

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНОГО БАШЕННОГО КОПРА ПРИ МОНТАЖЕ МЕТОДОМ НАДВИЖКИ

А.А. ТОЧЕНАЯ¹

А.М. ЮГОВ¹

С.О. ТИТКОВ¹, канд. техн. наук

А.В. ТАНАСОГЛО², канд. техн. наук

И.М. ГАРАНЖА^{2,✉}, канд. техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ДонНАСА), ул. Державина, д. 2, г. Макеевка, 286123, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Укосные шахтные копры являются одним из наиболее ответственных видов горнотехнических сооружений шахтной поверхности. От длительности строительно-монтажных работ на данных объектах зависит эффективная работа всего предприятия. Поэтому на сегодняшний день является особенно актуальным исследование изменения напряженно-деформированного состояния стальных копров при монтаже методом надвигки, что позволит сократить сроки строительства данных объектов.

Цель. Проанализировать влияние монтажных нагрузок на напряженно-деформированное состояние башенного металлического копра в момент надвига.

Материалы и методы. Для анализа конструктивной схемы сооружения с устанавливаемым оборудованием создана BIM модель в программном комплексе для информационного моделирования Tekla Structures. Созданная модель позволяет дать более точную оценку массы сооружения. Численные исследования укосного копра проведены в отечественном программно-вычислительном комплексе ЛИРА-САПР 2024. Рассматриваемая система принята в общем виде, ее деформации и главные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей.

Результаты. Выполнен анализ нагрузок и воздействий, прикладываемых для данного сооружения в момент надвигки с учетом действительной работы конструктивных элементов. Высота копра составляет 85 м, суммарная масса – 8028 т. Разработана математическая модель металлического копра скипо-клетевой конфигурации с двумя укосинами, позволяющая оценить влияние монтажа сооружения методом надвигки. С учетом коэффициента трения скольжения для монтажа принято 5 домкратов по 1000 т. Домкраты устанавливаются на самые нагруженные оси накаточного пути. Полученные результаты позволяют выполнить подбор оборудования для выполнения надвига.

Выводы. В результате расчета коэффициент удерживания составил 13,06 вдоль проведения надвигки башенного копра, что соответствует требованиям расчета на опрокидывание. Анализ изменения напряженно-деформированного состояния копра скипо-клетевой конфигурации при монтаже методом надвига показал необходимость применения пяти гидравлических домкратов по 1000 т с последующей корректировкой давления домкратов на каждую из осей во избежание поворота всей конструкции и последующего заклинивания стенда надвига. Также при проведении надвигки данных сооружений необходимо отказаться от укосины, расположенной поперек движения копра, что позволит уменьшить количество осей накаточного пути.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние (НДС), башенный металлический копер (БМК), метод надвигки, численная модель, гидравлические домкраты, предельное состояние, мозаика проверок сечений

Для цитирования: Точеная А.А., Югов А.М., Титков С.О., Танасогло А.В., Гаранжа И.М. Напряженно-деформированное состояние стального башенного копра при монтаже методом надвигки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;45(2):95–106. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-95-106](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-95-106)

Вклад авторов

Точеная А.А., Югов А.М., Танасогло А.В. – концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Титков С.О., Гаранжа И.М. – идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.11.2024

Поступила после рецензирования 25.01.2025

Принята к публикации 30.01.2025

STRESS-STRAIN STATE OF A STEEL TOWER CRANE DURING ERECTION BY THE PUSHING METHOD

A.A. TOCHENAYA¹

A.M. YUGOV¹

S.O. TITKOV¹, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. TANASOGLO², Cand. Sci. (Engineering)

I.M. GARANZHA^{2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DNACEA), Derzhavina str., 2, Makeevka, 286123, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. Inclined shaft headframes are among the most critical types of surface mining structures. The duration of construction and assembly of these structures directly affects the overall efficiency of the enterprise. Therefore, investigating the changes in the stress-strain state of steel headframes during installation by the pushing method is particularly relevant today, as it can help reduce the construction time of these structures.

Aim. This study aims to analyze the influence of assembly loads on the stress-strain state of the tower metal headframe during the moment of pushing.

Materials and methods. A BIM model was created in the Tekla Structures software for information modeling in order to analyze the structural scheme of the construction with the installed equipment. This model provides a more accurate assessment of the mass of the structure. Numerical studies of the inclined headframe were conducted using domestic software and the LIRA-SAPR 2024 computational complex. The system under consideration is presented in a general form, with deformations and main unknowns represented by linear displacements of nodal points along the X, Y, and Z axes, as well as rotations around these axes.

