

Строитель Донбасса. 2025. Выпуск 1-2025. С. 28-35. ISSN 2617–1848 (print)
The Builder of Donbass. 2025. Issue 1-2025. P. 28-35. ISSN 2617–1848 (print)

Научная статья

УДК 697.8

doi: 10.71536/sd.2025.1c30.4

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОБОЛОЧКИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Екатерина Олеговна Брыжатая¹

¹Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

¹e.o.bryzhataya@donnasa.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению напряженно-деформированного состояния оболочки дымовой трубы при исправлении крена с применением различных типов регулируемых фундаментов. Разработана конечно-элементная модель дымовой трубы высотой 100 метров с конструктивными мерами защиты от влияния сверхнормативных кренов, которые учитывают взаимодействие сооружения с деформируемым основанием и регулируемыми фундаментами. Рассматриваются схемы опускания менее просевших частей дымовой трубы с применением регулирующего устройства по типу «песочница» и поднятия наиболее просевших частей дымовой трубы с помощью домкратов. По результатам расчета были получены значения деформаций (горизонтальных и вертикальных смещений ствола) как при штатной работе от воздействия основных сочетаний нагрузок, так и с учетом особого воздействия (крена, обусловленного переменным коэффициентом жесткости основания) и при выравнивании геометрического положения дымовой трубы в пространстве с помощью «песочниц» и домкратных систем.

Ключевые слова: дымовая труба, напряженно-деформированное состояние, неравномерная осадка основания, крен, коэффициент жесткости основания, «песочница», домкратная система

Original article

STRESS-STRAIN STATE OF CHIMNEY SHELL STRUCTURES WHEN ADJUSTING THE VERTICAL POSITION

Ekaterina O. Bryzhataya¹

¹Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka,
Russia, ¹e.o.bryzhataya@donnasa.ru



Брыжатая
Екатерина Олеговна

Abstract. The article is devoted to the research of the chimney shell's stress-strain state, when correcting the tilt using various types of adjustable foundations. A finite element model of a 100-meter-high chimney with design measures to protect against the influence of excessive tilts has been developed, which take into account the interaction of the structure with the deformable base and adjustable foundations. Schemes for lowering the less subsided parts of the chimney using a «sandbox» type adjustment device and raising the most subsided parts of the chimney using jacks are considered.

Based on the calculation results, the values of deformations (horizontal and vertical displacements of the shaft) were obtained, both during normal operation from the impact of the main combinations of loads, and taking into account the special impact (tilt caused by the variable stiffness coefficient of the foundation) and when leveling the geometric position of the chimney in space using sandboxes and jack systems.

Keywords: chimney, stress-strain state, uneven settlement of the foundation, tilt, stiffness coefficient of the foundation, sandbox, jack system

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сверхнормативные осадки, возникающие у сооружений на всех этапах эксплуатации, требуют улучшения существующих и разработки новых конструктивных решений сооружений и изучения их напряженно-деформированного состояния при появлении крена, а также необходимость их апробирования экспериментально-теоретическими исследованиями на пространственных моделях.

Для дымовых труб нежелательно исправлять даже незначительный крен натяжением оттяжек. Следует провести обследование для определения причин возникновения крена, провести мероприятия по их устранению и только после этого проводится укрепление несущих конструкций ствола.

Для укрепления основания дымовой трубы производится цементация, силикатизация и смолизация грунта специальными составами. При деформации основания вследствие подтопления грунтовыми водами необходимо осуществить дренаж основания.

Также выравнивание дымовых труб осуществляется пригрузкой фундамента со стороны противоположной крену. Возможна частичная выемка грунта или его регулируемое замачивание инъекционным способом через шпуры.

С учетом определенных конструктивных характеристик дымовой трубы, которые позволяют поднимать ее часть с помощью домкрата, под эту часть трубы укладывают подливочный слой. Изгиб ствола трубы, который возник вследствие деформации, можно устранить поддомкрачиванием, проделав внутренние отверстия в кладке со стороны изгиба. Выровненную домкратами кладку восстанавливают и укрепляют, а домкраты демонтируют [5].

Широкое применение конструкций регулируемых фундаментов в практике строительства сдерживает почти полное отсутствие каких-либо исследований в области эффективности применяемых конструкций регулируемых фундаментов экспериментального строительства в этой области. Это обусловлено недостаточной экспериментальной базой в области выравнивания зданий и сооружений, необходимостью совершенствовать технологии устройства, методики расчета и проектирования регулируемых фундаментов. Необходимо проведение комплексных исследований, ориентированных на совершенствование конструкций регулируемых фундаментов и технологий по их устройству [6].

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния оболочки дымовой трубы высотой 100 метров при регулировании геометрического положения в пространстве при помощи различных регулирующих устройств.

Объектом исследования является промышленная дымовая труба высотой 100 м. Фундамент – плита круглой формы, выполнена из монолитного железобетона. Диаметр подошвы фундамента – 20 м. Глубина заложения подошвы – 3,65 м. Толщина средней части плиты – 2,3 м. Марка бетона плиты и стакана M140.

