

УДК 624.971:624.042

В. В. ГУБАНОВ, Е. Н. ОЛЕНИЧ, А. В. ОЛЕНИЧ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ С ДВУМЯ УРОВНЯМИ ОТТЯЖЕК

Аннотация. В статье рассматривается влияние конструктивных параметров на НДС дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек на основании сравнительного расчета. В ходе исследования разработан программный модуль расчета сооружения в целом на основании системы уравнения равновесия оттяжек; уравнения равновесия сил в узле и составления канонического уравнения метода сил для статически неопределимой системы. На основании разработанного программного модуля проведен анализ влияния отдельных конструктивных элементов на изменение напряжения в стволе трубы и разработана рекомендация по выбору рациональных конструктивных решений дымовых труб с двумя уровнями оттяжек.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, дымовые трубы, оттяжки, расчетная схема, конструктивные параметры, металлические конструкции.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

На сегодняшний день актуальным является вопрос реконструкции существующих и возведение новых сооружений для промышленных предприятий [10]. Одними из наиболее сложных с учетом требований норм проектирования и возведения являются промышленные дымовые трубы. Для грамотного технического обслуживания нужно иметь представление о конструкции сооружения в целом и отдельных узлов в частности.

Промышленные дымовые трубы относятся к сложным инженерным сооружениям, проектирование которых требует обширных знаний и серьезного производственного опыта, ведь каждая промышленная дымовая труба представляет повышенную опасность, и от неё зависит бесперебойность работы промышленных объектов.

В современной справочной литературе и нормативных документах, регламентирующих правила расчета и конструирования дымовых труб, информация является устаревшей. Кроме того, в нормах недостаточное количество сведений, в которых бы освещались многочисленные особенности данного типа конструкций и содержались систематизированные данные и результаты опыта эксплуатации, необходимые для понимания действительной работы и качественного проектирования этих труб.

В данном направлении уже проводятся многочисленные научные исследования, а проектные организации уже имеют определенный накопленный опыт эксплуатации высотных сооружений. Например, в работах С. Ф. Пичугина, А. В. Махинько [3] рассматривается подробное уточнение величины ветровой нагрузки на решетчатые опоры. В публикациях журнала «Металлические конструкции» ДонНАСА рассматривается ряд исследований, такие как анализ исследования расчета начальных натяжений оттяжек мачт [4], влияние деформаций грунта и анкерных фундаментов на НДС несущих конструкций дымовых труб с оттяжками [7]. В отдельных работах приводятся данные о характерных исследованиях дымовых труб [5, 6].

Целью работы является сравнительный анализ влияния конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек, а именно изменение начального натяжения в оттяжках, влияние разного диаметра катана оттяжек, изменение толщины стенки ствола трубы по высоте.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В работе исследовалась металлическая дымовая труба высотой $H = 100$ м и диаметром $D = 3$ м. В пространстве труба раскреплена оттяжками в двух уровнях, и в плане с четырьмя оттяжками в узле. Расположение оттяжек принято в соответствии с [1]. Геометрическая схема дымовой трубы с оттяжками изображены на рис. 1а.

