



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2012, ТОМ 18, НОМЕР 3, 197–208

УДК 624.074.43

(12)-0270-1

ВИБІР РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДИМАРІВ, ЩО ВІЛЬНО СТОЯТЬ

В. В. Губанов, А. М. Кульчицький

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

Отримана 6 вересня 2012; прийнята 20 вересня 2012.

Анотація. У статті розглянуті різні варіанти моделювання розрахункової схеми вільностоячих димарів, а саме: стрижньова схема у вигляді консольного стрижня постійного перерізу; розрахункова схема у вигляді ідеальної циліндрової оболонки, змодельованої в програмному комплексі ANSYS Workbench 14.0; розрахункова схема у вигляді ідеальної циліндрової оболонки з врахуванням основи, змодельованої в програмному комплексі ANSYS Workbench 14.0, а також розрахункова схема у вигляді неідеальної циліндрової оболонки з геометричним відхиленням у вигляді угнутості. Отримані значення еквівалентних напружень (напруження фон Мізеса – σ_{eq}) для ідеальної оболонки в ПК ANSYS порівнюються з головним напруженням (σ_x), визначеним аналітично як для консольного стрижня і з еквівалентним напруженням (σ_{eq}) в схемі з угнутістю. Порівняння показало розбіжність в 15 % між напруженням для ідеальних оболонок і 65 % для оболонки з угнутістю.

Ключові слова: димар, розрахункова схема, угнутість, чисельні методи, основа, еквівалентне напруження, місцеве напруження, циліндрова оболонка.

ВЫБОР РАСЧЁТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СВОБОДНОСТОЯЩИХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

В. В. Губанов, А. Н. Кульчицкий

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

Получена 6 сентября 2012; принята 20 сентября 2012.

Аннотация. В статье рассмотрены различные варианты моделирования расчётной схемы свободностоящих дымовых труб, а именно: стержневая схема в виде консольного стержня постоянного сечения; расчётная схема в виде идеальной цилиндрической оболочки, смоделированной в программном комплексе ANSYS Workbench 14.0; расчётная схема в виде идеальной цилиндрической оболочки с учётом основания, смоделированной в программном комплексе ANSYS Workbench 14.0, а также расчётная схема в виде неидеальной цилиндрической оболочки с геометрическим отклонением в виде вогнутости. Полученные значения эквивалентных напряжений (напряжение фон Мизеса – σ_{eq}) для идеальной оболочки в ПК ANSYS сравниваются с главными напряжениями (σ_x), определёнными аналитически как для консольного стержня и с эквивалентными напряжениями (σ_{eq}) в схеме с вогнутостью. Сравнение показало расхождение в 15 % между напряжениями для идеальных оболочек и 65 % для оболочки с вогнутостью.

Ключевые слова: дымовая труба, расчётная схема, вогнутость, численные методы, основание, эквивалентные напряжения, местные напряжения, цилиндрическая оболочка.

THE SELECTION OF CALCULATED SCHEME FOR SELF-SUPPORTED CHIMNEY NUMERICAL CALCULUS

Vadim Gubanov, Artem Kulchytskyi

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: a.kulchytskyi@gmail.com

Received 6 September 2012; accepted 20 September 2012.

Abstract. It was considered the different cases of self-supported chimney calculated scheme modelling, that is stalky scheme in the form of the cantilever bar of uniform cross section; calculated scheme in the form of structural shell, modelled in the ANSYS Workbench 14.0 software solution; calculated scheme in the form of structural shell factored in substructure modelled in the ANSYS Workbench 14.0 software solution; calculated scheme in the form of unstructural cylindrical shell with geometrical deviation in the form of dimple. The received values of equivalent strain (von Mises's strain – σ_{eq}) were compared with the main strains (σ_x), defined analytically for cantilever shell with equivalent strains (σ_{eq}) in the scheme with dimple for the structural shell in the ANSYS. The comparing approved the 15 % deviation strains for structural shell's and the 65 % deviation for the shell with dimple.

Keywords: chimney, calculated scheme, dimple, numerical methods, ground, equivalent tension, local tension, cylindrical shell.

Формулировка проблемы

В современной науке используется большое количество расчётных комплексов, каждый из которых имеет свои ключевые достоинства и недостатки. Очень часто инженер, забывая или нарочно отодвигая простые аналитические методы решения, начинает решать задачи на тяжёлых программных комплексах, что, конечно же, иногда оправдано. В данной работе мы пробуем получить ответ на вопрос о необходимости и целесообразности применения «тяжёлых» программных комплексов для расчёта такого рода сооружений, как металлические дымовые трубы.

Согласно нормативным документам [4] и технической литературе [5, 6] металлические дымовые трубы необходимо рассчитывать как консольные сжато-изогнутые стержни, жёстко защемлённые в основании. Как показывают работы [3, 4], это не всегда оправдано, особенно при проведении проверочных расчётов на стадии эксплуатации такого рода сооружений, когда появляется необходимость учитывать различные виды геометрических отклонений в виде различного рода вогнутостей, прогаров, стыковки царг с эксцентриситетом, эллипсности царг. В современном научном мире уже созданы отдельные научные центры, в которых

изучают работу сооружений путём создания расчётных схем максимально приближенных к работе реальных данных сооружений. Например, объёмное моделирование зданий и сооружения, учёт дополнительных факторов влияющих на их работу, а, следовательно, и на напряжённо-деформированное состояние. Одними из таких факторов являются: учёт фундамента, основания, различные варианты моделирования и приложения нагрузок, применение различных расчётных схем и видов расчёта [9]. Естественно, для каждого типа конструкций и расчётных случаев (например, учёт геометрических отклонений) необходимо определить наиболее подходящий метод расчёта с тем, чтобы на практике, при расчёте, получить напряжённо-деформированное состояние (далее НДС) модели максимально приближенной к НДС реального сооружения.

