

УДК 624.971.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.155.2015.92108>

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ВЕНТИЛЯЦИОННАЯ ТРУБА – ФУНДАМЕНТ – ОСНОВАНИЕ»

Канд. техн. наук О.В. Кичаева, асп. Е.А. Перепелица

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «ВЕНТИЛЯЦІЙНА ТРУБА - ФУНДАМЕНТ - ОСНОВА»

Канд. техн. наук О.В. Кічаєва, асп. К.О. Перепелица

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SYSTEM "VENT TUBE - FOUNDATIONS - BASIS"

PhD O.V. Kichaeva, Postgraduate E.A. Perepelitsa

В статье проведено исследование совместной работы вентиляционной трубы с грунтовым основанием. Рассмотрены различные варианты конечно-элементного моделирования системы «вентиляционная труба – фундамент – сооружение» и выполнено сопоставление результатов расчета с данными натурных исследований и исполнительной геодезической съемки. Показано, что наиболее адекватным моделированием грунтовых условий является его представление в виде объемных физически нелинейных конечных элементов.

Ключевые слова: вентиляционная труба, совместная работа, конечно-элементное моделирование.

У статті проведено дослідження спільної роботи вентиляційної труби з ґрунтовою основою. Розглянуто різні варіанти скінчено-елементного моделювання системи «вентиляційна труба - фундамент - споруда» і виконано порівняння результатів розрахунку з даними натурних досліджень та виконавчої геодезичної зйомки. Показано, що найбільш адекватним моделюванням ґрунтових умов є його представлення у вигляді об'ємних фізично нелінійних скінчених елементів.

Ключові слова: вентиляційна труба, спільна робота, скінчено-елементне моделювання.

In this paper, a study of teamwork ventilation pipe with a soil base. Three variants of the simulation system "vent tube - foundation - base": 1) modeling of a multilayer substrate and determination of the coefficients bed C1, C2 according to the geological survey; 2) the creation and connection of a three-dimensional volume of the soil mass finite element calculation in the linear formulation; 3) the creation and connection of a three-dimensional volume of the soil mass physically nonlinear finite element simulation of the unilateral operation of soil compression in view of the shift. The calculation is performed in the nonlinear formulation. The criteria for comparing the results of the numerical modeling field studies and made two parameters: the foundation of the bank and the Bank of stem vent pipe.

Comparison of numerical models with results of geodetic observations showed that all models have a sufficient degree of certainty. The discrepancy in the results between the surveying and studied model was: Compared with the model 1 – 4,3% in comparison with the model 2 – 11,1% in comparison with the model 3 – 0,9%. Thus, the most adequate modeling of groundwater conditions is its representation a volume physically nonlinear finite element-cops.

Keywords: ventilation tube, joint work, finite element modeling.

Введение. При расчете и проектировании высотных башенных сооружений, таких, как стволы дымовых и вентиляционных железобетонных труб, возникает необходимость учета взаимодействия системы «венттруба – фундамент – основание» как фактора, существенно влияющего на напряженно-деформированное состояние конструкции трубы.

Решение такой задачи требует создания корректных расчетных моделей, которые учитывают большинство основных факторов, влияющих на взаимодействие грунтового основания, фундамента и ствола вентиляционной трубы, и наиболее полно отражают действительную работу системы.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. Согласно указаниям по расчету железобетонных дымовых труб [1, 2] расчет сечений ствола производится по деформированной схеме с учетом влияния перемещений трубы от ветра и крена фундамента. Методика определения крена фундамента, нагруженного эксцентрично, приведена в [3]. Однако часто причиной крена фундамента является неравномерность осадок его основания. Крен фундамента в таком случае следует определять с помощью геодезической съемки.

Построение расчетных моделей, отражающих работу системы, позволяет выполнять точные проектировочные и проверочные расчеты стволов дымовых и вентиляционных труб, давать оценку несущей способности и надежности конструкций, прогнозировать работу сооружений в ходе эксплуатации.

Одним из современных, широко используемых численных методов, является метод конечных элементов (МКЭ).

Исследование проведено в виде численного эксперимента в ПК ЛИРА, версия 9.6, рассмотрены расчетные модели различной степени точности и сложности.

Анализ последних исследований и публикаций.

Методики расчетов самых разнообразных эксплуатируемых сооружений, находящихся в сложных

инженерно-геологических условиях и находящихся на разных стадиях жизненного цикла, постоянно совершенствуются. Вопросами моделирования работы строительных конструкций и формирования корректных расчетных моделей занимались такие исследователи, как В.А. Банах [4], Л. Г. Батрак, А. С. Городецкий, Е. В. Горохов, А. А. Дыховичный, И. Д. Евзеров, Н.Л. Зоценко [5], С. Ф. Клованич, В. Комков, Е. З. Криксунов, В. В. Кулябко, А. В. Перельмутер [6], В. И. Сливкер, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий, R. L. Taylor, O. C. Zienkiewicz и многие другие исследователи [7 – 10].

Определение цели и задачи исследования.

Целью исследования является разработка подходов к формированию расчетных моделей системы «венттруба – фундамент – основание». Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

1. Создание конечно-элементных моделей для анализа взаимодействия системы «венттруба – фундамент – основание».

2. Выполнение сравнения результатов, полученных при различных подходах численного моделирования.

3. Сопоставления результатов расчета с данными исполнительной геодезической съемки, а также результатов ручного счета по методике ДБН. Анализ достоверности решений, полученных в результате численного моделирования.

Основная часть исследования. Ствол вентиляционной железобетонной трубы имеет коническую форму с переменным уклоном. Толщина стенки трубы изменяется от 350 мм у основания до 180 мм на отм. 97,500 м и вновь возрастает до 300 мм на отм. 100,000 (рис. 1). Бетон ствола принят класса C18/22,5 (марка M300).

На отм. 15,000 предусмотрен проем 6,6 ? 3,2 м для устройства подводящего воздухоотвода.