Приняты следующие виды загружений:

1. Постоянные нагрузки, которые включают в себя собственный вес конструкций оболочки дымовой трубы: железобетонный ствол, кирпичная кладка, футеровка, лестницы, технологические площадки.

2. Статическая ветровая нагрузка.

3. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки

4. Температурные нагрузки, которые реализуют выравнивающие свойства рассматриваемых регулирующих устройств («песочница» и домкратов).

Фундаментная плита и оболочка ствола моделировались пластинчатыми конечными элементами. Обрамление проемов для газоходов и железобетонные консоли – конечными элементами в виде стержней.

Целью вычисления напряженно-деформированного состояния оболочки ствола железобетонной дымовой трубы высотой 100 метров является определение несущей способности ствола. При этом рассматривается вариант, при котором промышленная дымовая труба получает сверхнормативный крен и при регулировании положения трубы в пространстве до допустимого нормами крена с помощью регулирующих устройств по типу «домкрат» и «песочница».

Для моделирования крена фундамента дымовой трубы был рассчитан коэффициент жесткости основания и задан на часть фундаментной плиты дымовой трубы.

На рисунке 1-2 приведены изополя перемещений фундаментной плиты по оси Z и дымовой трубы по оси X при постоянном и переменном коэффициенте жесткости.

При переменном коэффициенте жесткости основания абсолютный крен дымовой трубы на отметке +100.000 составляет 1370 мм, что превышает предельно допустимое значение, которое составляет 650 мм согласно пункту 5.7 СП 13-101-99 «Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб».

Конструкции фундаментов с изменяемыми в процессе расчета размерами реализуются в ПК Лира с помощью температурного воздействия, которое используется для моделирования процесса выравнивания здания методом опускания его менее просевших частей и поднятием наиболее просевших частей.

Устройство «песочница» в ПК Лира моделируется с использованием стержневого конечного элемента с жесткостью трубы, профиль 420×65 мм. В процессе истечения рабочего тела (песка) из устройства его высота уменьшается. Уменьшение высоты устройства в расчетах в ПК Лира учитывает как температурная деформация, задаваемая в статически определимой основной системе [2].

Домкратная система моделируется в ПК Лира двумя элементами: железобетонным подколонником с сечением 60×60 см и железобетонным домкратным узлом с сечением 70×70 см [1].

Исследована технологическая схема выравнивания геометрического положения дымовой трубы