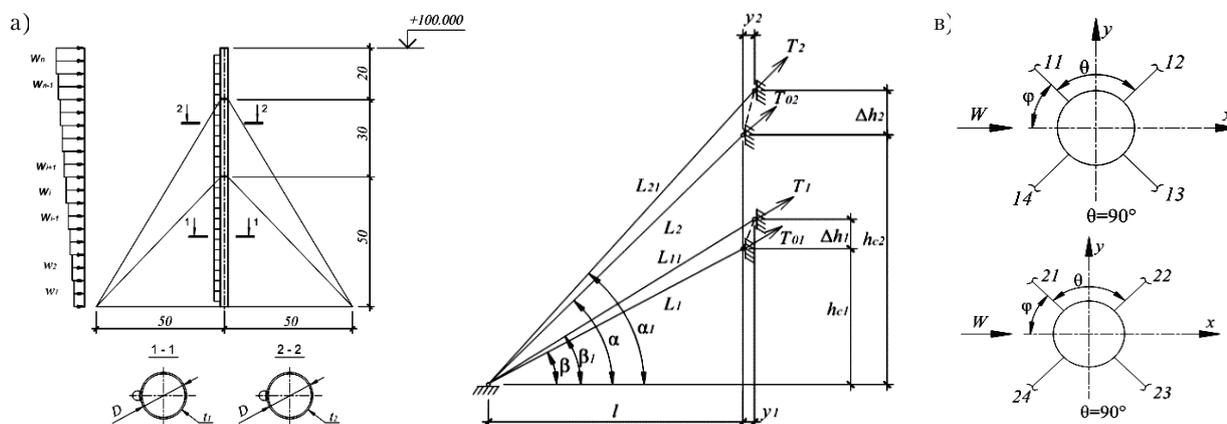


Рисунок 1 – Геометрическая схема трубы (а), схема наклонных оттяжек в двух уровнях при перемещении опоры (б), размещение оттяжек в горизонтальной плоскости в двух уровнях закрепления (в).

Расчет нагрузок, действующих на трубу, выполняется в программном модуле Mathcad с учётом собственного веса сооружения, веса футеровки, принятой из кирпича и ветровой нагрузки согласно [1], характеристическое значение которой принято $W = 500$ Па для г. Донецка.

На основании [9, 11] была разработана методика статического расчета дымовых труб с двумя уровнями оттяжек, которая включает в себя следующие этапы.

1. Определение усилия в оттяжках. Для этого используется система уравнения равновесия наклонной гибкой нити (формула 1), провисающей по параболе, с учетом перемещений опорных узлов и в зависимости от направления ветра и угла крепления оттяжки к горизонтали. На рис. 1б изображено смещение опоры наклонной нити на расстояние по горизонтали y_1 и y_2 и по вертикали $-\Delta h_1$ и Δh_2 для 1-го и 2-го уровня. Значение расстояния смещения оттяжки по вертикали Δh_1 , Δh_2 является маленьким, и поэтому в дальнейших расчетах оно пренебрегается.

Далее используется уравнение равновесий горизонтальных сил в узле (формула 1). Для этого рассматривается узел соединения оттяжек в горизонтальной плоскости. В нашем случае узел с четырьмя оттяжками в плане (рис. 1в). Ветровой поток и соответственно горизонтальное перемещение y_1 и y_2 направлены вдоль первой оттяжки. Для упрощения системы уравнения дальнейшие расчеты выполняются в плоской системе.

2. Расчет усилий в стволе дымовой трубы. Расчетная схема дымовой трубы с оттяжками представляется в виде вертикальной неразрезной балки, жестко защемленной в уровне фундамента и поддерживаемой системой предварительно напряженных упругих оттяжек в двух уровнях. Расчет дымовой трубы выполняется в плоскости действия момента как сжато-изогнутого стержня. Конструкция дымовой трубы условно разбивается на 10 равных участков по 10 м, в пределах которых действует равномерно распределенная по длине ветровая нагрузка (рис. 2).

Для составления основных зависимостей расчета ствола трубы используется каноническое уравнение метода сил.

Заключительным этапом расчета представляется система (формула 1), связывающая уравнение равновесия оттяжек с каноническим уравнением метода сил для четырех оттяжек в узле в двух уровнях для плоской системы (рис. 3):

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{01}) \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{02}) \end{cases} \quad (1)$$

