} = 96$ мм.

а)



б)

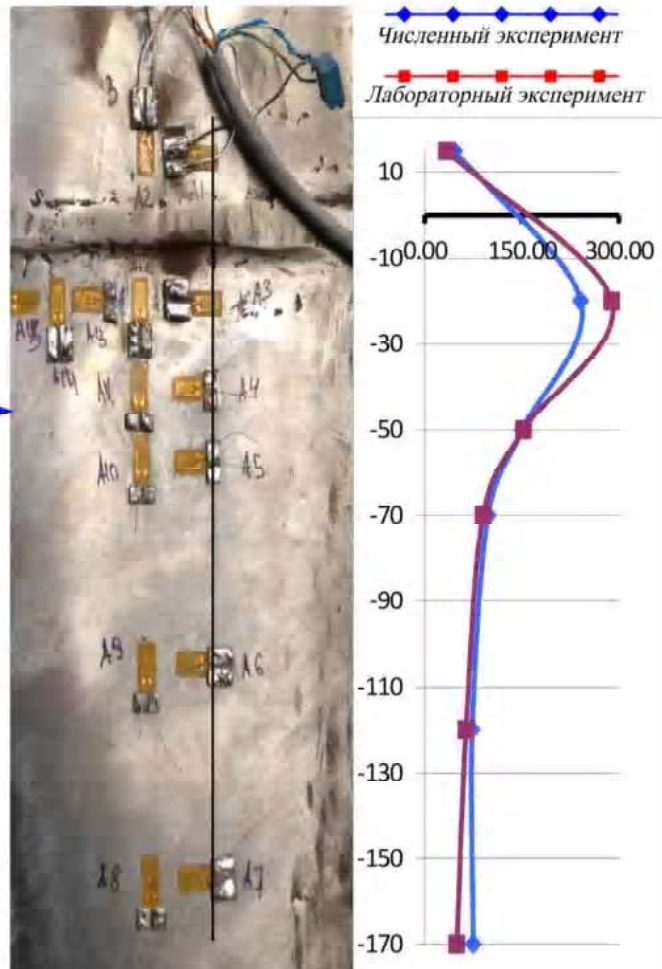


Рисунок 7. Распределение эквивалентных напряжений по высоте экспериментальной модели, МПа: а) общий вид участка; б) σ_{eq} в зоне с эксцентриситетом.

Для рассматриваемой модели, с учётом геометрического отклонения, зона краевого эффекта составляет $l_{кр} = 50 \text{ мм}$.

Согласно работе [3] наибольший вклад в эквивалентные напряжения для узла стыковки цилиндрической и конической части дают кольцевые напряжения. На рисунке 8 представлено распределение кольцевых напряжений по высоте экспериментальной модели в зоне без геометрического отклонения.

По результатам исследований видно, что форма изменения напряжений по высоте модели для численного и лабораторного эксперимента совпадает. Максимальное превышение напряжений возникает в 3,0 раза.

Также на рисунке 9 приведено распределение кольцевых напряжений по периметру экспериментальной модели.

На основании сравнения эквивалентных напряжений в зоне с геометрическим отклонением и без можно принять коэффициент концентрации напряжений равный 1,6–2,1.

Коэффициент концентрации напряжений определим по формуле:

$$k = \frac{\sigma_{\max}(U_e)}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в зоне с эксцентриситетом как функция от параметра U_e , МПа;

$\sigma_{\text{ном}}$ – напряжение в зоне без геометрического отклонения, МПа;

U_e – параметр случайного эксцентриситета в диапазоне от 0,33 до 1,33.

Выводы

1. По результатам проведенных исследований были сопоставлены экспериментальные и численные значения эквивалентных напряжений на участке с эксцентриситетом, максимальное отличие в пике σ_{eq} составило 15 %.
2. Сопоставление результатов численного и лабораторного эксперимента показывает, что численные модели дают достаточно точные результаты, но это является возможным после калибровки моделей по экспериментальным данным. Моделирование в современных программных комплексах позволяет построить реальную (неидеальную) геометрию достаточно точно.

3. Для данной модели, с геометрическим отклонением в виде эксцентриситета, коэффициент концентрации напряжений варьируется в пределах от 1,6 до 2,1.

Дальнейшие исследования

В дальнейших исследованиях данная модель будет доводиться до разрушения, будет определена критическая сила потери устойчивости, а также её сравнение с критической силой, полученной для численной модели с учётом реальной геометрии (геометрическими отклонениями) и с критической силой, полученной согласно [1].

Также планируется проведение ряда экспериментальных исследований по определению влияния геометрического отклонения в виде локальной вогнутости на несущую способность оболочек металлических дымовых труб от эквивалентной ветровой нагрузки.