Results. An analysis was performed to determine the loads and influences applied to the structure while it was being pushed. The actual behavior of the structural elements was taken into account. The headframe is 85 meters high and has a total mass of 8,028 tons. A mathematical model of a two-bracing skip-cage headframe was developed to assess the influence of installing the structure by the pushing method. Considering the sliding friction coefficient, five jacks with a capacity of 1,000 tons each were selected for installation. The jacks are installed on the axes with the greatest load on the rolling path. The obtained results enable the selection of equipment for the pushing operation.

Conclusions. The calculation revealed that the retention coefficient is 13.06 in the direction of the tower headframe pushing, meeting the requirements for overturning resistance. Analysis of the stress-strain changes in the skip-cage headframe during installation using the pushing method revealed the need for five 1,000 ton hydraulic jacks. Adjusting the jack pressures on each axis prevents rotation of the entire structure and subsequent jamming of the pushing stand. Moreover, when these structures are being pushed, it is essential to remove the bracing that is perpendicular to the movement of the headframe. This will result in a reduction of the number of rolling path axes.

Keywords: stress-strain state (SSS), tower metal headframe (TMH), thrust method, numerical model, hydraulic jacks, limit state, cross-section verification mosaic

For citation: Tochenaya A.A., Yugov A.M., Titkov S.O., Tanasoglo A.V., Garanzha I.M. Stress-strain state of a steel tower crane during erection by the pushing method. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;45(2):95–106. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-95-106](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-95-106)

Authors contribution statement

Tochenaya A.A., Yugov A.M., Tanasoglo A.V. – conceptualization of the study, writing of the original draft, final conclusions.

Titkov S.O., Garanzha I.M. – idea, conceptualization of the study, writing of the original draft, data processing, final conclusions.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.11.2024

Revised 25.01.2025

Accepted 30.01.2025

Введение

Укосные шахтные копры являются одним из наиболее ответственных видов горнотехнических сооружений шахтной поверхности [1]. От качества проводимых строительного-монтажных работ и сроков введения данных объектов в эксплуатацию напрямую зависит работа всего предприятия. Одним из вариантов сокращения сроков строительства данного объекта является способ надвижки возведенного башенного копра с установленным оборудованием, готовым к подключению.

В настоящее время метод надвижки в значительной степени распространен в мостостроении при монтаже пролетных строений. Метод монтажа «надвижка» применяется для особо тяжелых конструкций или больших по площади конструктивных блоков зданий или сооружений. В строительстве промышленных предприятий данный метод применяется исходя из экономических показателей. При строительстве копров предшествующим этапом

идет проходка ствола шахты и устройство крепи, которые занимают значительное время, как и строительство самого ствола шахты (надземное сооружение). Для уменьшения сроков строительства применяется метод «надвижки», который позволяет параллельно производить проходку подземной части ствола и строительство копра. Параллельность строительства обеспечивается за счет того, что ствол башенного копра строится рядом с местом, где проходит проходка, на специально разработанном стенде. По окончании проходки и строительства копра надземная часть перемещается по специально разработанному пути в проектное положение и в последующем соединяется со стволом проходки.

Метод «надвижки» (передвижения зданий и сооружений) не является новым. Первые упоминания о передвижении сооружений датируются тысячей лет до нашей эры. Ученые предполагают, что таким образом был передвинут фундамент Сфинкса в Египте. Впервые в России в 1770 г. таким образом был передвинут памятник Петру I в Санкт-Петербурге [2]. Применению данного метода способствовала индустриализация городов и сохранение памятников архитектуры. Данный метод был применен в СССР, Европе, США. Особое внимание данному методу было уделено в горнодобывающей промышленности Донбасса.

Анализ исследования

Значительный вклад в развитие проектирования копров внесли такие ученые, как В.Е. Андреев [1], Я.В. Бровман [3], В.М. Левин [4], S. Lagomarsino, L.C. Pagnini [5].

Исследованиями высотных сооружений, в том числе и исследованиями башенных металлических копров, занимались такие ученые, как Е.В. Горохов [6–9], В.Н. Кущенко [10, 11], А.С. Кострицкий [12], В.К. Kejriwal [13], V.V. Kulyabko [14], D.G. Elms [15], J. Murgewski [16].

Целью исследования является анализ влияния монтажных нагрузок на напряженно-деформированное состояние башенного металлического копра методом «надвижки».

Объект исследования – укосный шахтный копр со скипо-клетьевым подъемом.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние несущих стальных элементов шахтного копра.

Основной материал

В данной статье рассматривается надвижка башенного металлического копра высотой 85 м со скипо-клетьевым подъемом полезных ископаемых (рис. 1).

Копер имеет две укосины, расположенные вдоль цифровых и буквенных осей сооружения. На отметке +22,000 м расположен бункер приема сырья объемом 600 м³. Эвакуационные выходы выполнены из монолитного железобетона. В осях Ж–Л располагаются тяжелые конвейеры для отгрузки добытого сырья.