Фундамент запроектирован железобетонным из бетона класса C18/22,5 (марка M300). Конструктивно фундамент включает стакан в виде полого усеченного конуса и круглую в плане плиту диаметром 16 м, толщиной 1,3 м. Внутренний диаметр

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

стакана 9,5 м, высота стенки равна 3,7 м. Толщина стенки стакана у основания 1,2 м, а у верхнего обреза 0,43 м. Общая высота фундамента 5,0 м, глубина заложения фундамента – 5 м (абсолютная отметка подошвы фундамента 99 м).

Площадка строительства вентиляционной трубы спланирована до абсолютной отметки 104 м.

Инженерно-геологический разрез площадки строительства сооружения вентиляционной трубы приведен на рис. 2. Характеристики грунтов основания приведены в табл. 1.

В результате проведения исполнительной геодезической съемки и измерения крена вентиляционной трубы установлено, что значение крена составляет $117/100000=0,00117$, где 117 мм – горизонтальное перемещение верхнего обреза ствола, 100000 мм – высота ствола вентиляционной трубы.

Геодезические измерения отклонения ствола, согласно указаниям по обследованию дымовых и вентиляционных промышленных труб [11,12], производятся в безветренную пасмурную погоду, чтобы исключить влияние на результаты солнечной радиации и ветрового давления.

Таблица 1.

Характеристики грунтов основания

№ ИГЭ	Инженерно-геологический элемент (ИГЭ)	Характеристики		
		φп, град	сп, кПа	Е, МПа
1	Насыпной слой - суглинки и глины плотные			
5	Суглинки	19	26	11
6	Глины	19	36	23
7	Глины сарматского яруса	22	34	18
11	Элювиальные грунты, продукты выветривания гранитов – дресва	28	25	13

Рассмотрено три варианта моделирования работы системы «ствол – фундамент – основание»:

1. Моделирование многослойного основания и определение коэффициентов постели С1, С2 по данным геологических изысканий;

2. Создание и подключение трехмерного грунтового массива из

объемных конечных элементов с расчетом в линейной постановке;

3. Создание и подключение трехмерного грунтового массива из объемных физически нелинейных конечных элементов для моделирования односторонней работы грунта на сжатие с учетом сдвига. Расчет выполняется в нелинейной постановке.

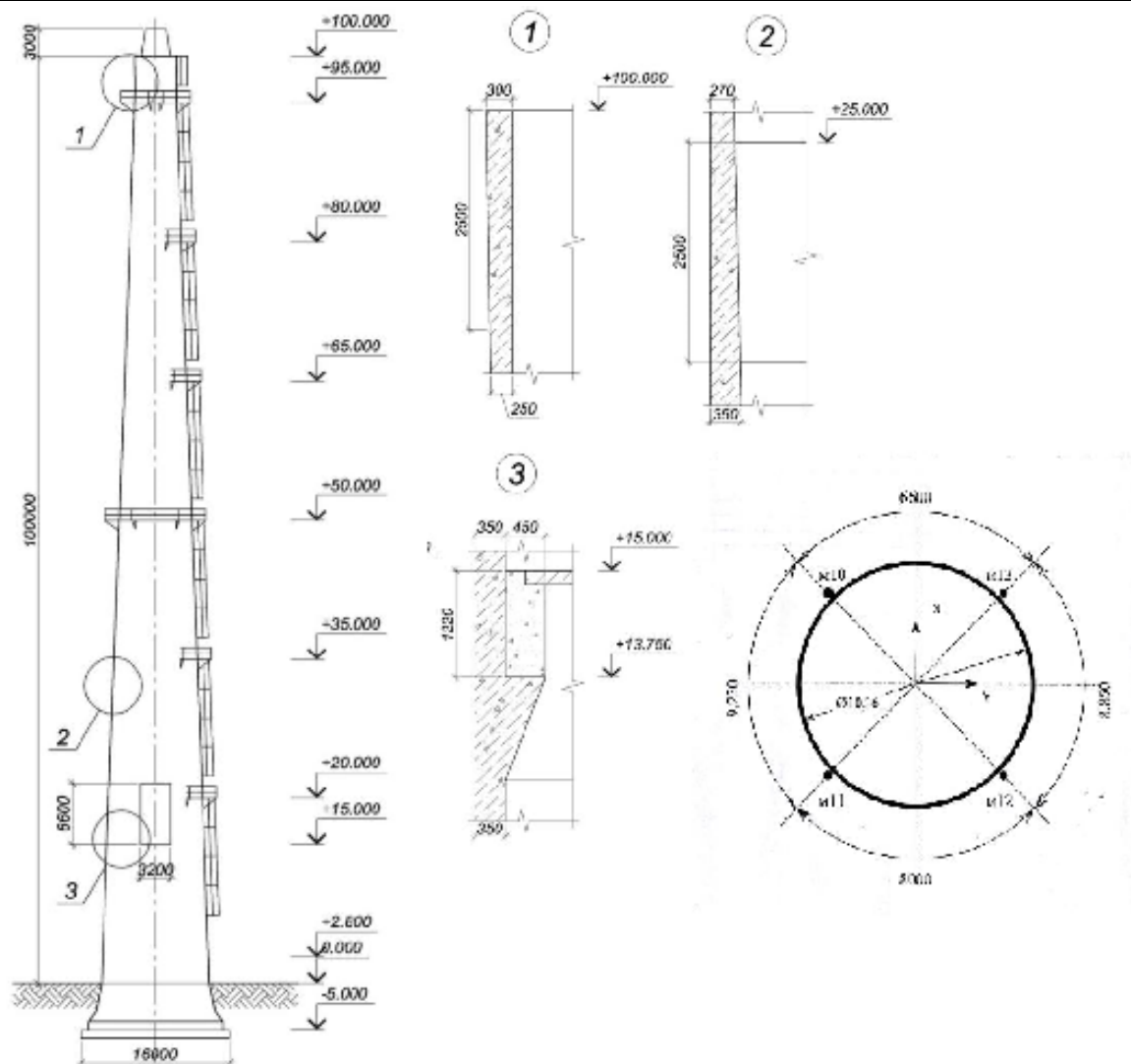


Рис. 1. Конструктивная схема сооружения вентиляционной трубы и схема осадочных марок