Необходимо проверить, насколько данные усложнения оправданы и позволяют более точно определить НДС сооружения, а следовательно, получать более точные результаты по сравнению с простыми расчётными моделями для аналитического анализа, т. к. эти усложнения всегда требуют больших затрат времени и больших знаний, чем расчёты простыми аналитическими методами.

Цель исследования

На основании сравнительного расчёта определить наиболее рациональные расчётные схемы и методы для определения напряжённо-деформированного состояния такого рода сооружений на стадии проектирования (идеальная цилиндрическая оболочка) и при проведении проверочных расчётов (на примере неидеальной цилиндрической оболочки с геометрическим отклонением в виде вогнутости). Для этого необходимо определить влияние основания и других факторов (в данном случае геометрического отклонения в виде вогнутости) на НДС сооружения.

Объект исследования

Объектом исследования являются металлические дымовые трубы. Металлические дымовые трубы – это высотные тонколистовые цилиндрические конструкции, предназначенные для отвода отработанных газов в верхние слои атмосферы с последующим их рассеиванием. По конструктивному решению металлические

дымовые трубы делятся на свободстоящие, подкреплённые оттяжками или жёсткими подкосами, а также в решётчатом каркасе (вытяжные башни). Основные виды конструктивных решений металлических дымовых труб приведены на рисунке 1.

Основные виды расчётных нагрузок на дымовые трубы согласно [9] подразделяют на постоянные и временные.

Постоянные нагрузки:

- собственный вес сооружения;
- вес футеровки и дополнительного оборудования.

Временные нагрузки:

- воздействие ветра;
- внутреннее давление;
- температурные воздействия;
- гололёдная;
- специальные виды воздействий (сейсмическая, аварийные, химические воздействия).

В данной работе рассматривается также влияние геометрического отклонения в виде вогнутости на НДС металлических дымовых труб. Зоны с геометрическими отклонениями относятся

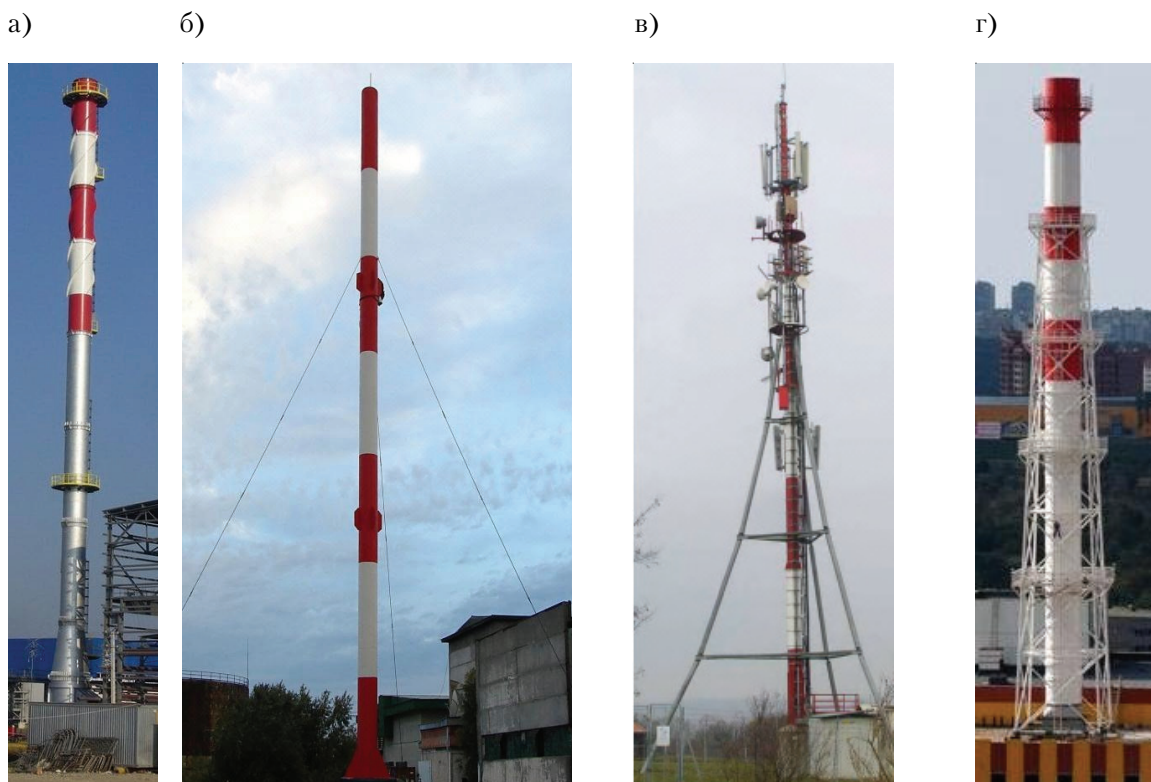


Рисунок 1. Основные виды конструктивных решений металлических дымовых труб: а) свободстоящая; б) с оттяжками; в) с жёсткими подкосами; г) в решётчатом каркасе.