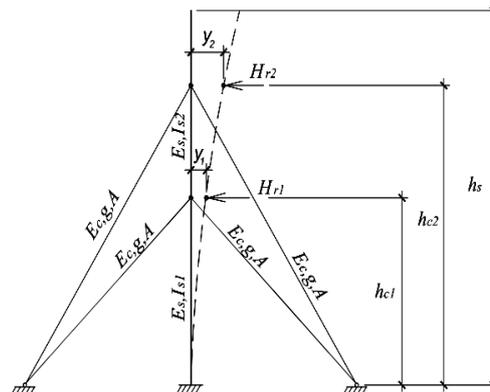
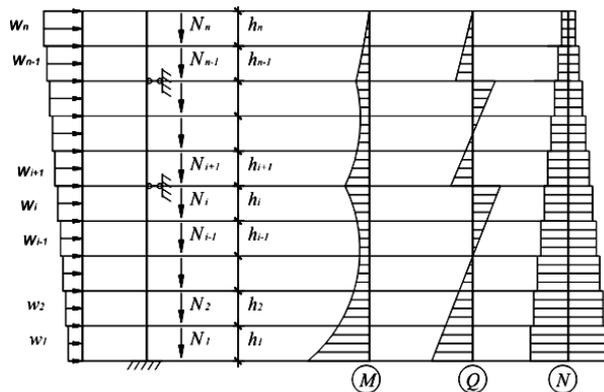


Рисунок 2 – Расчетная схема дымовой трубы в плоскости действия момента.

Рисунок 3 – Схема дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек.

Где относительная деформация для 1-го и 2-го уровня оттяжек:

$$E(\sigma_{1(m)}, \sigma_{01}) = \left[\left(\frac{\sigma_{1(m)}}{E_c} - \frac{D_{1(m)}}{\sigma_{1(m)}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E_c} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

$$E(\sigma_{2(m)}, \sigma_{02}) = \left[\left(\frac{\sigma_{2(m)}}{E_c} - \frac{D_{2(m)}}{\sigma_{2(m)}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E_c} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \alpha; \quad (3)$$

горизонтальное смещение узла крепления:

$$y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = \left[\left(\frac{\sigma_{11}}{E_c} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E_c} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}), \quad (4)$$

$$y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = \left[\left(\frac{\sigma_{21}}{E_c} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E_c} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}); \quad (5)$$

горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек:

$$\begin{aligned} H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) &= (\sigma_{11} - \sigma_{13}) A \cos \beta \\ H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) &= (\sigma_{21} - \sigma_{23}) A \cos \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

где m – номер оттяжки в уровне;

H_{r1}, H_{r2} – удерживающая сила в узлах крепления оттяжек 1-го и 2-го уровня;

$\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}, \delta_{22}$ – единичные перемещения точек приложения сил H_{r1} и H_{r2} ;

Δ_{1p}, Δ_{2p} – перемещение узлов крепления оттяжек от действия внешних нагрузок;

$\sigma_{01}, \sigma_{11}, \sigma_{02}, \sigma_{21}$ – напряжение в оттяжках в начальном и конечном состоянии 1-го и 2-го уровня;

y_1, y_2 – перемещение 1-го и 2-го узла от удлинения оттяжек по горизонтали;

θ – угол между оттяжками, для четырех оттяжек $\theta = 90^\circ$;

φ – угол между направлением ветрового потока и первой оттяжкой (в двух уровнях).

β, α – углы наклона оттяжек 1-го и 2-го уровня к горизонтали;

Результирующая функция изгибающих моментов будет иметь вид:

$$M(z) = \bar{M}_1(z) \cdot H_{r1} + \bar{M}_2(z) \cdot H_{r2} + M_p(z), \quad (7)$$

где z – координата высоты дымовой трубы;

$\bar{M}_1(z), \bar{M}_2(z), M_p(z)$ – функция изгибающих моментов от единичных сил, приложенных в уровне опор, и моментов грузовой эпоры основной системы.

На основании представленной системы уравнения равновесия конструктивных элементов разработан расчет сооружения в целом с использованием программного модуля Mathcad.

Подробно рассматривается результат расчета влияния конструктивных параметров на НДС дымовой трубы.