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

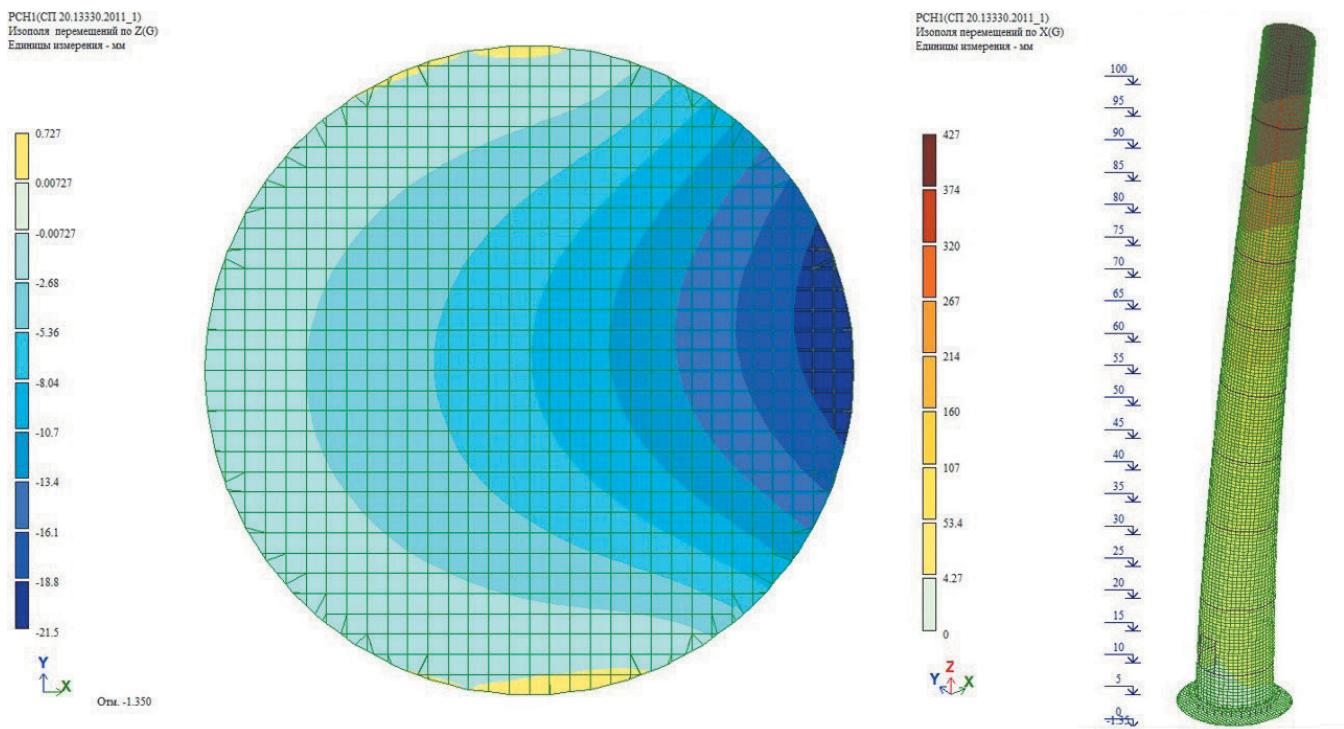


Рис.1. Изополя перемещений фундаментной плиты по оси Z и дымовой трубы по оси X при постоянном коэффициенте жесткости

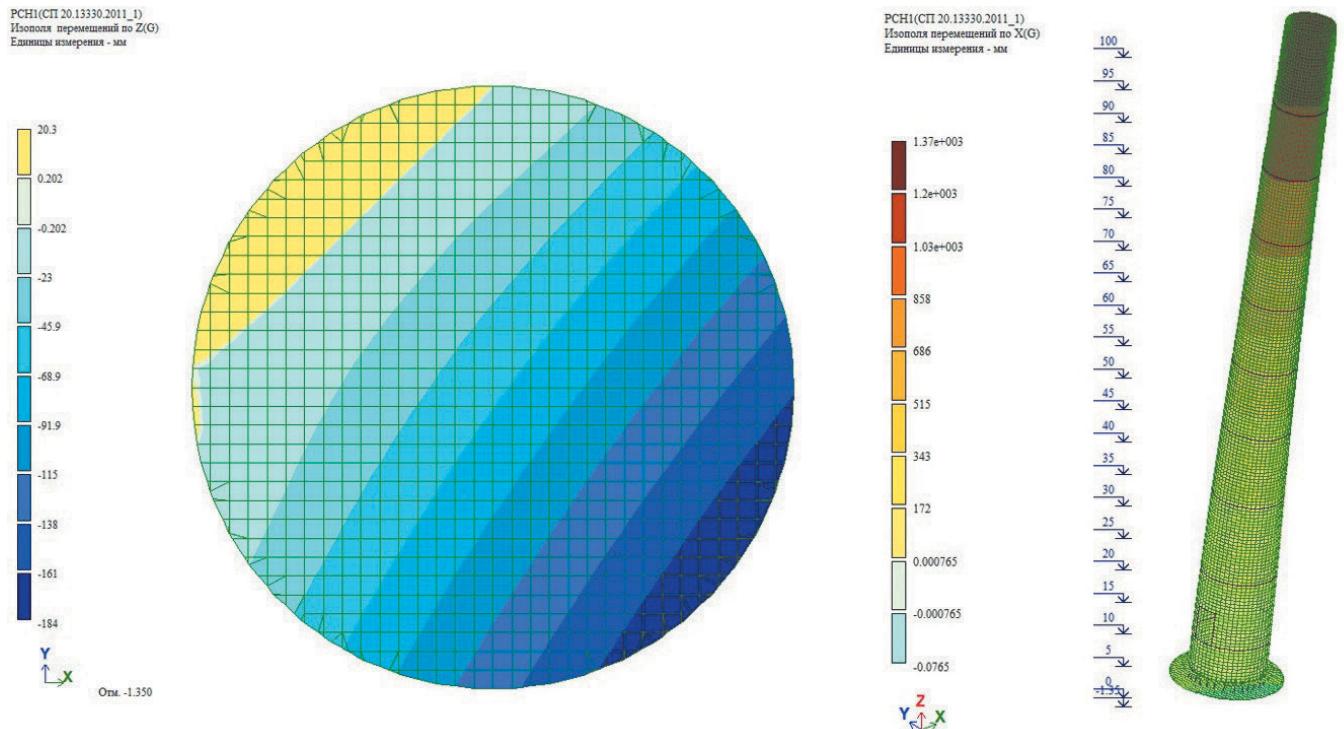
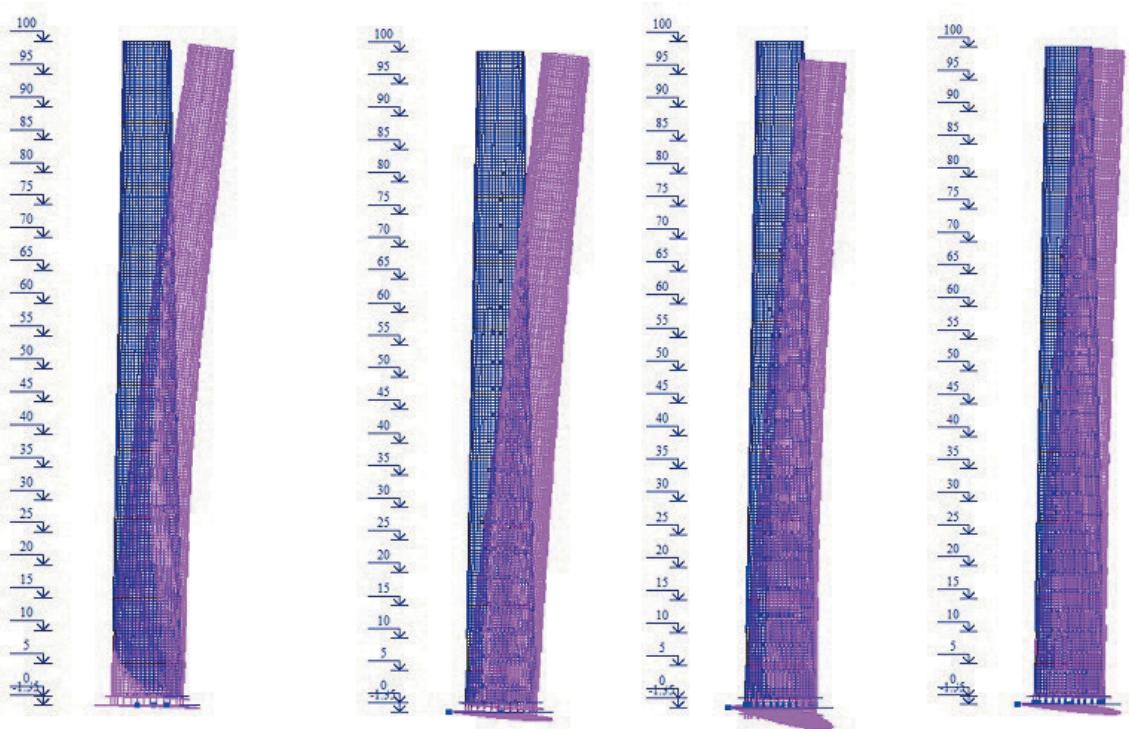