к зонам с местным возмущением напряжений. К которым, согласно [8], относятся также зоны с краевым эффектом (резкое изменение сечения) и зоны с локально приложенными нагрузками (например, узел примыкания оттяжек).

Основной материал

В данной работе исследовалась металлическая дымовая труба высотой $H = 60$ м, диаметром $D = 3$ м и толщиной $t = 10$ мм.

Расчёт выполнялся с учётом собственного веса сооружения, веса футеровки, принятой из кирпича шамотного (ширина кладки $b_{\text{фут}} = 144$ мм, плотность $\rho = 1900$ кг/м³) и ветровой нагрузки, характеристическое значение которой принято согласно [1] $W = 600$ Па.

Для определения напряжённо-деформированного состояния дымовой трубы сравнивались 4 расчётные схемы, а именно расчётные схемы в виде: консольного стержня постоянного сечения; пространственной идеальной цилиндрической оболочки; пространственной идеальной цилиндрической оболочки, работающей совместно с фундаментом и основанием; пространственной неидеальной цилиндрической оболочки с геометрическим отклонением в виде вогнутости.

Виды расчётов и граничные условия, принятые в данной работе, для определения НДС свободной дымовой трубы следующие:

- для *расчётной схемы 1* принят аналитический метод расчёта, как для жёстко защемлённого консольного стержня. Основная характеристика НДС – главные напряжения σ_x ;
- для *расчётной схемы 2*, согласно [9, 10], принят линейно-упругий метод расчёта оболочки (ЛА) с определением первичных напряжений, в данном случае эквивалентных напряжений σ_{eq} (напряжение фон Мизеса). Цилиндрическая оболочка рассматривается идеальной жёстко защемлённой в основании;
- для *расчётной схемы 3* принят метод расчёта, как и для *расчётной схемы 2*, но в данной расчётной схеме опирание базы дымовой трубы происходит непосредственно на фундамент с её жёстким сопряжением;
- для *расчётной схемы 4*, согласно [9], принят физически и геометрически нелинейный расчёт с учётом дефектов (GMNIA), также

с определением первичных напряжений (напряжение фон Мизеса). Цилиндрическая оболочка рассматривается неидеальной, с геометрическим отклонением в виде вогнутости жёстко защемлённой в основание.

Дискретизация расчётных схем. Выбор размеров конечного элемента (далее КЭ) для расчётных моделей 2–4 производился на основании предварительных расчётов и определении размеров КЭ, при котором последующее его уменьшение не влияет на результаты расчёта или его влияние очень мало (до 3 %). Сравнение производилось по эквивалентным напряжениям (σ_{eq}). По результатам расчёта были приняты следующие размеры КЭ:

- в расчётных схемах 2 и 3 первые 5 м расчётной модели от основания разбивались на КЭ размером 50×50 мм, а вся остальная часть – 200×200 мм;
- в расчётной схеме 4 первые 5 м расчётной модели от основания разбивались на КЭ размером 25×25 мм, а в зоне с геометрическим отклонением в виде вогнутости производилось сгущение сетки КЭ (максимальный размер КЭ 5×5 мм).

Расчётная схема 1

В качестве расчётной схемы принят консольный жёстко защемлённый стержень постоянного сечения с аналитическим решением согласно [1].

Главное напряжение в стволе металлической дымовой трубы рассчитывают по формуле:

$$\sigma = N / F + M / W \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

где N – продольное расчётное усилие от вертикальных нагрузок;

M – расчётный изгибающий момент от горизонтальных нагрузок;

$A = 2\pi r t$ – площадь поперечного сечения оболочки трубы;

$W = \pi^2 t$ – момент сопротивления поперечного сечения оболочки трубы;

r – радиус сечения оболочки;

t – толщина оболочки.

Схема загрузки данной расчётной модели представлена на рисунке 2. Расчётная схема условно разбита на 12 равных частей по 5 м каждая. На рисунке 2 представлены следующие

условные обозначения: $q_h, 1 \dots q_h, 12$ – ветровая нагрузка на участке дымовой трубы, согласно [2]; $q_v, 1 \dots q_v, 12$ – нагрузка от собственного веса дымовой трубы; $q_f, 1 \dots q_f, 12$ – нагрузка от веса футеровки. Величина нагрузок q_h и q_f являются постоянными для каждого участка расчётной схемы.

Расчётная схема 2

В качестве расчётной схемы принята пространственная тонколистовая цилиндрическая идеальная оболочка, смоделированная в конечно-элементном программном комплексе ANSYS Workbench 14.0. Значения эквивалентных напряжений (s_{eq}) определяются непосредственно в данном программном комплексе по формуле (напряжения фон Мизеса):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Схема загрузки данной расчётной модели представлена на рисунке 3.

Ветровая нагрузка для данной расчётной схемы определяется согласно [2], как и для расчётной схемы 1.

Приложение ветровой нагрузки к конструкции в ПК ANSYS происходит следующим образом (рисунок 3):

- сначала находим qh_i ветровую распределённую нагрузку в $H/м$, как для консольного стержня:

$$qh_i = Wm_i \cdot d; \quad (3)$$

- находим нагрузку на каждый узел расчётной модели:

$$q_{y2l,i} = qh_i \cdot l_{yч} / \sum n, \quad (4)$$

где Wm_i – ветровое давление на участке согласно [2];

d – диаметр дымовой трубы;

$l_{yч}$ – высота участка расчётной модели;

$\sum n$ – количество узлов КЭ модели на каждом участке.