На первом этапе проводится анализ конструктивной схемы сооружения с устанавливаемым оборудованием. Это требуется для оценки массы сооружения и нахождения центра тяжести. Для точной оценки массы сооружения была создана BIM-модель в программном комплексе Tekla Structures (рис. 2).

Данная модель позволяет более точно определить вес сооружения. Она создается по данным проектной организации, которая проводит проектирование копра в стадии эксплуатации.

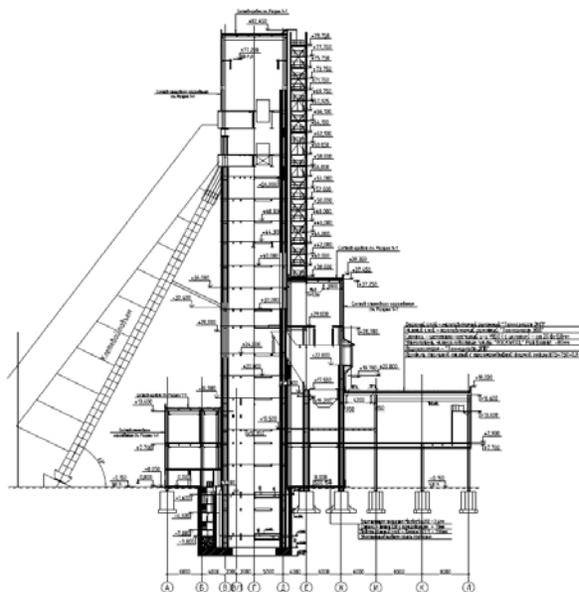


Рис. 1. Башенный металлический копер скипо-клетьевого подъема (разрез)
Fig. 1. Steel tower headframe of the skip-cage lift (cross-section)

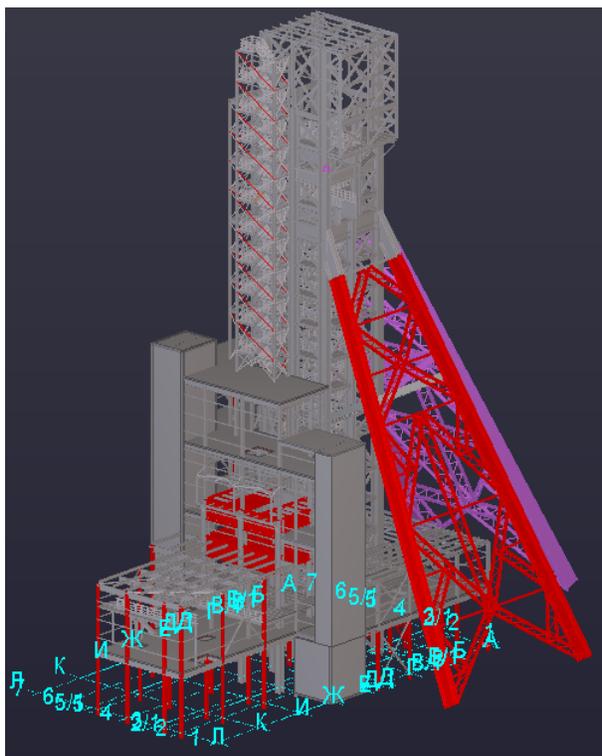


Рис. 2. BIM-модель башенного металлического копра
Fig. 2. BIM model of steel tower headframe

При разработке проектов организации строительства (ПОС) и производства работ (ППР) для проведения надвижки перед инженером стоят задачи: оценка несущей способности сооружения в процессе надвижки; разработка специального стенда сборки копра с учетом геологических изысканий объекта; разработка накаточного пути для перемещения сооружения в проектное положение; подбор материалов скольжения:

- металл по металлу, смазанный графитовой смазкой;
- металл по металлическим кругам, смазанный графитовой смазкой;
- применение специального волокна для надвижки пролетных строений мостов.

А также стоят задачи принятия решения по применению домкратов либо применению блоков и полиспаатов тяговых механизмов; разработки узлов крепления монтажных приспособлений и узлов крепления сооружения в проектное положение.

Для решения вышеперечисленных задач разработана расчетная схема в программном комплексе ЛИРА-САПР 2024 (рис. 3, 4). Расчетная схема определена как система с признаком 5 (пространственная система). Это значит, что рассматривается система общего вида, ее деформации и главные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей.

В расчетном комплексе к сооружению прикладывались нагрузки от веса копра с учетом установки ограждающих конструкций от отметки +6,000 м и расположения оборудования копра. Снеговая нагрузка рассчитывалась с учетом разновысотности блоков сооружения. Ветровое воздействие рассчитывалось с учетом пульсационной составляющей по направлению оси X и Y .