1. Определяется начальное натяжения оттяжек в узлах из условия равенства пролетных и опорных изгибающих моментов и заданном отклонении верхнего узла, не более $1/100$ высоты трубы [8]. Начальное натяжение в оттяжках для дымовой трубы с четырьмя оттяжками составило для 1-го уровня оттяжек – 30 кН, для 2-го уровня оттяжек – 50 кН. Диаметр каната 36 мм. Данный расчет выполняется при действии предельной ветровой нагрузки, действующей в плоскости оттяжки и собственного веса. Точность отклонения начального натяжения оттяжек составляет $\pm 10\%$, расчет выполняется в большем диапазоне – $\pm 20\%$ от локального натяжения. По полученным результатам, представленным на рис. 4а, б, видно, что при ослаблении натяжения оттяжек возрастает изгибающий момент. Затем наблюдаем горизонтальный участок с плавным уменьшением момента, при котором изменение натяжения практически не влияет. После момент резко уменьшается при малом значении изменения напряжения. Анализ продольной силы показывает плавное повышение при увеличении натяжения, затем доходит до величины натяжения 31, 52 кН и резко уменьшается, после этого опять возрастает. Зависимость напряжения в стволе трубы от изгибающего момента изображена на рис. 4в.

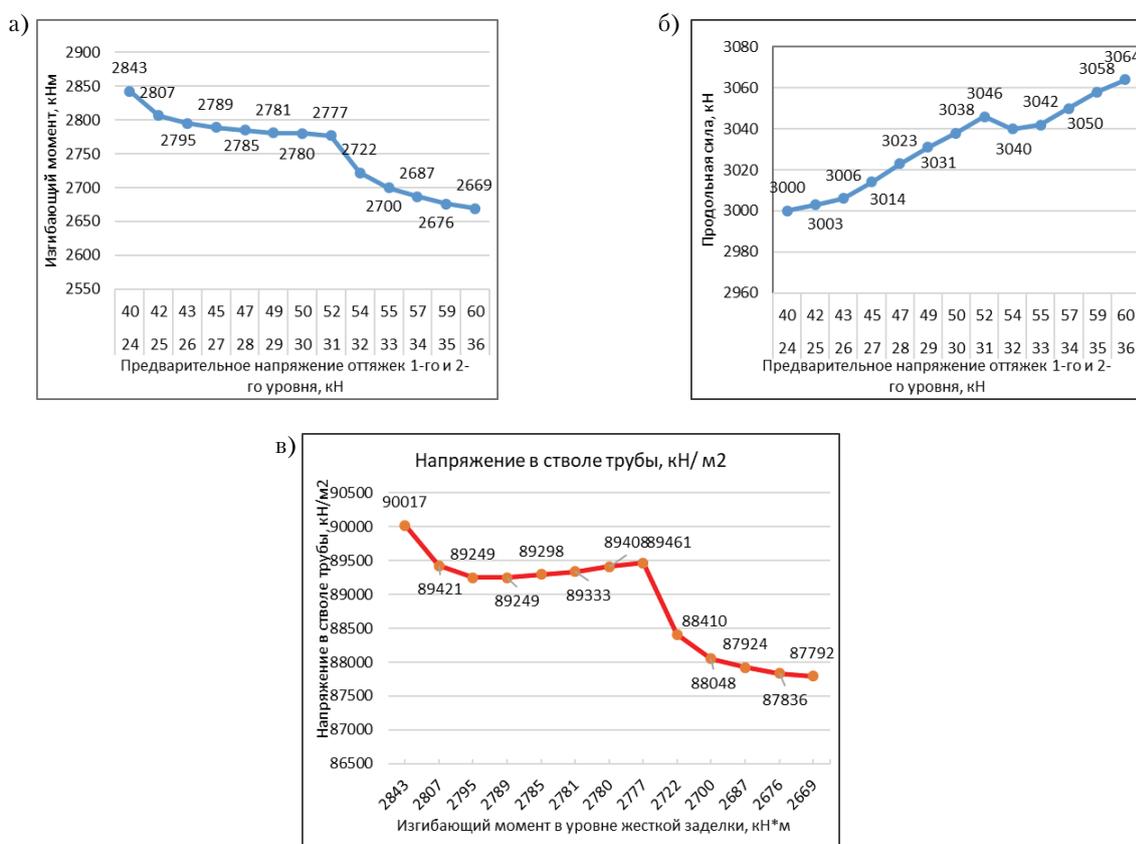


Рисунок 4 – Результаты расчета: изгибающий момент в уровне жесткой заделки (а), продольная сила в стволе трубы (б), зависимость напряжения в стволе от изгибающего момента при изменении начального натяжения оттяжек (в).