Условные обозначения

1а – Насыпной слой – суглинок тугопластичный

1 – Почвенно-растительный слой – суглинки черные и темно-серые, гумусированные, твердой и полутвердой консистенции

6 – Глины бурые и красные, карбонатные с гнездами кристаллов гипса

7 – Глины зеленовато-серые и серые, с включением карбонатов и гнезд кристаллов гипса

11 – Дресва гранита каолинизированная, с пятнами ожелезнения, обводненная, с песком, глиной, каолином 10 – 15%

12 – Гранит серый и розовато-серый, мелко-, средне- и крупнозернистый, трещиноватый, средней крепости

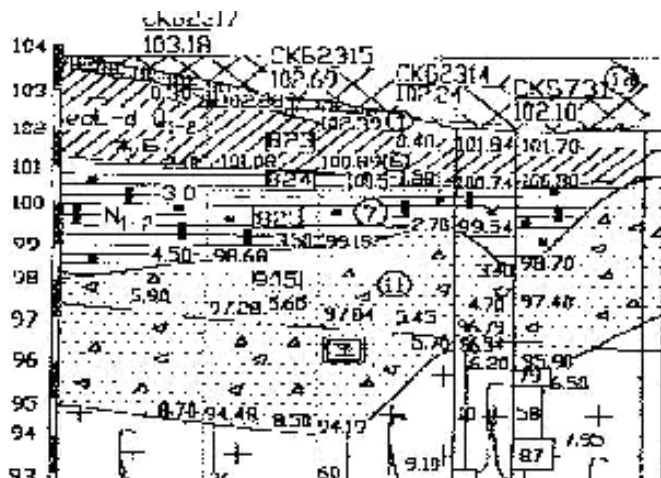


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез площадки строительства сооружения вентиляционной трубы

Ствол и фундамент железобетонной вентиляционной трубы смоделирован конечными элементами оболочки с соответствующими проектными характеристиками жесткости. Принято, что крен трубы произошел только по причине неравномерной осадки основания.

Ниже приведено описание создания перечисленных расчетных моделей и результаты расчета.

1. Моделирование многослойного основания и определение коэффициентов постели C_1 , C_2 по данным геологических изысканий. Расчетная модель вентиляционной трубы выполнена из пластинчатых конечных элементов (КЭ). Закрепление узлов фундаментной плиты выполнено таким образом, чтобы не

препятствовать вертикальным перемещениям по оси z , а также повороту фундамента в результате крена. Нагрузка задана равномерно распределенной от собственного веса конструкций фундамента и ствола вентиляционной трубы.

Расчетная модель вентиляционной трубы и основания приведена на рис. 3.

Пластинчатым КЭ фундамента назначены коэффициенты постели C_1 , C_2 . Значения коэффициентов постели определяются в соответствии с выбранной моделью грунта, которая создается по данным геологических изысканий. Расчет выполняется в соответствии с [3], с учетом веса грунта выше отметки приложения нагрузки по методу 3 – модифицированный расчет для модели Пастернака.