Проанализировав ВМ-модель, можно сделать вывод, что суммарная масса копра составляет 8028 тонн, предварительно с учетом коэффициента трения скольжения 0,4 (металл по металлу) принимаем 5 домкратов по 1000 тонн и устанавливаем их на самые нагруженные

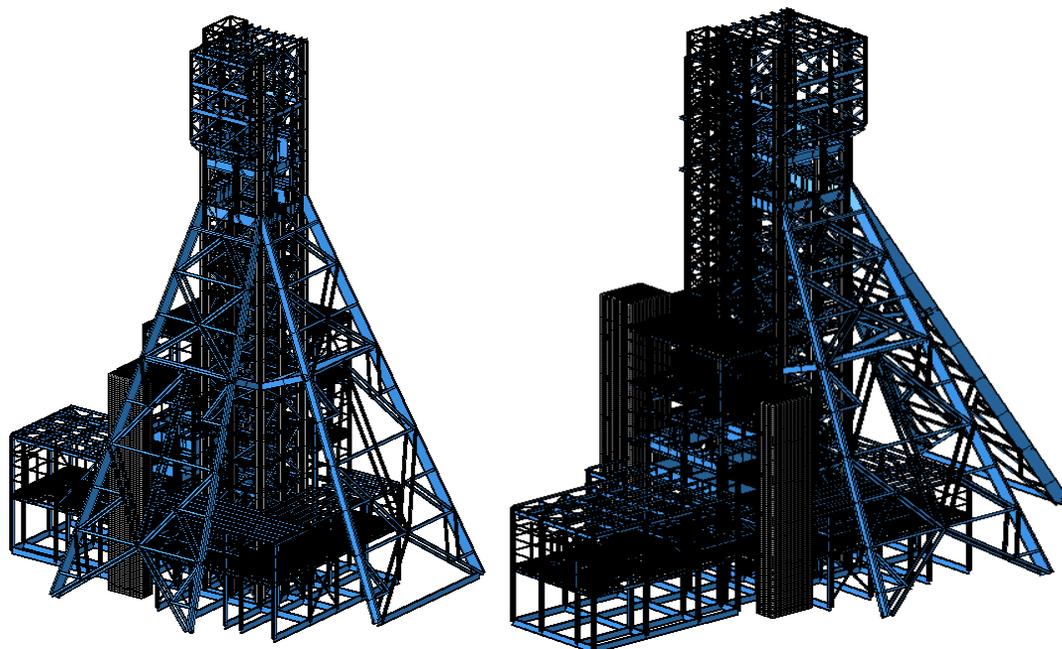


Рис. 3. 3D-модель
Fig. 3. 3D model

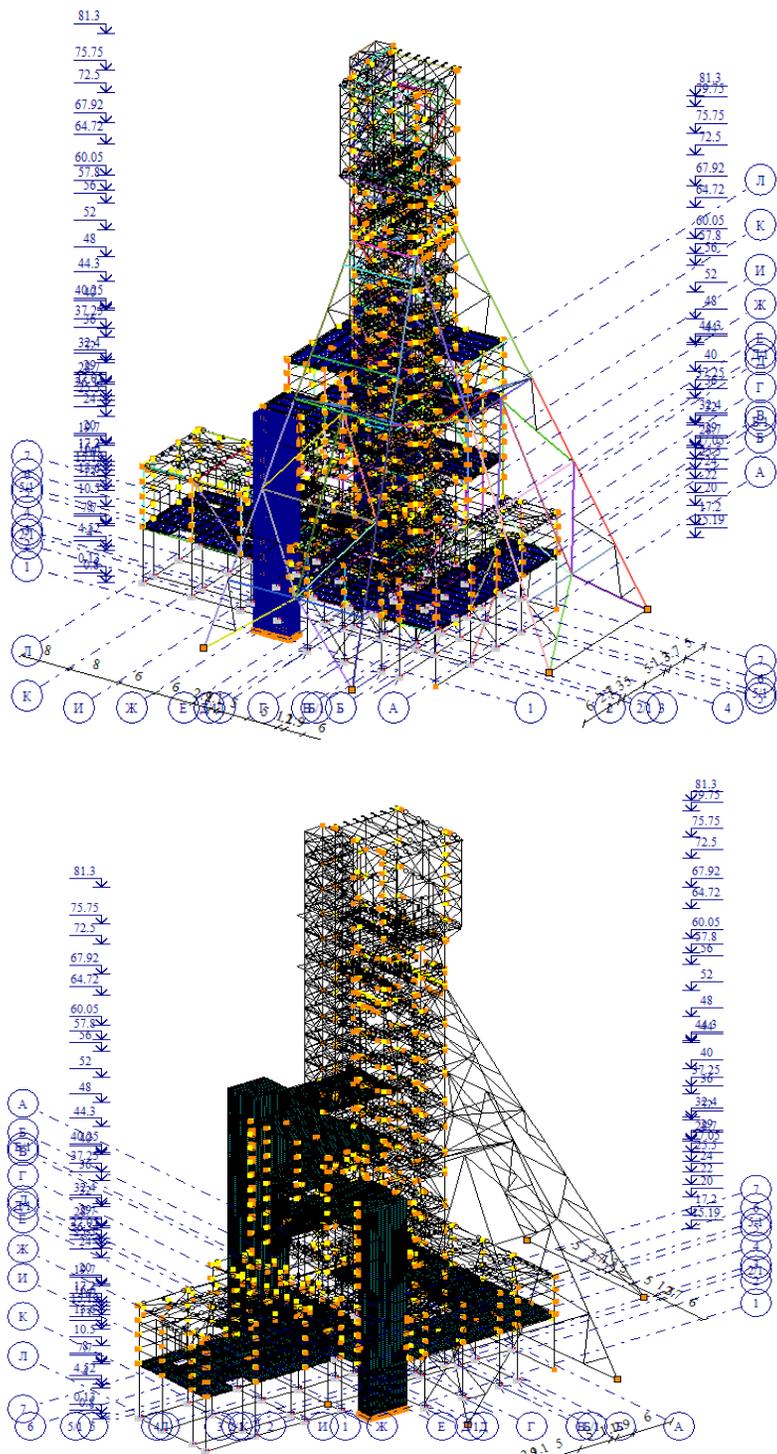


Рис. 4. Расчетная схема копра, выполненная в программном комплексе ЛИРА-САПР
Fig. 4. Analytical scheme of the headframe, developed in the LIRA-SAPR software complex