В стволе трубы возникает перенапряжение при максимальном моменте за счет ослабления натяжения в оттяжках. Затем наблюдается горизонтальный участок с плавным уменьшением момента, но с практически неизменяемым значением напряжения ствола трубы, даже увеличенном при значении $M_{\max} = 2777$ кН·м². Затем напряжение в стволе идет на уменьшение при незначительном изменении изгибающего момента. Рационально принимать величину предварительного натяжения оттяжек в пределах для 1-го уровня 33...36 кН, для 2-го – 55...60 кН.

2. На НДС дымовой трубы влияет правильно подобранный диаметр каната оттяжки. Предоставлен анализ канатов с диаметром от 31 до 55 мм, двойной свивки ЛК-Р-6×19 (1+6+6/6) +7×7(1+6) маркировочной группы 1670 по ГОСТ14954-80. Результаты представлены на рис. 5а, б. При увеличении

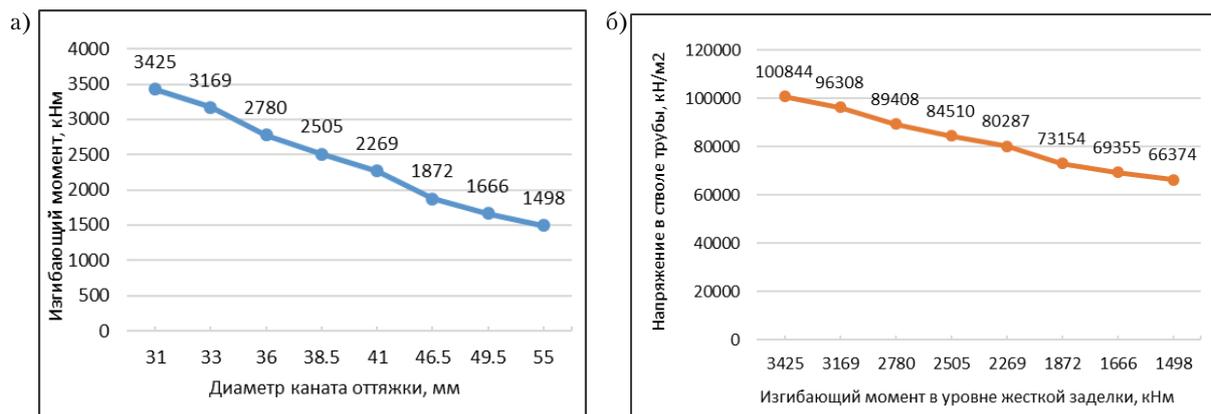


Рисунок 5 – Результаты расчета: изгибающий момент в уровне жесткой заделки (а), зависимость напряжения в стволе от изгибающего момента при изменении диаметра каната оттяжки (б).

диаметра каната наблюдаем уменьшение изгибающего момента, т. е. увеличение закрепления в уровне оттяжки.

При значительном уменьшении величины изгибающего момента от увеличения диаметра каната оттяжек наблюдается плавное уменьшение напряжения в стволе трубы без каких-либо скачков (рис. 5б).

3. Рассматривается такой конструктивный элемент, как толщина стенки ствола трубы. По высоте толщина стенки разбивается на два участка – t_1 и t_2 . На рис. 6а заметны участки с почти одинаковыми значениями изгибающего момента, но разными толщинами верхнего участка t_2 , и отмечен скачок повышенного изгибающего момента при толщине $t_1 = 6$ мм и $t_2 = 4$ мм.