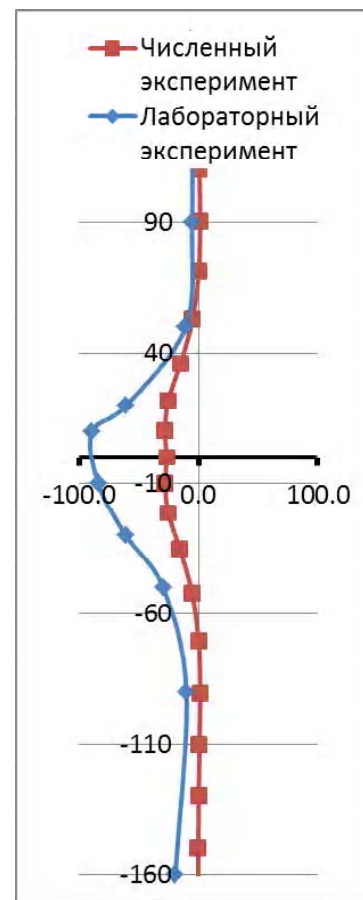


Рисунок 8. Распределение кольцевых напряжений в зоне без геометрического отклонения, МПа.

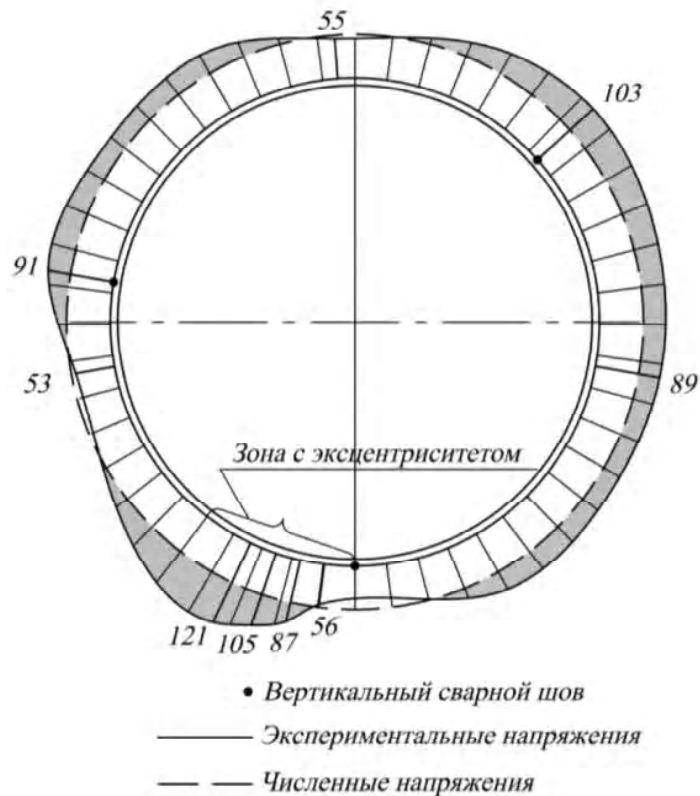


Рисунок 9. Распределение эквивалентных напряжений по периметру экспериментальной модели, МПа.

Литература

1. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81* окрім розділів 15*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с. – (Державні будівельні норми).
3. Губанов, В. В. Уточнение методик расчета локальных напряжений в оболочках дымовых труб и газоотводящих стволов [Текст] / В. В. Губанов, А. В. Голиков // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку. БМК-2006 : V Міжнар. наук.-техн. конференція (19–22 вересня 2006 р., м. Київ, Україна) : Доповіді / В.о. ВАТ «Укр. наук.-дослід. та проект. ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського». – К. : Сталь, 2006. – С. 118–121. – ISBN 966-7589-68-4.

References

1. DBN V.2.6-163:2010. The constructions of buildings and structures. The steel constructions. Norms for design, fabrication and erection. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 127 p. (in Ukrainian)
2. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
3. Gubanov, V. V.; Golikov, A. V. Improvement of calculation procedure of local strain in cladding of smoke pipe and gas outlet shank. In: *Construction metal structures: nowadays and future development. BМК-2006: Vth International scientific and technical conference (19–22nd of September 2006, Kyiv, Ukraine): Papers*. Kyiv: Stal, 2006, p. 118–121. ISBN 966-7589-68-4. (in Russian)
4. Gubanov, V. V.; Golikov, A. V. Calculation and gas pipes with local stresses. In: *compendium «Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»*. Makiivka, 2009, Issue 2009-4(78): Towers: building materials, structures, processes, p. 215–220. (in Russian)