оси накаточного пути. На рис. 5–7 представлены мозаики проверки принятых сечений по первому предельному состоянию (прочность), по второму предельному состоянию (прогибы и перемещения), по местной устойчивости.

Полученные результаты позволяют корректно провести усиление дополнительной развязкой связей первого этажа. При приложении нагрузки от домкратов по наиболее

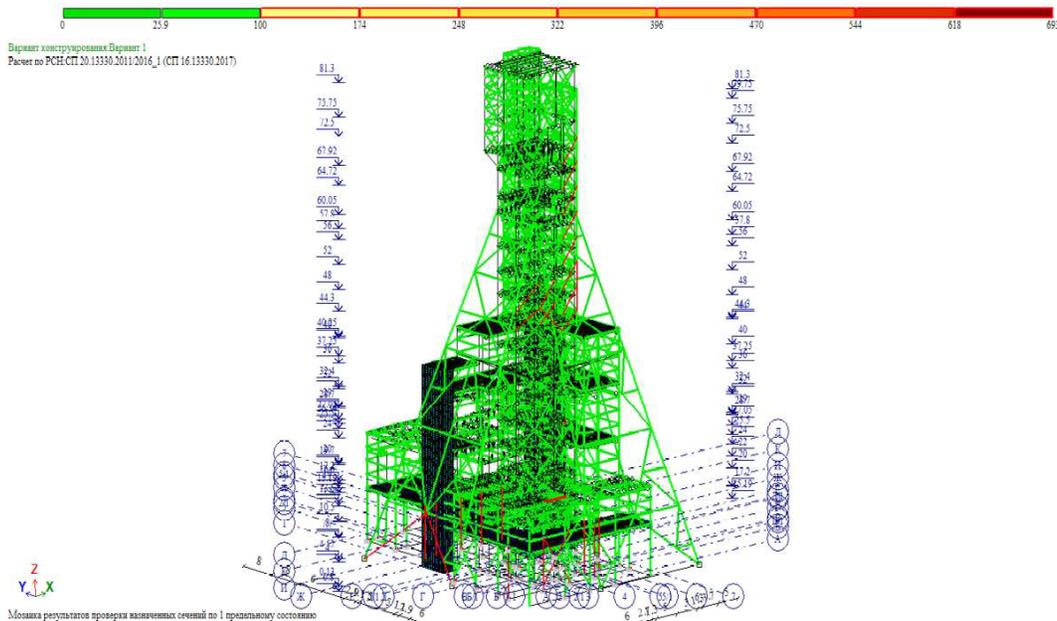


Рис. 5. Мозаика проверки сечений по первому предельному состоянию (прочность)
Fig. 5. Cross-section verification mosaic for the first limit state (strength)