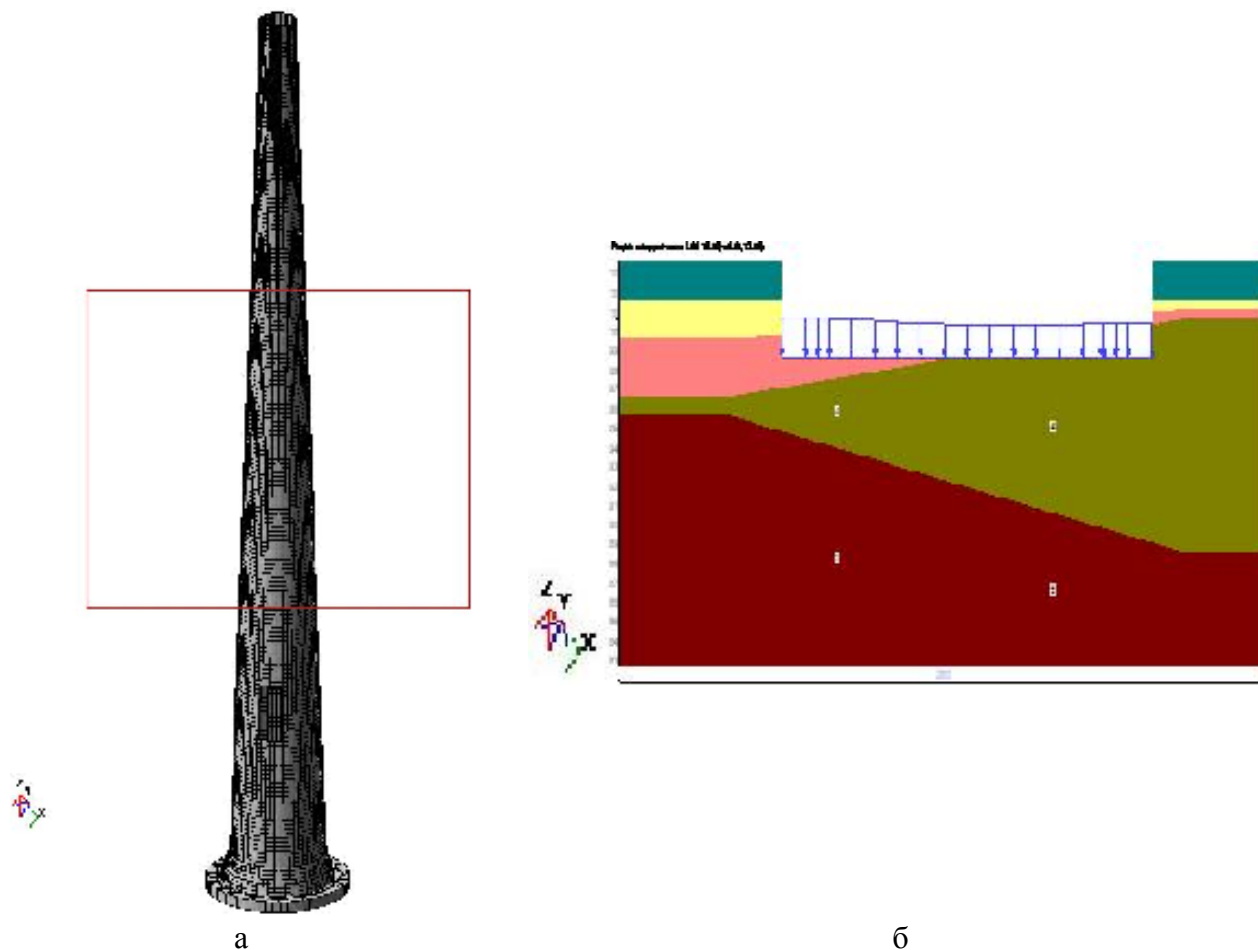


Рис. 3. Расчетная модель вентиляционной трубы и основания:

а – аксонометрическая схема модели ствола вентиляционной трубы, б – инженерно-геологический разрез основания под подошвой фундамента

Коэффициент постели C_1 вычисляется деформации и коэффициента Пуассона по усредненным значениям модуля грунта:

$$C_1 = \frac{E}{H_c(1-2\nu^2)} \quad (1)$$

где E - усредненное значение модуля упругости грунта;

H_c - глубина сжимаемой толщи; ν - усредненный коэффициент Пуассона грунта.

Для определения среднего модуля деформации вводится поправочный коэффициент u к величине i -го подслоя.

Этот коэффициент изменяется от $u_1 = 1$ на уровне подошвы фундамента до $u_n = 12$ на уровне уже вычисленной границе сжимаемой толщи. Принято, что коэффициент u изменяется по закону квадратной параболы:

$$u = \frac{11z^2}{H_c^2} + 1 \quad (2)$$

Кроме того, принимается, что дополнительное вертикальное напряжение по глубине распределено равномерно. Тогда

$$E = \frac{H_c}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{u_i E_i}} \quad (3)$$

Коэффициент постели C_2 вычисляется по формуле:

$$C_2 = \frac{C_1 H_c^2 (1-2\nu^2)}{6(1+\nu)} \quad (4)$$

Расчет выполняется методом последовательных приближений. Давление под подошвой фундамента P_z принимается в каждой последующей итерации равным отпору грунта R_z с пересчетом коэффициентов постели C_1 и C_2 до необходимой сходимости результатов.

В соответствии с ИГУ глубина сжимаемой толщи варьируется от $H_c = 8,0$ м до $H_c = 15,0$ м.

Итоговые значения давления под подошвой фундамента P_z и отпора грунта R_z представлены на рис. 4.

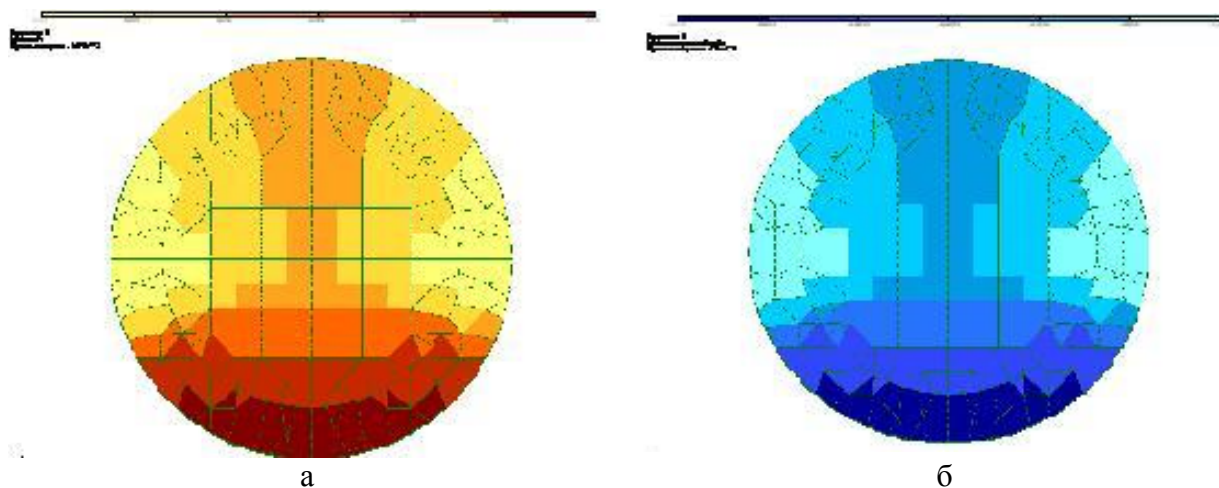


Рис. 4. Результаты расчета задачи взаимодействия фундамента и грунтового основания: а – распределение давления под подошвой фундамента P_z , МН/м²;

б – распределение отпора грунта R_z , кН/см²

Полученные значения коэффициентов постели C_1 и C_2 (рис. 5) назначаются элементам фундаментной плиты и в ходе дальнейшего расчета позволяют моделировать совместную работу ствола вентиляционной трубы и основания.

2. Моделирование трехмерного грунтового массива из объемных конечных элементов с расчетом в линейной постановке. Расчетная модель вентиляционной трубы – такая же, как и в предыдущем случае. К расчетной модели фундамента и ствола вентиляционной трубы

подключается трехмерный грунтовый массив, созданный при помощи автоматической триангуляции и назначением физико-механических характеристик конечных элементов в системе Грунт, ПК ЛИРА по данным инженерно-геологических изысканий. Трехмерный грунтовый массив

выполнен из объемных КЭ, размеры в плане 46×46 м, высотой – 16 м. Граничные условия заданы таким образом, чтобы вертикальные перемещения по z нижней грани и перемещения по x и y боковых граней грунтового массива были равны нулю.