Рис.2 . Изополя перемещений фундаментной плиты по оси Z и дымовой трубы по оси X при переменном коэффициенте жесткости

путем опускания ее менее просевших частей с помощью регулирующих устройств по типу «песочница» и с помощью регулирующих домкратных устройств (рис. 3)

По результатам расчета были получены значения деформаций (горизонтальных и вертикальных смещений ствола) как при штатной работе от воздей-

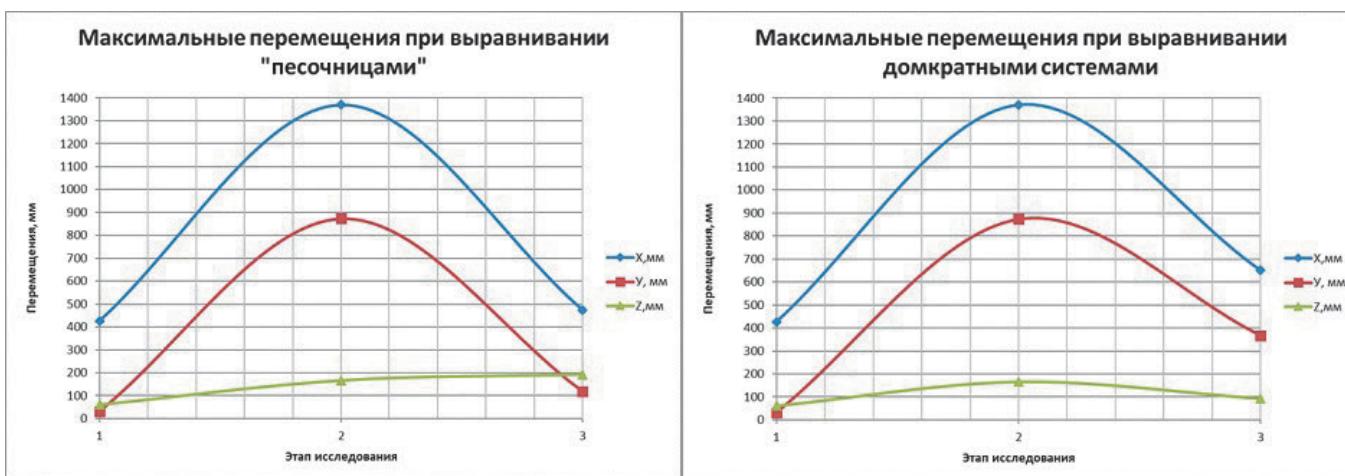
ствия основных сочетаний нагрузок, так и с учетом особого воздействия (крена, обусловленного переменным коэффициентом жесткости) и при выравнивании геометрического положения дымовой трубы в пространстве с помощью «песочниц» и домкратных систем. Результаты сведены в таблицу 1 и представлены на графиках (рис. 4).