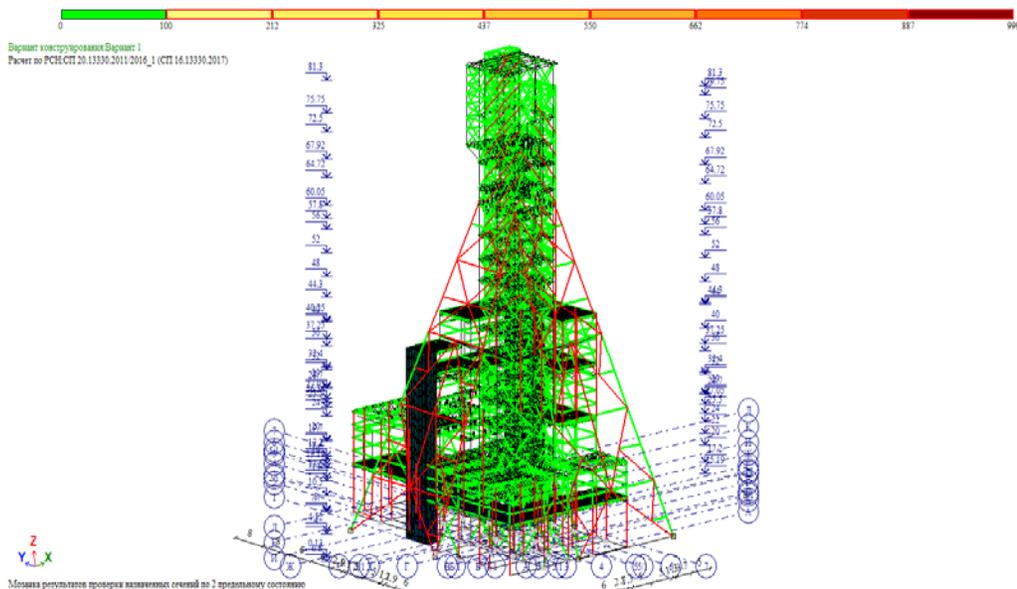


Рис. 6. Мозаика проверки сечений по второму предельному состоянию (прогибы и перемещения)
Fig. 6. Cross-section verification mosaic for the second limit state (deflections and displacements)

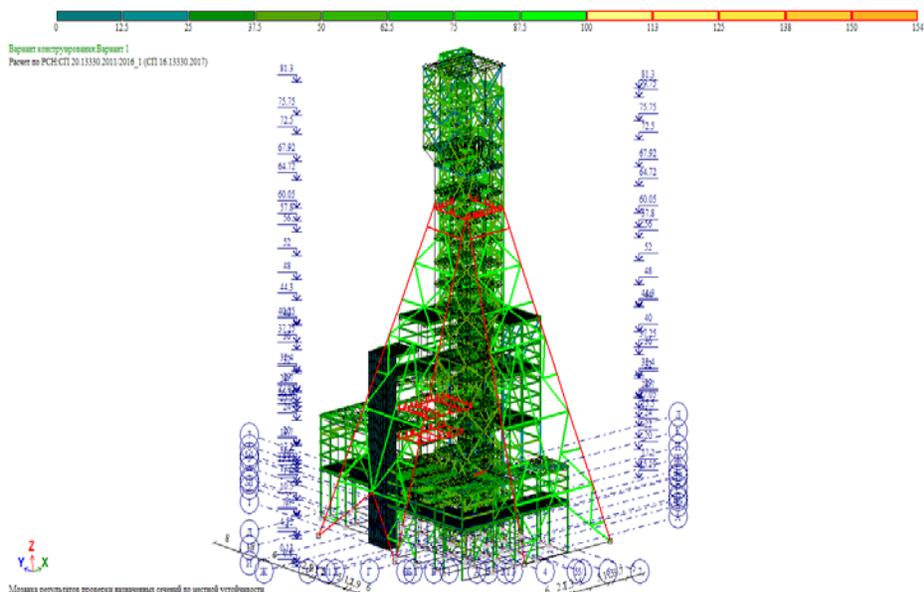


Рис. 7. Мозаика проверки сечений по местной устойчивости
Fig. 7. Cross-section verification mosaic for local stability