Подсчёт количества узлов и приложение ветровой нагрузки происходит автоматически с помощью специального макроса, написанного на языке программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language).

Данный макрос позволяет произвести автоматический расчёт и приложение ветровой нагрузки к расчётной модели. Универсальность данного макроса заключается в том, что его можно использовать при определении ветровой нагрузки для всех регионов Украины, а также при расчёте дымовых труб абсолютно любого диаметра и высоты (также возможно учитывать конусную часть дымовой трубы, параметры футеровки). При помощи командных вставок APDL к модели добавляются точечные массы, имитирующие массовые и инерционные характеристики секторов футеровки, которые учитываются в виде сил приложенных к опорным рёбрам футеровки.

Перед началом расчёта необходимо ввести начальные данные, пример которых представлен на рисунке 4.

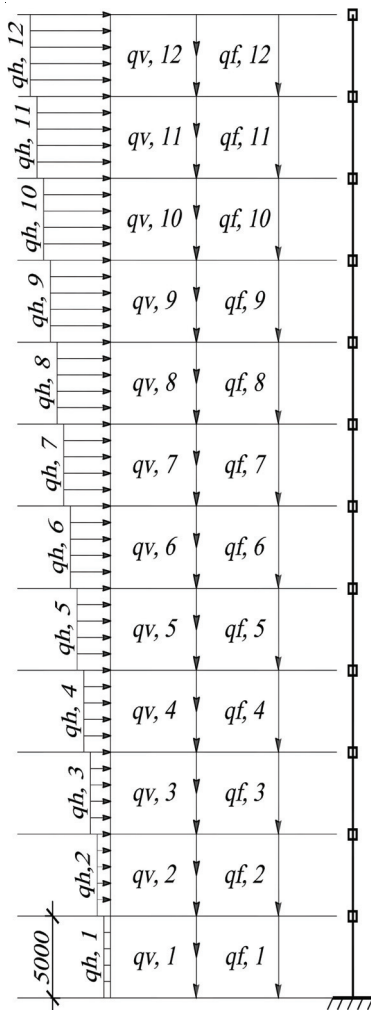


Рисунок 2. Расчётная схема дымовой трубы как консольного стержня.

Расчётная схема 3

В качестве расчётной схемы принята пространственная тонколистовая цилиндрическая идеальная оболочка, смоделированная при совместной работе с фундаментом и основанием, по типу «дымовая труба – фундамент – основание» в ПК ANSYS. Значения эквивалентных

напряжений (s_{eq}) определяются непосредственно в данном программном комплексе с учётом совместной работы фундамента и основания (формула 2).

Схема загрузки и приложение ветровой нагрузки данной расчётной схемы аналогична расчётной схеме 2.

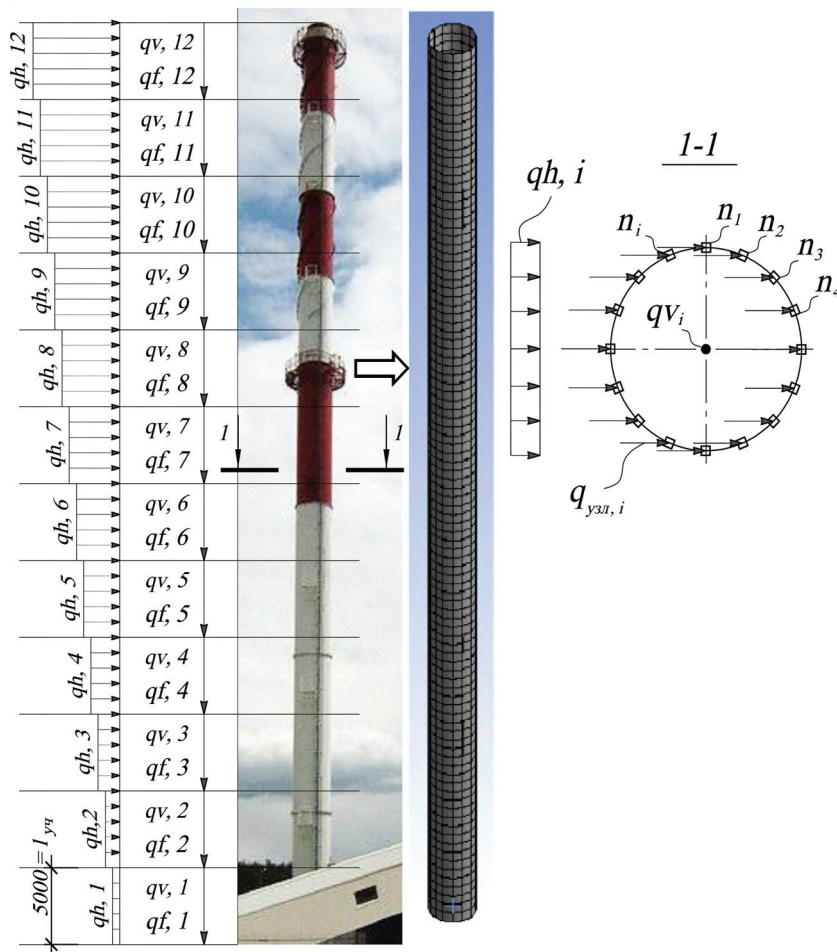


Рисунок 3. Расчётная схема дымовой трубы в ПК ANSYS.