*Рис. 3.
Исходная и
деформированная
схема дымовой
трубы:
а) при штатной
работе дымовой
трубы
б) при крене
дымовой трубы
1370 мм,
в) при методе
опускания
наименее
просевших частей
песочницами;
г) при методе
подъема наиболее
просевших частей
дымовой трубы
домкратами*

Таблица 1.
Максимальные перемещения на этапах исследования

	X,мм	Y,мм	Z,мм
Штатная работы дымовой трубы	426 (100%)	31.1 (100%)	61 (100%)
Крен 1370 мм	1370 (322%)	873 (2816%)	166 (272%)
Выравнивание геометрического положения с устройством «песочница»	473 (121%)	118 (381%)	192 (619%)
Выравнивание геометрического положения домкратными системами	650 (153%)	367 (1184%)	181 (297%)



*Рис. 4. Максимальные перемещения при регулировании вертикального положения дымовой трубы
с помощью выравнивающих устройств-«песочница» и домкратных систем*

По результатам расчета пространственной конечно-элементной модели ствола оболочки трубы были получены расчетные значения продольных напряжений N_y и изгибающие моменты при расчетных сочетаниях усилий M_x (рис. 5-8) и сведены в табли-

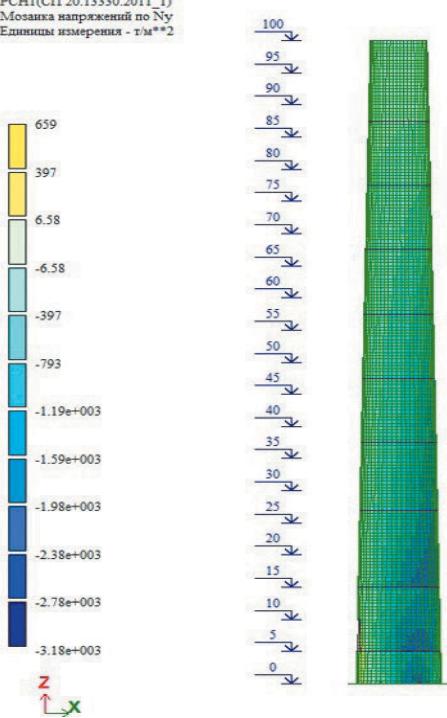
цу 2 и построены графики максимальных значений усилий, возникающих на 3 этапах исследования: при штатной работе дымовой трубы, при крене ствола 1370 мм, при выравнивании «песочницами», при выравнивании домкратами (рис. 9).

Таблица 2 .

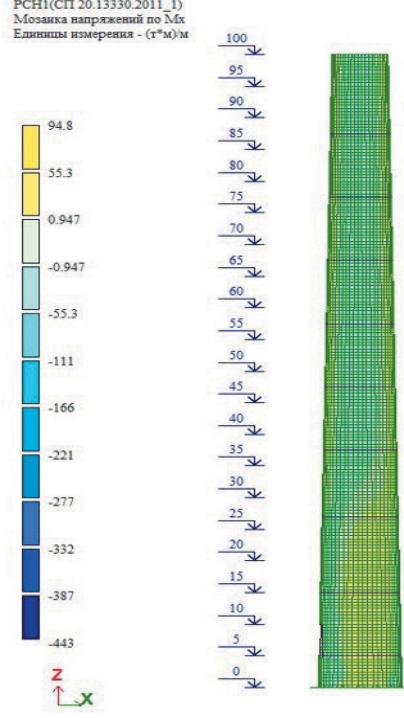
Максимальные расчётные значения усилий, возникающие в оболочке дымовой трубы

Этап исследования	Максимальные значения усилий	
	$N_y, \text{Н/м}^2$	$M_x, \text{Нм/м}$
Штатная работа дымовой трубы	-3180 (100%)	-443 (100%)
Крен 1370 мм	-4170 (131%)	-782 (176%)
Выравнивание геометрического положения с помощью «песочниц»	-4000 (125%)	-470 (106%)
Выравнивание геометрического положения с помощью домкратных систем	-3820 (120%)	629 (142%)

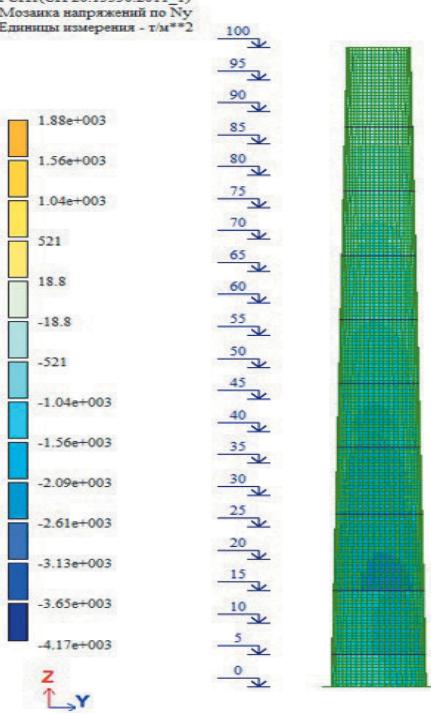
PCH1(СП 20.13330.2011_1)
Мозаика напряжений по N_y
Единицы измерения - Н/м^{*2}



PCH1(СП 20.13330.2011_1)
Мозаика напряжений по M_x
Единицы измерения - $(\text{Нм})/\text{м}$