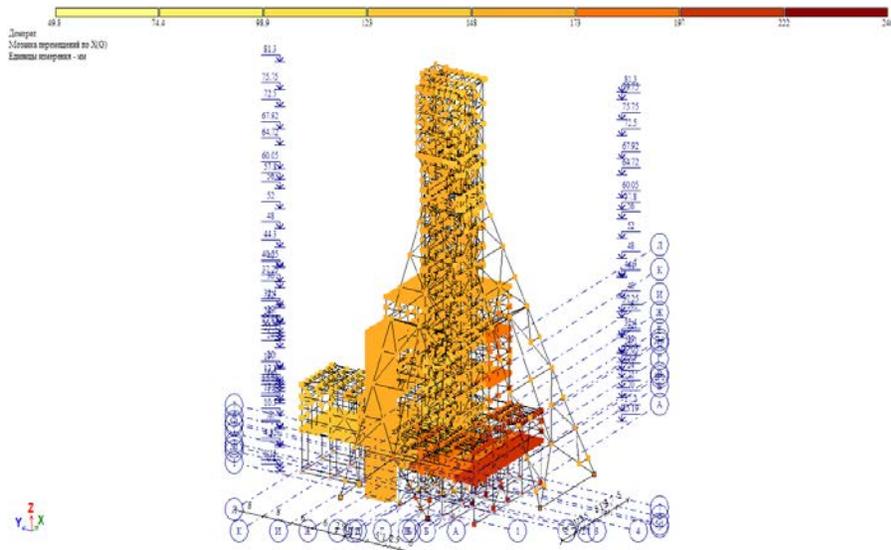


Рис. 8. Мозаика перемещения по оси X вдоль буквенных осей от приложения нагрузки домкратов, предварительно установленных на наиболее нагруженные оси В, Г, Д, Е, Ж (по 1000 т на ось)

Fig. 8. Displacement mosaic along the X-axis due to the application of jack loads, pre-installed on the most heavily loaded axes B, G, D, E, and Zh (1,000 tons per axis)

нагруженным осям накаточного пути происходит поворот (рис. 8) копра с последующим изломом одной из укосин. При проведении надвижки данного сооружения необходимо отказаться от укосины, расположенной поперек движения копра. Это позволит уменьшить количество осей накаточного пути.

Выводы

1. Коэффициент удерживания превышает 1 и составляет 13,06 вдоль проведения надвижки, что в свою очередь соответствует требованиям расчета на опрокидывание.

2. Суммарная масса копра составляет в летний период 8028 тонн, а в зимний период – $8028 + 506 = 8534$ тонны.

3. Расчет подтвердил, что требуется выполнить усиление элементов, не прошедших по первому предельному состоянию (колонны первого этажа, первая секция ноги, связи первого этажа), также требуется провести дополнительную развязку колонн первого этажа.

4. Проанализировав результаты расчета, рекомендуется проводить надвиг копра с одной укосиной, расположенной вдоль буквенных осей.

5. Рекомендуется применение пяти гидравлических домкратов по 1000 т – один с последующей корректировкой давления домкратов на каждую из осей во избежание поворота копра (последующего заклинивания стенда надвига).

Список литературы

1. Андреев В.Е. Проектирование, строительство и эксплуатация башенных копров. Москва: Недра; 2010.
2. Гендель Э.М. Передвижка зданий и сооружений. Знание. Сер. Строительство и архитектура. 1978;(5):12–48.
3. Бровман Я.В. Надшахтные копры: проектирование, расчет и конструкция. Москва: Госгортехиздат; 1991.
4. Левин В.М. Башенные сооружения промышленного назначения. Исследования и расчет. Макеевка: ДонНАСА; 2019.
5. Lagomarsino S., Pagnini L.C. Criteria for modeling and predicting dynamic parameters of building. Report ISC-II, 1, Istituto di Scienza delle Costruzioni. Genova, Italy: University of Genova; 1995.
6. Горохов Е.В., Кущенко В.Н., Пиличев К.Л., Махина В.В., Матвеев В.П., Листовенко П.С. Методика обследования несущих стальных конструкций шахтных копров. Донецк: ЦБНТИМинуглепрома УССР; 1984.
7. Горохов Е.В., Кущенко В.Н. Предохранительное устройство к грузоподъемному механизму: а. с. СССР № 969635. Оpubл. 30.10.1982.
8. Горохов Е.В., Кущенко В.Н. Шахтный копер: а. с. СССР № 881283. Оpubл. 15.11.1981.
9. Горохов Е.В., Кущенко В.Н. Шахтный копер: а. с. № 953166. Оpubл. 21.04.2002.
10. Кущенко В.Н. Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров. Макеевка: ДонНАСА; 2006.
11. Кущенко В.Н. Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров [диссертация]. Макеевка; 2007.
12. Кострицкий А.С. Учет динамического характера особых нагрузок на конструкции укосных шахтных копров [диссертация]. Макеевка; 2003.
13. Kejriwal B.K. Safety in mines. Dyanbad: Lovely Prakashan; 1994.
14. Kulyabko V.V. Drawing up of the dynamic models of long-shan and high-rise RS buildings and structures in the time of the diagnostics. In: Proc. 2nd RILEM International Conf. Štrbské pleso «Diagnosis of Concrete Structures-»; 1996, p. 382.
15. Elms D.G. Risk balancing in structural problems. Structural Safety. 2012;19(1):67–77. [https://doi.org/10.1016/s0167-4730\(96\)00038-0](https://doi.org/10.1016/s0167-4730(96)00038-0).
16. Murgewski J. Reliability: State-of-Art. In: Metal Structures: IX International Conference: Final Report, 1996, Krakov (Poland). Krakov (Poland); 1996, pp. 99–112.
17. Кущенко В.Н. Резервы несущей способности и обеспечение долговечности стальных конструкций шахтных копров [диссертация]. Одесса; 1985.