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
4	☞ P2	Диаметр цилиндрической части трубы (м)	3	
5	☞ P2	Высота трубы (м)	60	
6	☞ P3	Количество секторов футеровки	12	
7	☞ P7	Ширина внутренних ребер футеровки (м)	0,12	
8	☞ P9	Толщина кладки футеровки (м)	0,114	
9	☞ P15	Толщина цилиндрической части трубы (мм)	10	
10	☞ P14	Плотность кладки футеровки (кг/м3)	1900	
46	☞ P48	Тип местности (1,2,3,4)	1	
47	☞ P47	Ветровой район (1,2,3,4,5)	5	

Рисунок 4. Некоторые данные для расчёта, представленные в *Parameter Set* ПК ANSYS.

В данной работе рассматривалось влияние 3-х типов основания на НДС сооружения, соответствующие жёсткому, средне уплотнённому и минимально уплотнённому основанию с модулем упругости (E_{zp}), соответственно 50, 30 и 15 МПа. Общий вид расчётной схемы представлен на рисунке 5.

Результаты сравнительного расчёта приведены в таблице 1.

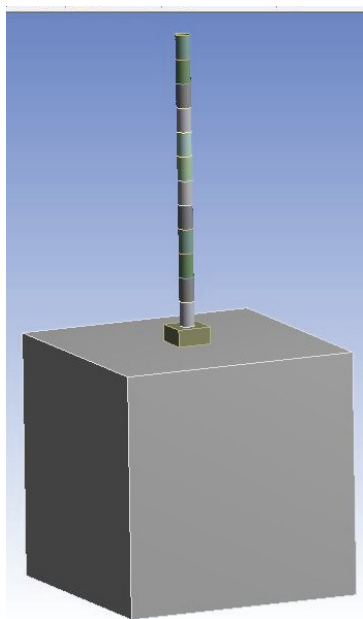


Рисунок 5. Общий вид расчётной схемы «дымовая труба – фундамент – основание».

Таблица 1. Значение σ_{eq} и горизонтального отклонения оголовка ($f_{от}$) дымовой трубы

E_{zp} , МПа	σ_{eq} , МПа	$f_{от}$, мм
15	96,0	353
30	96,0	276
50	96,0	245

Данная модель является полностью параметризованной. Это значит, что при создании расчётной схемы каждым геометрическим и физическим характеристикам дымовой трубы задан определённый параметр. Например, высота дымовой трубы – $P1$, диаметр дымовой трубы – $P2$ и так далее. Теперь изменяя в *Parameter Set* (рисунок 4) эти значения, геомет-

рическая модель дымовой трубы будет автоматически перестраиваться, и, что немаловажно, будет происходить автоматический перерасчёт всей расчётной модели.

Какие параметры данной расчётной модели можно изменять в *Parameter Set*:

- высоту, диаметр, толщину и материал дымовой трубы (также возможно учесть коническую часть и её характеристики);
- с учётом или без футеровки. Материал, ширину и высоту футеровки;
- геометрические размеры и материал фундамента;
- коэффициент Пуассона и модуль упругости основания;
- ветровое давление для всех регионов Украины (возможно также учесть любое значение ветрового давления в Pa).

Основные особенности параметризации

При создании расчётной модели тратится немного больше времени от обычного, чтобы задать параметры основным переменным (высота, диаметр, толщина модели, количество рёбер и т. д.), но последующая корректировка проекта занимает намного меньше времени и усилий. Исследователь затрачивает время не на создание новой расчётной модели, а на изучение работы конструкции при свободной корректировке различных переменных расчётной модели.

Создав параметрическую модель можно:

- просчитать сразу все интересующие варианты расчётной модели;
- получить аналитические зависимости (как в двумерной постановке – два параметра, так и в трёхмерной – влияние двух входных параметров на третий выходной);
- найти оптимальные конструктивные решения по заданным параметрам (минимизация массы или приведенных напряжений, наибольший коэффициент запаса и т. д.) или их сочетанию;
- выполнить планирование эксперимента и построить кривые отклика;
- произвести анализ чувствительности модели от различных входных параметров (определить какие параметры являются наиболее важными для данной модели, а следовательно, наибольшим образом влияют на НДС).

Расчётная схема 4

В качестве расчётной схемы принята пространственная тонколистовая неидеальная цилиндрическая оболочка, смоделированная с геометрическим отклонением в виде локальной вогнутости. Данная расчётная модель аналогична расчётной модели 2, на которой смоделировано геометрическое отклонение.

Локальная вогнутость принималась размерами 200×200 мм и глубиной вогнутости, равной толщине оболочки (10 мм). Общий вид участка с вогнутостью представлен на рисунке 6.