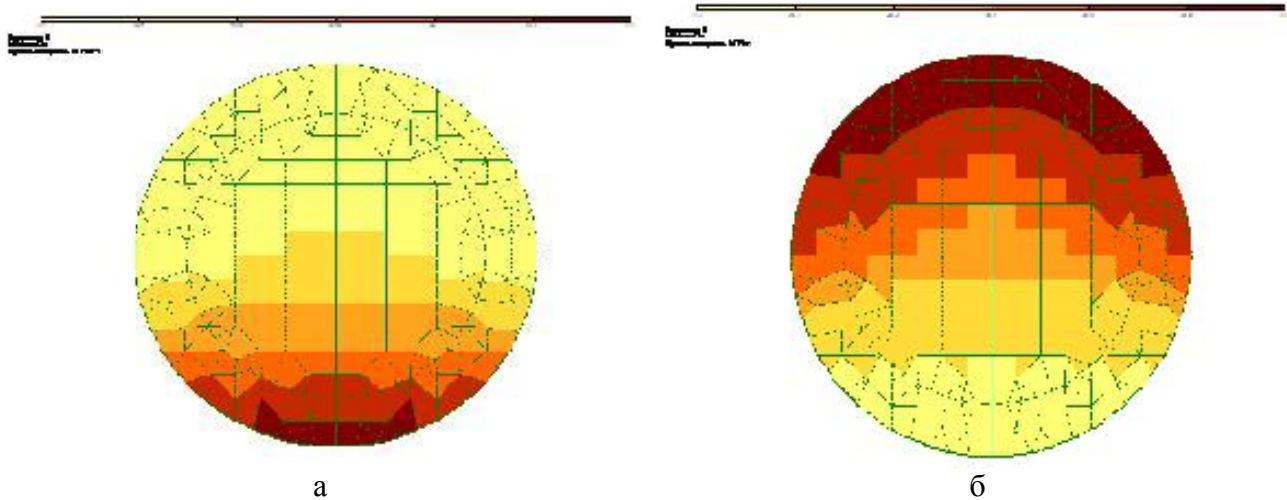


Рис. 5. Результаты расчета коэффициентов постели $C1$ (MN/m^3), $C2$ (MN/m) по подошве фундамента венттрубы: а – распределение $C1$, б – распределение $C2$

Нагрузка принята равномерно распределенной от собственного веса конструкций фундамента и ствола

вентиляционной трубы. Расчетная модель венттрубы и трехмерного грунтового массива основания приведена на рис. 6.

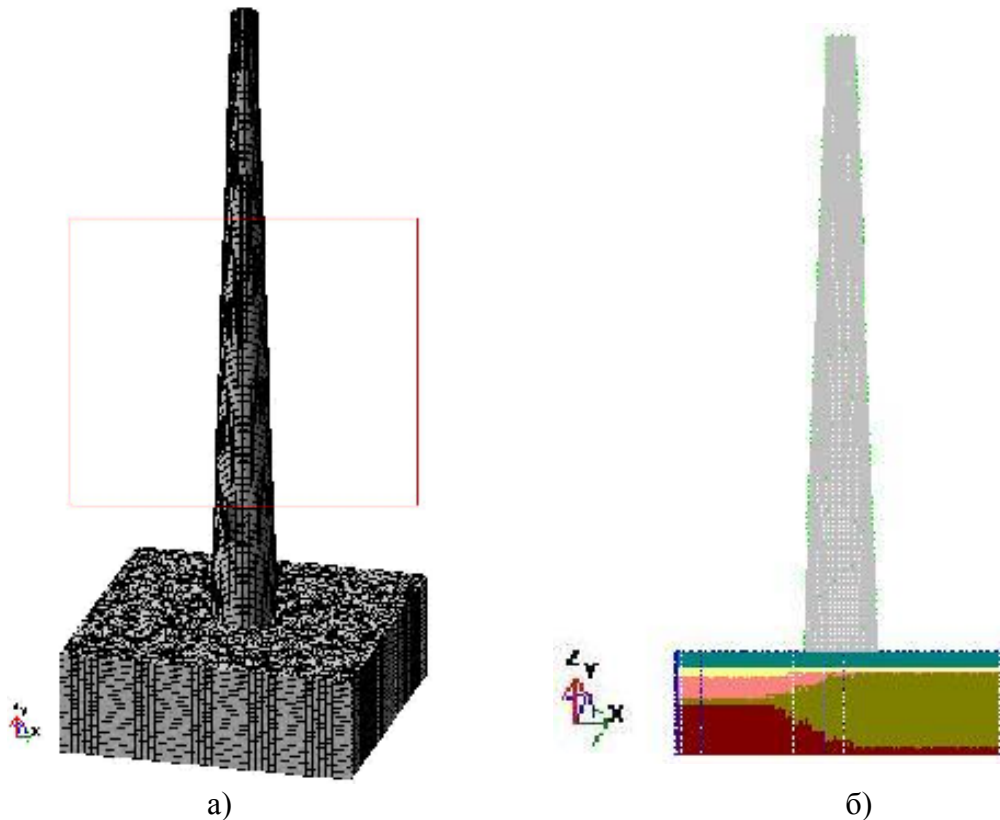


Рис. 6. Расчетная модель вентиляционной трубы и трехмерного грунтового массива основания: а – аксонометрическая схема модели ствола вентиляционной трубы и трехмерного грунтового массива; б – конечно-элементная модель вентиляционной трубы и трехмерного грунтового массива

3. Моделирование трехмерного грунтового массива из объемных физически нелинейных конечных элементов для моделирования односторонней работы грунта на сжатие с учетом сдвига. Расчетная модель вентиляционной трубы – та же. К расчетной модели фундамента и ствола вентиляционной трубы подключен трехмерный грунтовой массив, выполненный из объемных физически нелинейных КЭ для моделирования односторонней работы грунта на сжатие с учетом сдвига.