PCH1(СП 20.13330.2011_1)
Мозаика напряжений по N_y
Единицы измерения - Н/м^{*2}



PCH1(СП 20.13330.2011_1)
Мозаика напряжений по M_x
Единицы измерения - $(\text{Нм})/\text{м}$

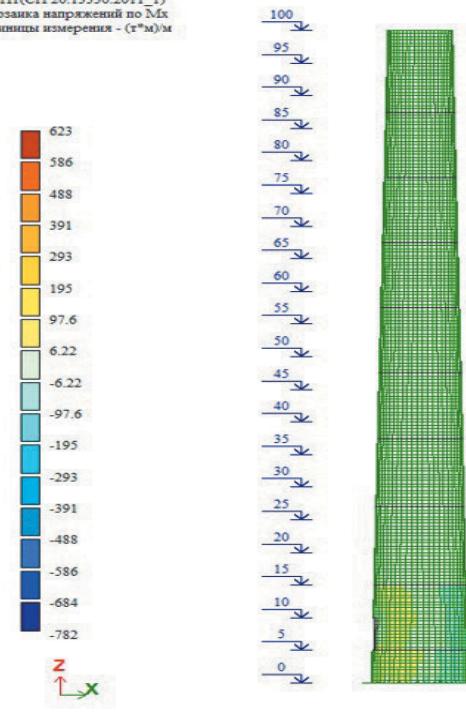


Рис. 5. Расчетные значения продольных напряжений N_y и изгибающих моментов M_x в ПК Лира при штатной работе дымовой трубы

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

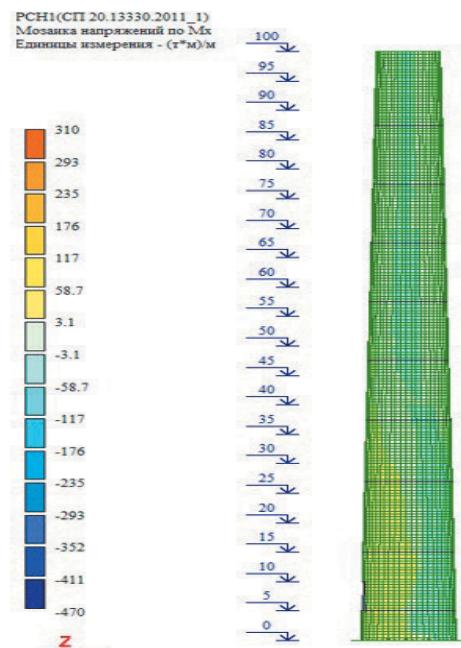
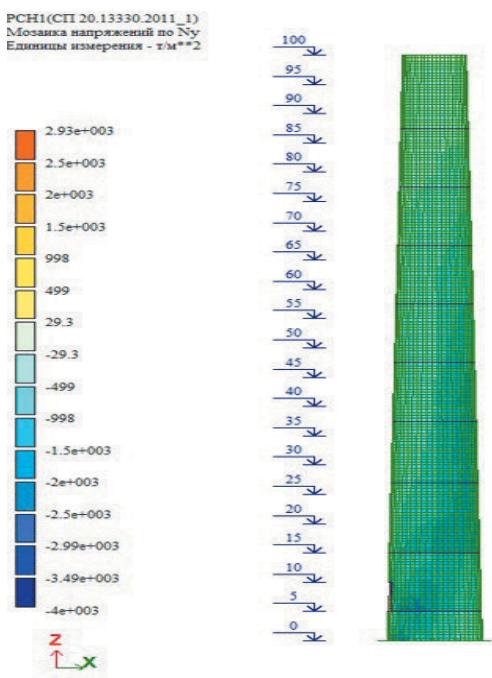


Рис. 7. Расчетные значения продольных напряжений N_y и изгибающих моментов M_x в ПК Лира при выравнивании геометрического положения дымовой трубы при помощи «песочниц»

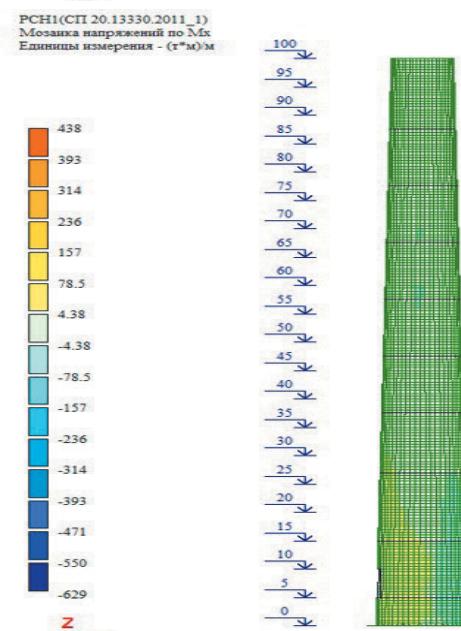
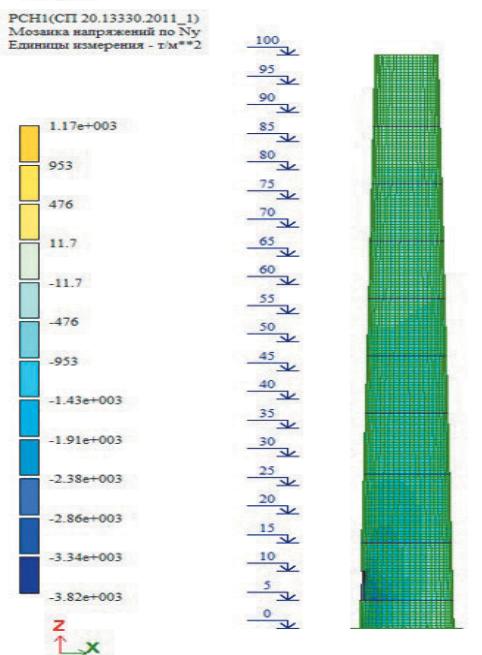