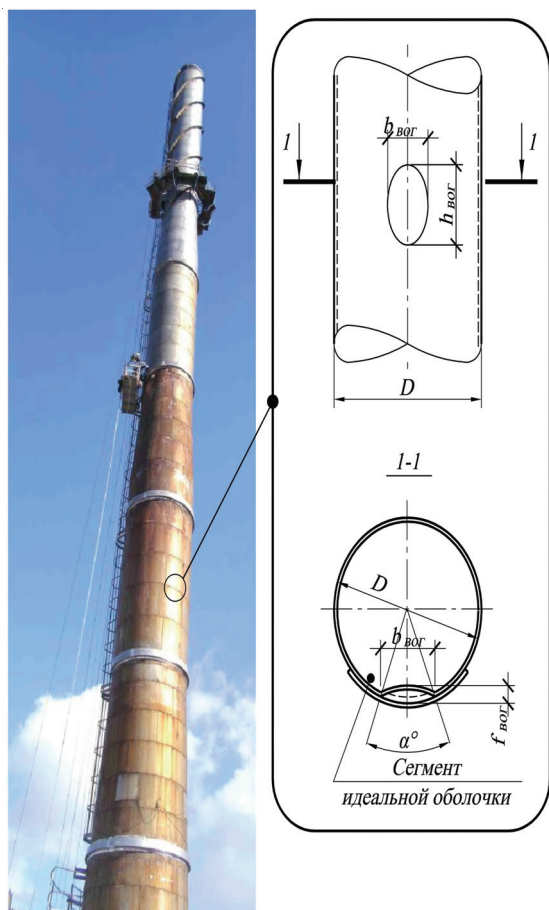


Рисунок 6. Общий вид участка металлической дымовой трубы с вогнутостью.

Вогнутость характеризуется следующими параметрами:

- угол охвата вогнутости (α°);
- ширина вогнутости ($b_{\text{вог}}$);
- высота вогнутости ($h_{\text{вог}}$);
- глубина вогнутости ($f_{\text{вог}}$).

Данная расчётная модель также является параметризованной. Помимо различных параметров дымовой трубы можно менять размеры вогнутости (высоту, ширину и глубину), а также высоту и место расположения вогнутости.

Было определено влияние места расположения вогнутости по высоте расчётной модели на НДС. Вогнутость моделировалась на расстоянии от 0,1 до 0,5 м от основания. Значения эквивалентных напряжений в оболочке ($\sigma_{\text{eq,об}}$), эквивалентных напряжений в зоне с вогнутостью ($\sigma_{\text{eq,вог}}$), и коэффициент концентрации (k_f) приведены в таблице 2. Отклонение оголовка дымовой трубы для всех расчётных случаев составило 212 мм.

Таблица 2. Значение σ_{eq} и k_f при различной высоте расположения вогнутости

Высота от основания, мм	$\sigma_{\text{eq,об}}$, МПа	$\sigma_{\text{eq,вог}}$, МПа	k_f
0,1	104,9	166,4	1,6
0,2	104,9	173,9	1,7
0,3	104,9	175,7	1,7
0,4	104,9	177,1	1,7
0,5	104,9	176,1	1,7
0,6	104,9	176,9	1,7
0,7	104,9	175,7	1,7
0,8	104,9	176,4	1,7
0,9	104,9	175,4	1,7
1,0	104,9	174,8	1,7

По полученным результатам получаем зависимость аппроксимированную полиномом 3-го порядка, представленную на рисунке 7.

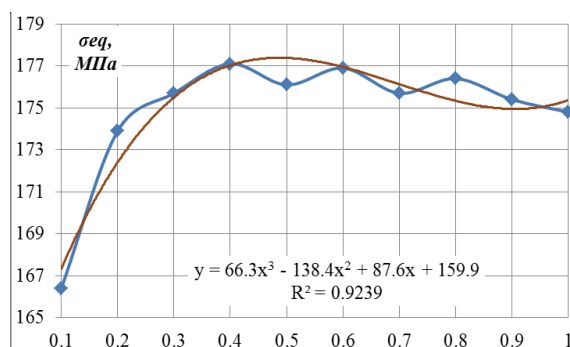


Рисунок 7. Влияние места расположения вогнутости на НДС дымовой трубы.

Сравнение эквивалентных напряжений (σ_{eq}) по 4-м расчётным схемам

Анализ напряжённо-деформированного состояния по четырём расчётным схемам показал следующие максимальные напряжения и отклонения оголовка дымовой трубы, приведенные в таблице 3.

Расчётные схемы с распределением приведенных напряжений (σ_{eq}) показаны на рисунках 8–10. Высота участка расчётной модели 5 м.

Выводы:

1. Расчёт дымовых труб по 1, 2 и 3 расчётным схемам дают близкие значения максимальных напряжений. Разница между расчётной

схемой 1 и 2 составляет 14 %, а между расчётной схемой 1 и 3–4 %.

2. При учёте основания в расчётной модели отклонение оголовка дымовой трубы (крен) возрастает в 1,3–1,8 раза по сравнению с 1 и 2 расчётными схемами.
3. В зоне с вогнутостью возникают местные возмущения напряжений, которые, на данный момент, никак не регламентируются нормативными документами Украины. Для учёта такого рода геометрического отклонения необходимо производить моделирование с помощью современных программных комплексов.
4. Необходимо исследовать устойчивость для данных моделей и видов геометрических отклонений.

Таблица 3. Максимальные напряжения и отклонения оголовка дымовой трубы при различных вариантах расчётных схем (РС)

Стержневая модель (РС.1)		Оболочечная модель (РС.2)		Модель с основанием, $E_{cp} = 50 \text{ МПа}$ (РС.3)		Модель с вогнутостью (РС.4) (отм. +0,500)	
σ_{cp} МПа	f_{dm} мм	σ_{eq} МПа	f_{dm} мм	σ_{eq} МПа	f_{dm} мм	σ_{eq} МПа	f_{dm} мм
92,1	214	104,9	199	96,0	245	176,1	212,2