Для объемных КЭ грунта, задаются следующие характеристики: E – модуль

$$\sin(\varphi) \cdot \sigma_0 + \sigma_i \left(\sqrt{3} \cdot \cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot \sin(\varphi) \right) - 3C \cdot \cos(\varphi) \leq 0 \quad (5)$$

где:

$$\sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3; \quad (6)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (7)$$

$$\psi = \frac{1}{3} \arcsin \left(\frac{27J_3}{2\sigma_i^3} \right); \quad J_3 = (\sigma_1 - \sigma_0)(\sigma_2 - \sigma_0)(\sigma_3 - \sigma_0). \quad (8-9)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Граничные условия и размеры грунтового массива заданы таким же образом, как и в варианте 2.

Расчет системы «нелинейно-деформируемое основание – линейно-деформируемые конструкции» выполнялся в нелинейной постановке с учетом процесса монтажа и разработки котлована и учетом модуля деформации грунта по ветви вторичного нагружения (учет разгрузки модели грунта) в три стадии:

- стадия 1 – монтаж объемных КЭ массива грунтового основания;
- стадия 2 – демонтаж объемных КЭ грунта котлована, обнуление перемещений от предыдущего нагружения;
- стадия 3 – монтаж КЭ фундамента и ствола вентиляционной трубы, обнуление перемещений от предыдущего нагружения.

деформации грунта по ветви первичного нагружения, ν – коэффициент Пуассона, k_e – коэффициент перехода к модулю деформации грунта по ветви вторичного нагружения $E_e = k_e \cdot E$, C – сцепление, R_t – предельное напряжение при растяжении, φ – угол внутреннего трения в градусах, при этом $\varphi < 90^\circ$, $C \geq R_t \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$, σ_p – предельное напряжение сжатия. Таким образом, реализуется упругопластическая модель грунта, критерием прочности которой выбрано условие Кулона-Мора:

Иллюстрация стадий построения конечно-элементной схемы системы приведена на рис. 7.

В результате расчетов, выполненных по трем различным конечно-элементным моделям, определено напряженно-деформированное состояние системы «венттруба – фундамент – грунтовой массив».

В качестве критериев для сопоставления результатов численного моделирования и натурных исследований приняты параметры: крен фундамента, крен ствола вентиляционной трубы, а также значение средней осадки фундамента. Средняя осадка вычислена согласно Д.11 [3] по формуле, которая базируется на решениях линейно-деформируемого полупространства, и составляет 2,45 см.

Приняты следующие обозначения: модель 1 – модель многослойного основания

с коэффициентами постели С1, С2; модель 2 – трехмерный грунтовой массив из объемных КЭ; модель 3 – трехмерный грунтовой массив из физически нелинейных объемных КЭ.

Изополя вертикальных перемещений фундаментной плиты для различных расчетных моделей приведены на рис. 8. Результаты расчета крена фундамента представлены в табл. 2.

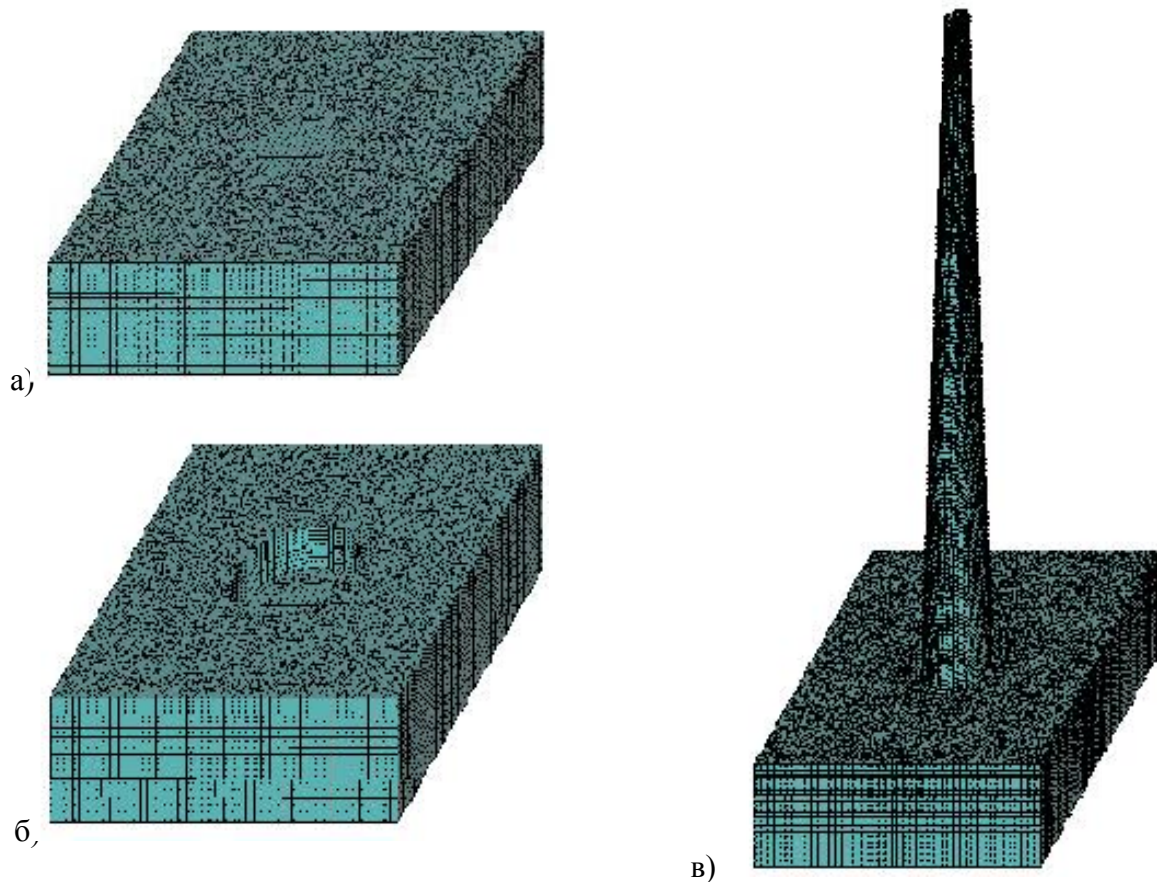


Рис. 7. Аксонометрические схемы стадий монтажа элементов модели
а – стадия 1; б – стадия 2; в – стадия 3