4. Губанов, В. В. Расчет и конструирование газоотводящих стволов с местными напряжениями [Текст] / В. В. Губанов, А. В. Голиков // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, ДонНАБА. – Макіївка, 2009. – Вип. 2009-4(78) : Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 215–220.
5. Губанов, В. В. Влияние локальной вогнутости на работу несущей оболочки высотных сооружений [Текст] / В. В. Губанов, А. В. Голиков, А. Н. Кульчицкий // Металеві конструкції. – 2011. – Том 17, № 3. – С. 177–184.
6. Дымовые трубы [Текст] / А. М. Ельшин, М. Н. Изжорин, В. С. Жолудов, Е. Г. Овчаренко ; Под редакцией С. В. Сатянова. – М. : Стройиздат, 2001. – 296 с.
7. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции [Текст] : научное издание / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1970. – 488 с.
8. Металлические конструкции [Текст]. В 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения : Учебник для строит. вузов / Под редакцией В. В. Горева. – М. : Высш. шк., 2002. – 544 с.
9. СНиП 2.09.03-85. Строительные нормы и правила. Сооружения промышленных предприятий [Текст]. – Взамен СНиП II-91-77, СН 302-65, СН 471-75 ; введ. 1987-01-01. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
10. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен [Текст] / М. Б. Солодарь, М. В. Кузнецова, Ю. С. Плишкин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 186 с.
11. EN 1993-1-6:2007. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-6. Прочность и устойчивость оболочек [Текст]. – Введен впервые. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 167 с.
12. BS EN 1993-3-2:2006. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys [Текст]. – [S. l.] : BSi, 2006. – 34 p. – ISBN 978-0-580-54894-9.
5. Gubanov, Vadim; Golikov, Alexandr; Kulchytskyy, Artem. Effect of local concavity upon bearing shell of high buildings. In: *Metal Constructions*, 2011, Volume 17, Number 3, p. 177–184.
6. Elshin, A. M.; Izhorin, M. N.; Zholudov, V. S.; Ovcharenko, E. G. Edited by Satianov, S. V. Smoke pipes. Moscow: Stroizdat, 2001. 296 p. (in Russian)
7. Lessig, E. N.; Lileev, A. F.; Sokolov, A. G. Rolled metal constructions. Moscow: Stroizdat, 1970. 488 p. (in Russian)
8. Edited by Gorev, V. V. Metal Constructions. In three volumes. Volume 3. Special structures and constructions. Moscow: High school, 2002. 544 p. (in Russian)
9. SNiP 2.09.03-85. Construction rules and regulations. Constructions of enterprises. Moscow: TsITP Gosstroia USSR, 1986. 56 p. (in Russian)
10. Solodar, M. B.; Kuznetsova, M. V.; Plishkin, Yu. S. Steel structures of stacks. Leningrad: Stroizdat, 1975. 186 p. (in Russian)
11. EN 1993-1-6:2007. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–6: Strength and stability of shell structures. Minsk: Ministry of Architecture and Civil Engineering of the Republic of Belarus, 2010. 167 p. (in Russian)
12. BS EN 1993-3-2:2006. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys. [S. l.]: BSi, 2006. 34 p. ISBN 978-0-580-54894-9.

Губанов Вадим Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Інституту Інженерів Будівельників (The Institution of Civil Engineers, Великобританія). Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок та проектування висотних споруд.

Василев Володимир Миколайович – к.т.н., доцент; професор кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури, начальник лабораторії випробування будівельних конструкцій і споруд. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих конструкцій.

Голиков Олександр Володимирович – аспірант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вдосконалення конструктивних рішень та методів розрахунку висотних споруд.

Кульчицький Артем Миколайович – аспірант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: збільшення терміну експлуатації висотних споруд на

основі вдосконалення конструктивних рішень і методів розрахунку, дослідження дійсної роботи споруд з урахування геометричних відхилень.

Губанов Вадим Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Института Инженеров Строителей (The Institution of Civil Engineers, Великобритания). Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений.

Васылев Владимир Николаевич – к.т.н., доцент; профессор кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, начальник лаборатории испытания строительных конструкций и сооружений. Научные интересы: изучение действительной работы металлических конструкций.

Голиков Александр Владимирович – аспирант кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: совершенствование конструктивных решений и методов расчета высотных сооружений.

Кульчицкий Артём Николаевич – аспирант кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: продление срока эксплуатации высотных сооружений на основе совершенствования конструктивных решений и методов расчёта, исследование действительной работы сооружений с учётом геометрических отклонений.

Gubanov Vadim – Ph.D., Associate Professor, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of The Institute of Civil Engineers, Great Britain. Scientific interests: the in-service reliability of steel structures, performance and design of high-rise steelworks.

Vasylev Volodymyr – Ph.D. (Eng.), Associate Professor; Professor of Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; a Chief of laboratory of test of build constructions and buildings. Scientific interests: study of a valid work of metal structures.

Golikov Olexandr – post-graduate student, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: perfection of constructive solutions and methods of calculation of high-rise and shell structures.

Kulchytsky Artem – post-graduate student, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: extending the life of high-rise structures on the basis of perfection of constructive solutions and methods of calculation, investigation of the real behavior of structures taking into account the geometrical deviation.