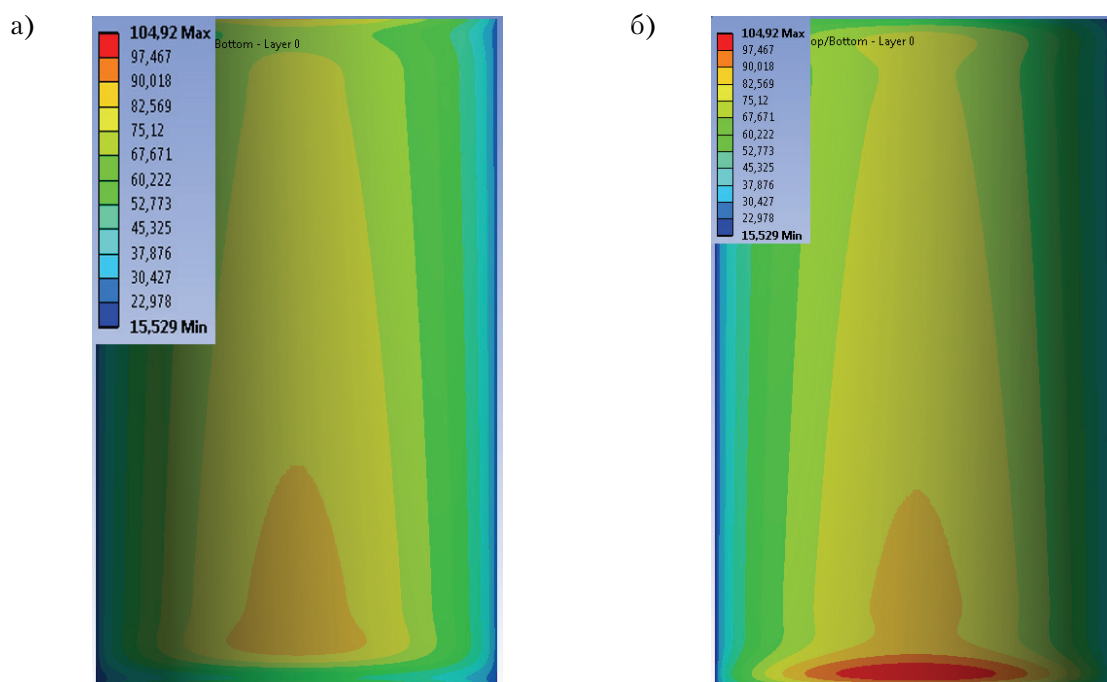


Рисунок 8. Распределение σ_{eq} на оболочечной расчётной модели (РС.2) дымовой трубы: а) вид на наружную часть, б) вид на внутреннюю часть.

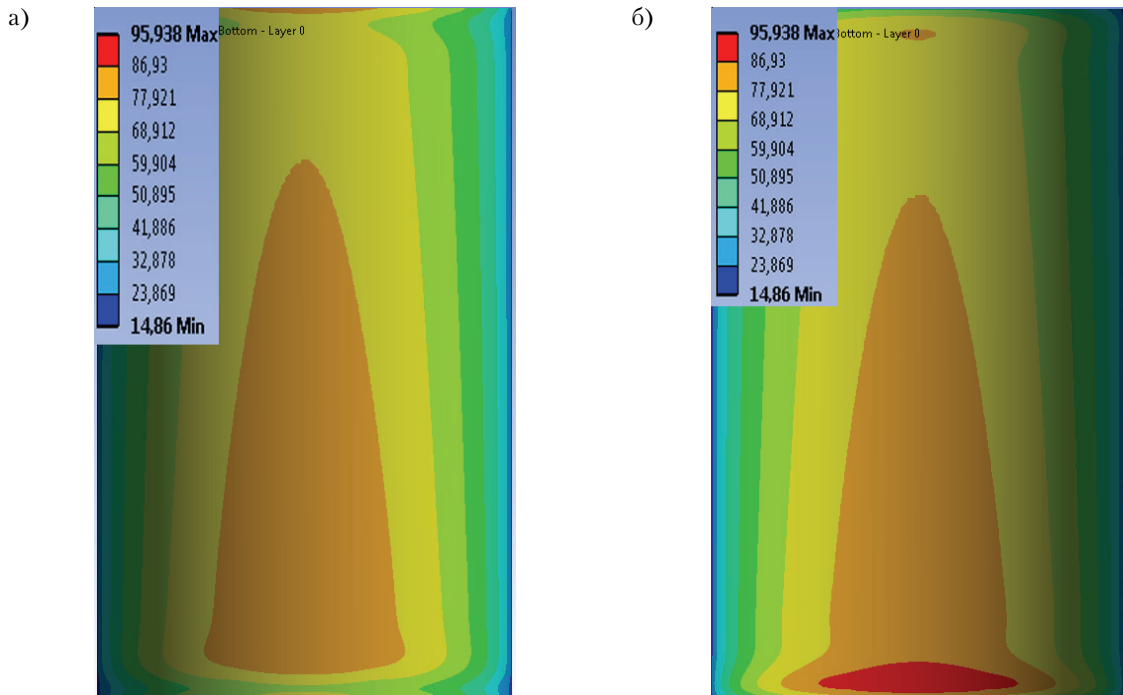


Рисунок 9. Распределение σ_{eq} на оболочечной расчётной модели с основанием (РС.3) дымовой трубы: а) вид на наружную часть, б) вид на внутреннюю часть.