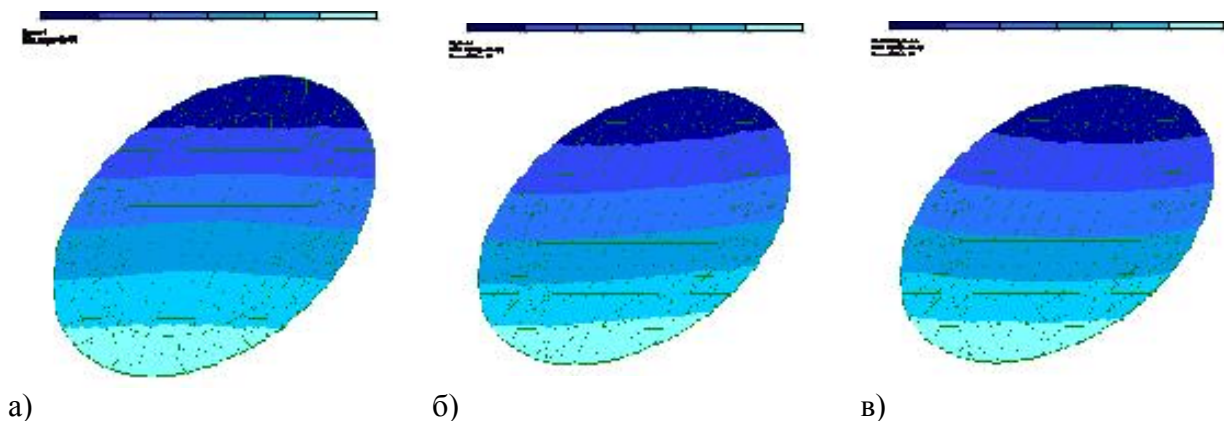


Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений: а – модель 1; б – модель 2;
в – модель 3

Таблица 2

Результаты расчета крена фундамента

Критерии / модели	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Осадка марки 11, см	2,84	3,85	3,31
Осадка марки 13, см	1,08	1,86	1,51
Крен	0,00110	0,00124	0,00113

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Средняя осадка, см	1,96	2,86	2,41
--------------------	------	------	------

Изополя горизонтальных перемещений рис. 9, результаты расчета крена ствола верхнего обреза трубы приведены на трубы - табл. 3.

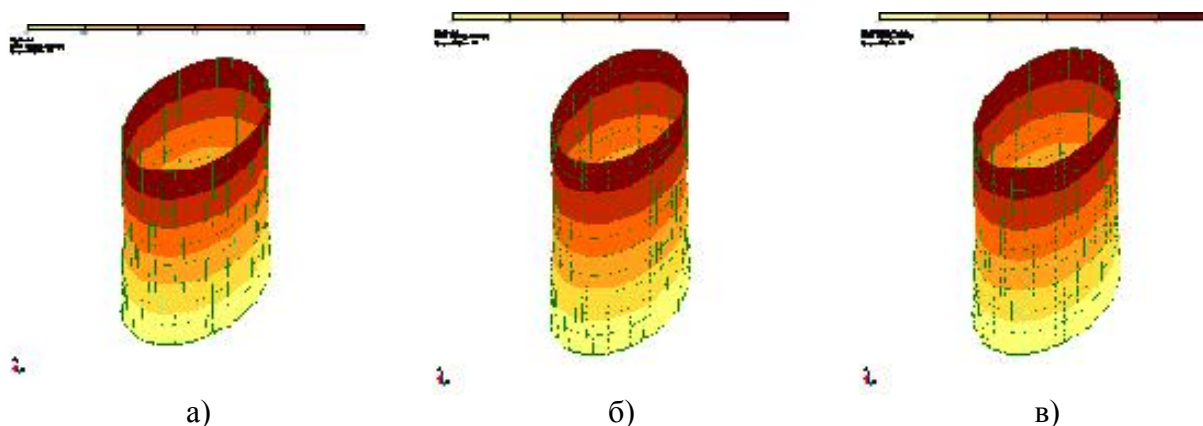


Рис. 9. Изополя горизонтальных перемещений верхнего обреза венттрубы:
а – модель 1; б – модель 2; в – модель 3

Таблица 3

Результаты расчета крена ствола трубы

Критерии / модели	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Геодез. съемка
Перемещение, см	11,2	13,0	11,8	11,7
Крен	0,00112	0,00130	0,00118	0,00117

График распределения горизонтальных перемещений по высоте трубы приведен на рис. 10.