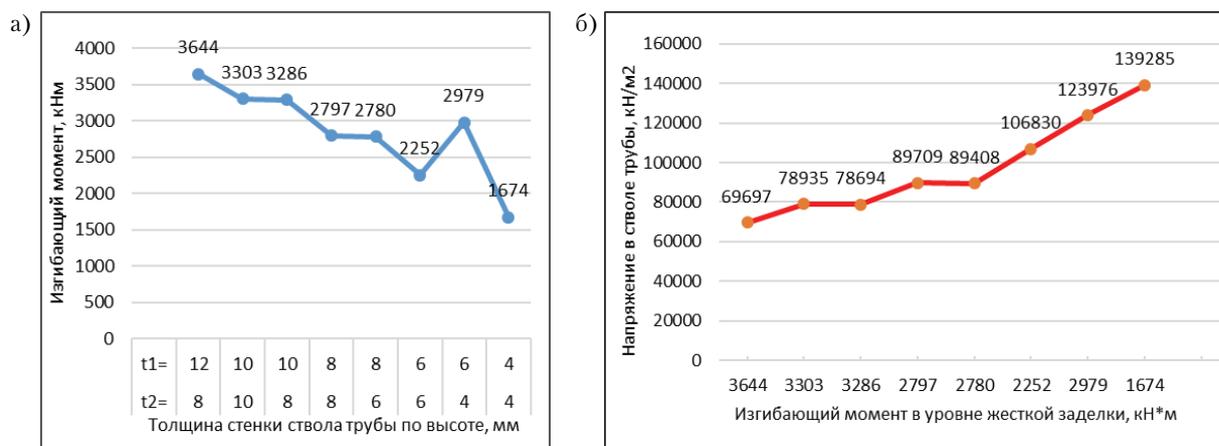


Рисунок 6 – Результаты расчета: изгибающий момент в уровне жесткой заделки (а), зависимость напряжения в стволе от изгибающего момента при изменении толщины стенки ствола трубы (б).

Зависимость изменения данного конструктивного элемента на влияние напряжения в стволе трубы показана на рис.6б. При уменьшении толщины ствола трубы и уменьшении изгибающего момента максимальное напряжение интенсивно возрастает.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенной работы описывается условие равновесия оттяжек в двух уровнях закрепления и влияние их нелинейного воздействия под нагрузкой на ствол дымовой трубы.

По результатам выполненных исследований влияния конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек можно сделать следующие выводы:

1. Отклонение начального натяжения оттяжек $\pm 20\%$ от локального натяжения приводит к уменьшению изгибающих моментов в основании трубы на 6% , увеличению продольной силы и напряжения на 2% . Данные результаты говорят о незначительном влиянии на НДС дымовой трубы.

2. Значительное влияние оказывает диаметр оттяжки на напряжение в трубе. Напряжение уменьшается пропорционально величине диаметра каната. Так при диаметре каната от 31 до 55 мм уменьшаются изгибающие моменты в основании трубы на 56% и напряжение на 34% .