Рис. 8. Расчетные значения изгибающих моментов N_y и изгибающих моментов M_x в ПК Лира при выравнивании геометрического положения дымовой трубы с помощью домкратных систем

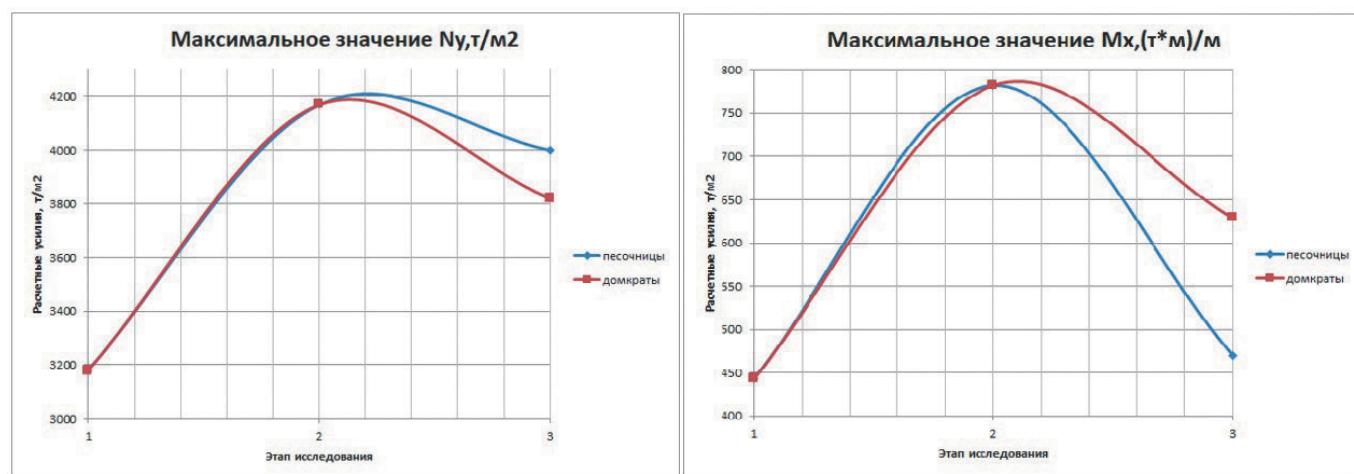


Рис. 9. График максимальных значений N_y и M_x в ПК Лира на 3 этапах исследования при регулировании вертикального положения дымовой трубы

ВЫВОДЫ

При выравнивании дымовой трубы с помощью «песочниц», максимальная продольная сила N_y уменьшилась на 6 %, максимальный изгибающий момент M_x уменьшился на 70 %. Абсолютный крен ствола дымовой трубы уменьшился на 201 % с 1370 мм до 473 мм. При выравнивании дымовой трубы с помощью домкратных систем наблюдается уменьшение усилий: продольных напряжений N_y на 11 %, изгибающего момента M_x на 34 %. Абсолютный крен ствола дымовой трубы уменьшился на 169 % с 1370 мм до 650 мм. Разница между усилиями в конструкциях оболочки ствола дымовой трубы, полученная при выравнивании сооружения с помощью «песочниц» и домкратов, в среднем, составляет 10 %. Следовательно, работа обоих устройств при максимальном поднятии и опускании на 135 мм приводит к уменьшению усилий, что, в свою очередь, положительно влияет на НДС элементов ствола дымовой трубы на плитном фундаменте.