References

1. *Andreev V.E.* Design, construction and operation of tower pile drivers. Moscow: Nedra Publ.; 2010. (In Russian).
2. *Gendel' E.M.* Moving buildings and structures. Znanie. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura [Knowledge. Series: Construction and Architecture]. 1978;(5):12–48. (In Russian).
3. *Brovman Ya.V.* Headframes: design, calculation and construction. Moscow: Gosgortekhizdat Publ.; 1991. (In Russian).
4. *Levin V.M.* Tower structures for industrial purposes. Research and analysis. Makeevka: DonNASA; 2019. (In Russian).
5. *Lagomarsino S., Pagnini L.C.* Criteria for modeling and predicting dynamic parameters of building. Report ISC-II, 1, Istituto di Scienza delle Costruzioni. Genova, Italy: University of Genova; 1995.
6. *Gorohov E.V., Kushchenko V.N., Pilychev K.L., Mahina V.V., Matveev V.P., Listovenko P.S.* Methodology for inspection of load-bearing steel structures of mine headframes. Donetsk: CBNTIMinugleproma USSR; 1984. (In Russian).
7. *Gorohov E.V., Kushchenko V.N.* Safety device for lifting mechanism. Author's certificate USSR No. 969635. Publ. date 30 October 1982. (In Russian).
8. *Gorohov E.V., Kushchenko V.N.* Mine headframe. Author's certificate USSR No. 881283. Publ. date 15 November 1981. (In Russian).
9. *Gorohov E.V., Kushchenko V.N.* Mine headframe. Author's certificate No. 953166. Publ. date 21 April 2002. (In Russian).
10. *Kushchenko V.N.* Ensuring the safety of building structures of inclined mine headframes. Makeevka: DonNASA; 2006. (In Russian).
11. *Kushchenko V.N.* Ensuring the safety of building structures of inclined mine headframes [dissertation]. Makeevka; 2007. (In Russian).
12. *Kostrickii A.S.* Taking into account the dynamic nature of special loads on the structures of inclined mine headframes [dissertation]. Makeevka; 2003. (In Russian).
13. *Kejriwal B.K.* Safety in mines. Dyanbad: Lovely Prakashan; 1994.
14. *Kulyabko V.V.* Drawing up of the dynamic models of long-shan and high-rise RS buildings and structures in the time of the diagnostics. In: Proc. 2nd RILEM International Conf. Štrbské pleso «Diagnosis of Concrete Structures»; 1996, p. 382.
15. *Elms D.G.* Risk balancing in structural problems. Structural Safety. 2012;19(1):67–77. [https://doi.org/10.1016/s0167-4730\(96\)00038-0](https://doi.org/10.1016/s0167-4730(96)00038-0).
16. *Murgewski J.* Reliability: State-of-Art. In: Metal Structures: IX International Conference: Final Report, 1996, Krakov (Poland). Krakov (Poland); 1996, pp. 99–112.
17. *Kushchenko V.N.* Reserves of bearing capacity and ensuring durability of steel structures of mine headframes [dissertation]. Odessa; 1985. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Анастасия Артуровна Точеная, магистрант кафедры технологии и организации строительства, ДонНАСА, Makeevka

e-mail: tochenaya.a.a-zpgs-55@donnasa.ru

тел.: +7 (949) 349-25-41

Anastasiya A. Tochenaya, Master Student, Technologies and Organization of Construction Department, DNACEA, Makeevka

e-mail: tochenaya.a.a-zpgs-55@donnasa.ru

tel.: +7 (949) 349-25-41

Анатолий Михайлович Югов, заведующий кафедрой технологии и организации строительства, ДонНАСА, Makeevka

Anatoliy M. Yugov, Head of Department, Technologies and Organization of Construction Department, DNACEA, Makeevka

Сергей Олегович Титков, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений, ДонНАСА, Makeevka
e-mail: s.o.titkov@donnasa.ru
тел.: +7 (949) 349-25-41

Sergey O. Titkov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Metal Constructions and Structures Department, DNACEA, Makeevka
e-mail: s.o.titkov@donnasa.ru
tel.: +7 (949) 349-25-41

Антон Владимирович Танасогло, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: a.v.tan@mail.ru
тел.: +7 (915) 544-36-23

Anton V. Tanasoglo, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Metal and Timber Structures department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: a.v.tan@mail.ru
tel.: +7 (915) 544-36-23

Игорь Михайлович Гаранжа✉, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: garigo@mail.ru
тел.: +7 (926) 284-55-17

Igor M. Garanzha✉, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Metal and Timber Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: garigo@mail.ru
tel.: +7 (926) 284-55-17

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author