3. Уменьшение толщины стенки ствола трубы в исследуемом интервале приводит к уменьшению момента на 55% и увеличению напряжения в стволе трубы в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия [Текст]. – Взамен СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85»; введ. 2017-06-04. – М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО Минстроя России, 2016. – 110 с.
3. Пичугин, С. Ф. Нормирование ветровой нагрузки на решетчатые опоры в стандартах разных стран мира [Текст] / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько // Металлические конструкции. – 2009.- Т. 15, № 4. – С. 237–252.
4. Губанов, В. В. Совершенствование методики расчета начального натяжения оттяжек мачт [Текст] / В. В. Губанов, И. В. Межинская // Металлические конструкции. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 41–48.
5. Губанов, В. В. Визначення раціональних параметрів щогл висотою до 30 метрів [Текст] / В. В. Губанов, И. В. Межинська // Металеві конструкції. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 203–209.
6. Губанов, В. В. Особенности и характеристики повреждаемости дымовых труб на оттяжках [Текст] / В. В. Губанов, И. В. Межинская, А. В. Голиков // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2007. – Вип. 2007-6(68) : Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. С. 8–12.
7. Губанов, В. В. Качественные характеристики взаимодействия дымовых труб на оттяжках с анкерными фундаментами [Текст] / В. В. Губанов, А. В. Голиков // Металлические конструкции. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 115–124.
8. Строительные нормы и правила. Часть II. Нормы проектирования. Глава 23. Стальные конструкции [Текст] : СНиП II-23-81*. – [Действующий с 14 августа 1981 г.] – М. : Центральный институт типового проектирования, 1991. – 96 с.
9. Соколов, А. Г. Опоры линий передач [расчет и конструирование] [Текст] / А. Г. Соколов. – М. : Гос. изд-во литературы по стр-ву, арх. и строит. матер-лам, 1961. – 171 с.
10. Ремонт промышленных дымовых труб [Текст] / П. М. Грицков, Д. И. Вишневицкий, А. А. Зимберман. – М. : Стройиздат, 1979. – 174 с.
11. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт: статика и динамика [Текст] / Г. А. Савицкий. – М. : Государственное издательство литературы по вопросам радио и связи, 1953. – 111 с.

Получено 16.04.2019

В. В. ГУБАНОВ, О. М. ОЛЕНИЧ, О. В. ОЛЕНИЧ ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НА НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДИМАРЯ З ДВОМА РІВНЯМИ ВІДТЯЖОК ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглядається вплив конструктивних параметрів на ПДВ димової труби з двома рівнями відтяжок на основі порівняльного розрахунку. У ході дослідження розроблено програмний модуль розрахунку споруди в цілому на основі системи рівняння рівноваги відтяжок; рівняння рівноваги сил у вузлі і складання канонічного рівняння методу сил для статично невизначеної системи. На основі розробленого програмного модуля проведено аналіз впливу окремих конструктивних елементів на зміну напруження в стовбурі труби і розроблено рекомендацію щодо вибору раціональних конструктивних рішень димових труб з двома рівнями відтяжок.

Ключові слова: напружено-деформований стан, димарі, відтяжки, розрахункова схема, конструктивні параметри, металеві конструкції.

VADIM GUBANOV, ELENA OLENICH, ALEKSANDER OLENICH
INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS ON THE STRESS-STRAIN
STATE OF THE CHIMNEY WITH TWO LEVELS OF DELAYS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article discusses the influence of design parameters on the chimney VAT with two levels of delays based on a comparative calculation. In the course of the study, a software module for the calculation of the structure as a whole was developed, based on the system of equilibrium equation of delays; equilibrium equation of forces in a node and compilation of the canonical equation of the method of forces for a statically indefinable system. On the basis of the developed program module, the analysis of the influence of individual structural elements on the change in stress in the pipe barrel was made, and a recommendation was developed on the choice of rational design solutions for chimneys with two levels of delays.

Key words: stress-strain state, chimneys, delays, design scheme, design parameters, metal structures.

Губанов Вадим Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров». Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений

Оленич Елена Николаевна – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование высотных сооружений, оценка состояния существующих конструкций.

Оленич Александр Викторович – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование высотных сооружений, оценка состояния существующих конструкций

Губанов Вадим Вікторович – доктор технічних наук, професор кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів». Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок і проектування висотних споруд.

Оленич Олена Миколаївна – магістрант кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування висотних споруд, оцінка стану існуючих конструкцій.

Оленич Олександр Вікторович – магістрант кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування висотних споруд, оцінка стану існуючих конструкцій

Gubanov Vadim – D. Sc. (Eng.), Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer». Scientific interests: include the reliability of metal structures and design of highrise special construction.

Olenich Elena – master's student Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: calculation and design of high-rise structures, assessment of the state of existing structures.

Olenich Aleksander – master's student Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: calculation and design of high-rise structures, assessment of the status of existing structures