Список литературы

1. Зотов, А. М. Регулируемые фундаменты каркасных зданий. Конструкция, технология и расчет при подъеме и выравнивании : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения», 05.23.08 «Технология и организация строительства» / А. М. Зотов; Ростовский государственный строительный университет. — Ростов-на-Дону, 2013. — 166 с.
2. Брыжатая, Е. О. Конструкции с изменяемыми параметрами для исправления кренов сооружений : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Е. О. Брыжатая; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. — Макеевка, 2017. — 157 с.
3. Яркин, В. В. Влияние очередности этапов реконструкции на напряженно-деформированное состояние конструкций здания на подрабатываемой территории / В. В. Яркин, Е. О. Брыжатая, А. В. Кухарь [и др.] // Строитель Донбасса. — 2021. — Выпуск 2-2021. — С. 9–14. — ISSN 2617-1848.
4. Брыжатая, Е. О. Регулирование напряженно-деформированного состояния конструкций многоэтажного каркасного здания на плитном фундаменте / Е. О. Брыжатая, О. Э. Брыжатый, Н. С. Масло // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и конструкции с использованием новых материалов и технологий. — Макеевка, 2021. — Вып. 2021-3(149). — С. 80–88.
5. Болотов, Ю. К. О проектировании бескаркасных зданий на просадочных грунтах, приспособленных к выравниванию домкратными системами / Ю. К. Болотов, Ю. П. Шумовский // Проблемы защиты, строительства зданий и сооружений на просадочных грунтах. — Киев: НИИСК, 1987. — С. 115–117.

6. Гусаренко, С. П. Регулируемые фундаменты / С. П. Гусаренко, М. Г. Скибин, А. М. Зотов // Вестник гражданских инженеров. — 2009. — № 2(19). — С. 139–141.
7. Abelev M. Yu. Leveling the tilts of tenement building founded on loess soils prone to slump-type settlement by regular wetting / M. Yu. Abelev, V. I. Krutov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2000. — Vol. 37, № 5. — P. 164–185.
8. Bolotov U. Calculations and protection of buildings against mining subsidence / U. Bolotov, J. Slobodyan, V. Zотов // Budownictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice, Zeszyty Naukowe. — 1995. — № 2. — P. 15–19.
9. Ulitskii V. M. Geotechnical problems associated with the constructions of high-rise buildings. Foreign experience and domestic practice / V. M. Ulitskii, A. G. Shashkin, K. G. Shashkin // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2003. — Vol. 40, № 5. — P. 121–132.
10. Imanzadeh S. Foundation and overall structure designs of continuous spread footings along with soil spatial variability and geological anomaly / S. Imanzadeh, A. Denis, A. Marache // Engineering Structures. — 2014. — № 71. — P. 212–221.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Брыжатая Екатерина Олеговна — кандидат технических наук, доцент кафедры оснований, фундаментов и подземных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: влияние расчетных моделей грунтового основания на напряженно-деформированное состояние каркасных зданий.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bryzhataya Ekaterina O. — Ph. D. (Eng), Associate Professor of the Department of Substructures, foundations and underground structures, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Research interests: the influence of calculation models of the soil foundation on the stress-strain state of frame buildings.

References

1. Zotov A. M. (2013). Regulated Foundations for Frame Buildings. Design, Technology and Calculation during Lifting and Leveling . Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building Structures, Buildings and Constructions», 05.23.08 «Technology and Organization of Construction». Rostov-on-Don: Rostov State Construction University. 166 pp.
2. Bryzhataya E. O. (2017). Structures with Variable Parameters for Correction of Tilted Constructions . Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building Structures, Buildings and Constructions». Makeevka: Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. 157 pp.
3. Yarkin V. V., Bryzhataya E. O., Kukhar A. V., et al. (2021). Influence of Reconstruction Stages on the Stress-Strain State of Building Structures on a Subsiding Territory . Builder of Donbass, Issue 2-2021, pp. 9–14. ISSN 2617-1848.

4. Bryzhataya E. O., Bryzhatyi O. E., Maslo N. S. (2021). *Regulation of the Stress-Strain State of Multi-Storey Frame Building Structures on a Slab Foundation*. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Buildings and Structures with Use of New Materials and Technologies*, Issue 2021-3(149), pp. 80–88.
5. Bolotov Y. K., Shumovsky Y. P. (1987). *Design of Non-Frame Buildings on Swelling Soils Adapted for Leveling by Jacking Systems*. *Problems of Protection, Construction of Buildings and Structures on Swelling Soils*. Kyiv: NIISK, pp. 115–117.
6. Gusarenko S. P., Skibin M. G., Zotov A. M. (2009). *Regulated Foundations*. *Bulletin of Civil Engineers*, No. 2(19), pp. 139–141.
7. Abelev M. Yu., Krutov V. I. (2000). *Leveling the Tilts of Tenement Buildings Founded on Loess Soils Prone to Slump-Type Settlement by Regular Wetting*. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 164–185.
8. Bolotov U., Slobodyan J., Zotov V. (1995). *Calculations and Protection of Buildings against Mining Subsidence*. *Budownictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice, Zeszyty Naukowe*, No. 2, pp. 15–19.
9. Ulitskii V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G. (2003). *Geotechnical Problems Associated with the Construction of High-Rise Buildings. Foreign Experience and Domestic Practice*. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 40, No. 5, pp. 121–132.
10. Imanzadeh S., Denis A., Marache A. (2014). *Foundation and Overall Structure Designs of Continuous Spread Footings Along with Soil Spatial Variability and Geological Anomaly*. *Engineering Structures*, No. 71, pp. 212–221.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена после рецензирования 14.02.2025; принята к публикации 21.02.2025.

The article was submitted 04.02.2025; approved after reviewing 14.02.2025; accepted for publication 21.02.2025.