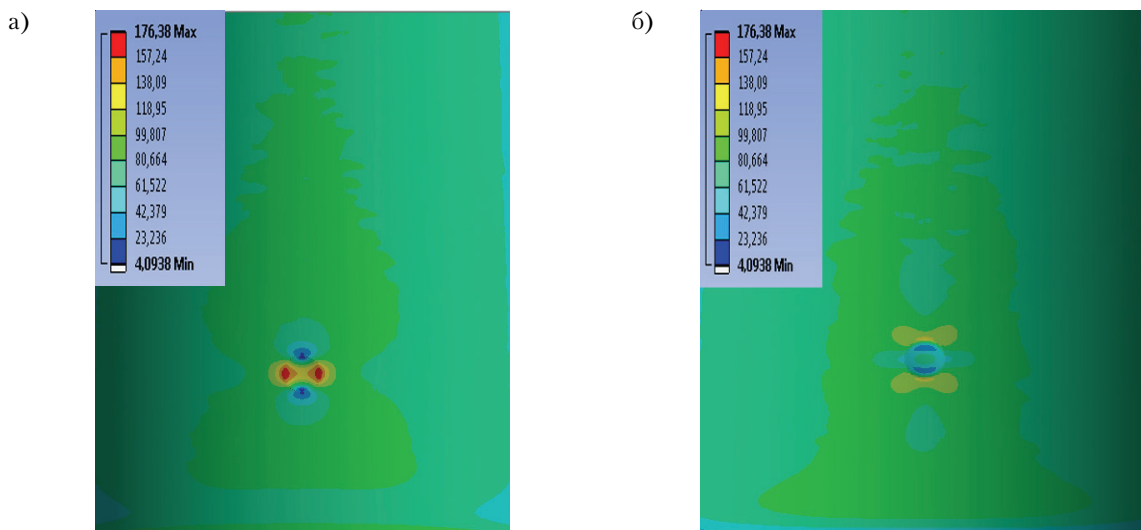


Рисунок 10. Распределение σ_{eq} на оболочечной расчётной модели с вогнутостью (РС.4) дымовой трубы: а) вид на наружную часть, б) вид на внутреннюю часть.

Дальнейшие направления исследований

1. Рассмотреть расчётную схему дымовой трубы с оттяжками, по типу «дымовая труба с оттяжками – фундамент – основание». Определить влияние основания на НДС такого рода сооружений.
2. Рассмотреть различные варианты моделирования ветровой нагрузки для такого рода сооружений:
 - в соответствии со схемой 14б [2];
 - средствами ПК ANSYS в пакете гидродинамического моделирования CFX, с возможностью получить реальные поля распределения

ветрового давления на сооружении с последующим проведением прочностного расчёта. Данные исследования позволят определить наиболее рациональные схемы приложения ветрового давления для такого рода сооружений, как на стадии проектирования (идеальная конструкция), так и на стадии эксплуатации (конструкция с геометрическими отклонениями). А возможно, и получить уточняющие коэффициенты для простейших схем ветрового нагружения (при расчёте дымовой трубы как консольный стержень).

Благодарности

Исследования по данной теме были выполнены на базе Баухаус-Университета Веймар (Bauhaus-Universität Weimar) в рамках госу-

дарственной бюджетной программы, проводимой Министерством образования и науки, молодёжи и спорта Украины.

Особая благодарность выражается Министерству образования и науки, молодёжи и спорта Украины в лице Д. В. Табачника и Е. Н. Сулемы за предоставленную возможность пройти стажировку в передовом немецком университете; ректору Донбасской национальной академии строительства и архитектуры Е. В. Горохову за высококачественную научную подготовку, благодаря которой была возможна данная стажировка; профессору Франку Вернеру (Prof. Frank Werner) и доктору Тому Ламеру (Dr. Tom Lahmer) из Баухаус-Университет Веймар за благоприятную трудовую атмосферу и предоставление современного программного комплекса ANSYS 14.0.

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.
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. Дымовые трубы [Текст] / А. М. Ельшин, М. Н. Ижорин, В. С. Жолудов, Е. Г. Овчаренко ;

References

1. DBN B.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 B.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)
5. 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)
6. Edited by Gorev, V. V. Metal Constructions. In three volumes. Volume 3. Special structures and constructions. Moscow: High school, 2002. 544 p. (in Russian)
7. SNiP 2.09.03-85. Construction rules and regulations. Constructions of enterprises. Moscow: TsITP Gosstroia USSR, 1986. 56 p. (in Russian)

- Под редакцией С. В. Сатьянова. – М. : Стройиздат, 2001. – 296 с.
6. 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.
 7. 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.
 8. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен [Текст] / М. Б. Солодарь, М. В. Кузнецова, Ю. С. Плишкин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 186 с.
 9. 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.
 10. 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.
 8. Solodar, M. B.; Kuznetsova, M. V.; Plishkin, Yu. S. Steel structures of stacks. Leningrad: Stroiizdat, 1975. 186 p. (in Russian)
 9. 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)
 10. 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 – к. т. н., доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій; вдосконалення методів розрахунку висотних споруд; планування експлуатаційного процесу висотних будівельних конструкцій та висотних споруд.

Кульчицкий 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.

Губанов Вадим Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, совершенствование методов расчета высотных сооружений; планирование эксплуатационного процесса высотных строительных конструкций и 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.

Vadim Gubanov – PhD (Engineering), an Associate Professor, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: operational reliability of metal structures, improvement of high-rise buildings design techniques, operating process planning of high rise constructions and structures.

Artem Kulchytsky – post-graduate student, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: extending the life of altitude structures on the basis of perfection of constructive solutions and methods of calculation.