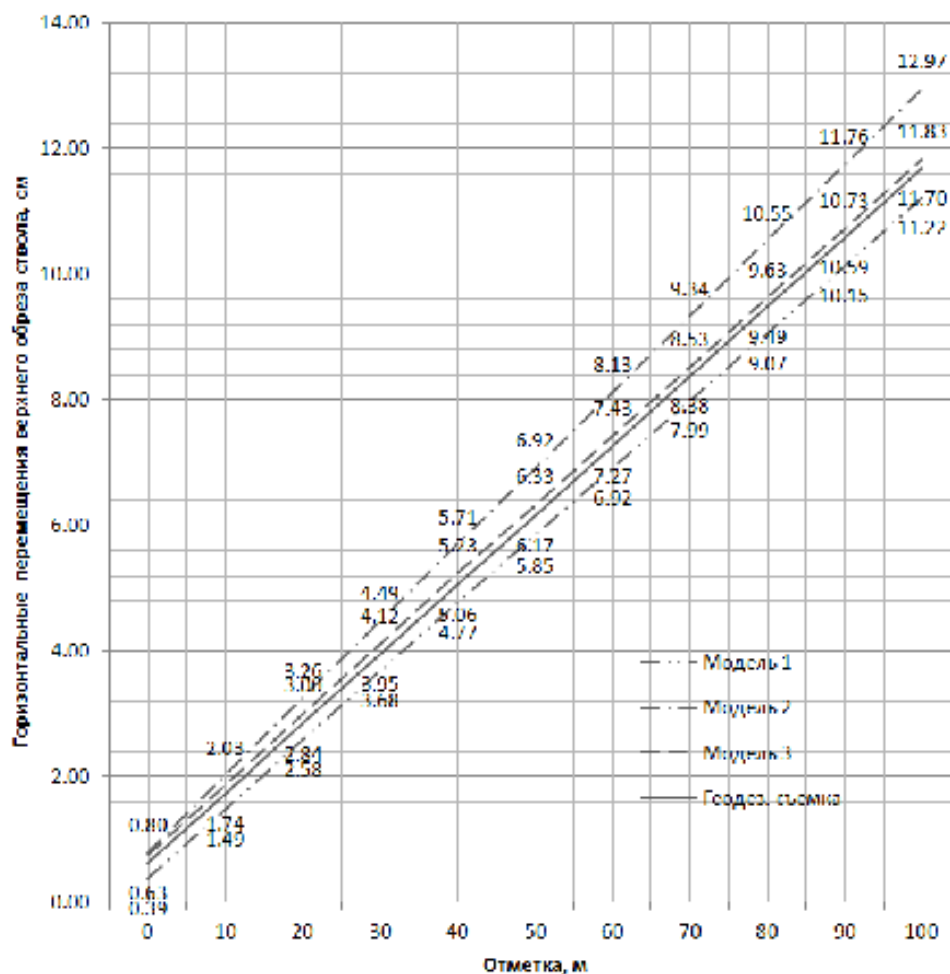


Рис. 10. График распределения горизонтальных перемещений по высоте трубы

Результаты исследования.

Расхождение в результатах между данными геодезической съемки и исследуемыми моделями составило: по сравнению с моделью 1 – 4,3%, по сравнению с моделью 2 – 11,1%, по сравнению с моделью 3 – 0,9%. Сопоставляя результаты расчетов трех моделей и результаты исполнительной геодезической съемки, видно, что наиболее достоверной является численная модель из объемных физически нелинейных КЭ.

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении:

1. Предложены подходы численного моделирования взаимодействия системы «вентруба – фундамент – основание»

различной степени сложности, точности и трудозатратности.

2. Выполнено сравнение численных моделей с результатами геодезических наблюдений, которое показывает, что все модели обладают достаточной степенью достоверности. Однако наиболее точной является модель с трехмерным грунтовым массивом из физически нелинейных объемных КЭ, при которой сходимость результатов составляет 0,9%.

3. При моделировании сооружений, имеющих небольшую площадь опирания на основание, необходимым условием является максимально точная информация об инженерно-геологическом строении грунтов участка расположения сооружения.

Список использованных источников

1. ВСН 286-72. Указания по расчету железобетонных дымовых труб. - М. : Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР, 1972. - 27 с.
2. ВСН 286-90. Указания по расчету железобетонных дымовых труб. - М. : Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР, 1990. - 73 с.

3. ДБН В.2.1-10:2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування - К. : Мінрегіонбуд України, 2009. - 104 с.
4. Банах В. А. Развитие статико-динамических расчетных моделей зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Днепропетровск, 2013. – 40 с.
5. Зоценко, Н.Л. Современная практика моделирования взаимодействия фундаментов с уплотненными основаниями при их возведении и последующей работе // Н.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. статей науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 164 – 171.
6. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
7. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів / К., 2008. – 16 с.
8. Улицкий В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин – СПб.: «Стройиздат Северо-Запад», Группа компаний «Геореконструкция», 2010. – 551 с.
9. Vynnykov, Y. The Use of Reserves of Bearing Capacity of Base and Foundations During Reconstruction of Buildings / Y. Vynnykov, N. Zotsenko, A. Yakovlev // Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering. – Proc. of Intern. Geotechnical Conf. Dedicated to Tercentenary of Saint Petersburg – SPtb. – М.: ASV Publishers, 2003. – Vol. 1. – P. 367 – 370.
10. Кичаева О.В. Моделирование зданий, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях, при статических и динамических воздействиях / О.В. Кичаева. – Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: зб. наук. праць. – Рівне, вип. 28, - 2014. – С. 376 – 386.
11. СО 153-34.21.322-2003. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций, М.: Минэнерго РФ, 2005 г. – 61 с.
12. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. Мінрегіонбуд України, 2010. - 49 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Шмуклер В.С.

Кичаева Оксана Владимировна, доцент, кандидат технических наук заведующий кафедрой механики грунтов, фундаментов и инженерной геологии Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетові, 61002, г. Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17, Тел. (057) 707-31-12, E-mail: o_kichaeva@mail.ru

Перепелица Екатерина Александровна аспирант очного отделения кафедры строительной механики, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, 61002, г. Харьков, ул. Сумская, 40, Тел. (057) 706-20-63, E-mail: ekaterina-perepelica@mail.ru

Oksana Vladimirovna Kichaeva Associate Professor, Ph.D., Head of the Dept. of Soil mechanics, foundation and engineering geology, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 61002, Kharkiv, str. Marshala Bazhanova, 17, Phone: (057) 707-31-12, E-mail: o_kichaeva@mail.ru

Perepelitsa Ekaterina Aleksandrovna, Student full-time chair of structural mechanics, Kharkiv National University of Construction and Architecture, 61002, Kharkiv, str. Sumskaya, 40, Phone: (057) 706-20-63, E-mail: ekaterina-perepelica@mail.ru

Стаття прийнята 23.06.2015 р