

УДК 624.072.33

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-17-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-17-29)

EDN: XEAIAI

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО МОСТА СГУСТИТЕЛЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

А.Б. БОНДАРЕВ^{1,✉}А.М. ЮГОВ², д-р техн. наук

¹Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ГОУ ВПО ДонНАСА), ул. Державина, д. 2, г. Макеевка, 286123, Донецкая Народная Республика

Аннотация

Введение. В статье представлен опыт апробации разработанной методики оценки влияния геометрических отклонений на напряженно-деформированное состояние металлоконструкций переходного моста на объекте «Сгуститель хвостов обогащения № 1», который расположен на Наталкинском горно-обогатительном комбинате. В работе приведен краткий обзор ранее выполненных исследований по учету отклонений на металлоконструкции, подтверждена актуальность задач, решенных в статье и исследовании в целом. Обоснована необходимость корректировки ранее разработанного проекта по переходному мосту сгустителя и практическая применимость разработанной методики.

Цель. Провести апробацию методики определения напряженно-деформированного состояния стержневых металлоконструкций с учетом отклонений на примере переходного моста сгустителя.

Материалы и методы. Основу исследований составляют следующие материалы и методы:

- метод конечных элементов, реализованный в SCAD 11.5, применен при численном исследовании состояния переходного моста сгустителя с отклонениями;
- теория размерных цепей и метод геометрического моделирования при определении величин геометрических отклонений, реализованные в авторской компьютерной программе – Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций».

Результаты. Изложенные в статье результаты позволили своевременно обосновать необходимость корректировки документации и повысить уровень надежности и экономическую эффективность как переходного моста сгустителя, так и объекта в целом. В процессе исследований:

- спрогнозированы возможные геометрические отклонения переходного моста сгустителя, построены эпюры предельных значений возможных геометрических отклонений узлов по трем направлениям (X, Y, Z);
- проведен учет возможных геометрических отклонений на напряженно-деформированное состояние металлоконструкций переходного моста сгустителя при его поверочных расчетах, что позволило обосновать необходимость корректировки проекта и провести оптимизацию ранее принятых решений;
- снижены величины постоянных и временных нагрузок, что позволило избежать возможного возникновения аварийного состояний на объекте.

Выводы. Выполнена апробация разработанной методики определения напряженно-деформированного состояния стержневых металлоконструкций с учетом накопления геометрических отклонений изготовления и монтажа на примере переходного моста сгустителя.

Ключевые слова: монтажные воздействия, расчет точности, метод конечных элементов, отклонения большепролетных металлоконструкций, сгуститель хвостов обогащения

Для цитирования: Бондарев А.Б., Югов А.М. Влияние геометрических отклонений на напряженно-деформированное состояние переходного моста сгустителя хвостов обогащения. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;35(4):17–29. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-17-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-17-29)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.11.2022

Поступила после рецензирования 01.12.2022

Принята к публикации 06.12.2022

INFLUENCE OF GEOMETRIC DEVIATIONS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF OVERBRIDGE AT TAILINGS THICKENER

A.B. BONDAREV^{1,✉}

A.M. YUGOV², Dr. Sci. (Engineering)

¹Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

²State Educational Institution of Higher Professional Education "Donbas National Academy of Civil Engineering
and Architecture" (SEI HPE DonNACEA), Derzhavina str., 2, Makeyevka, 286123, Donetsk People's Republic

Abstract

Introduction. The article presents the results of testing a developed methodology for assessing the effect of geometric deviations on the stress-strain state of the metal structures of an overbridge at the facility of "Tailings Thickener 1", located at the Natalka Mining Processing Plant. A brief review of previously performed studies for recording deviations of metal structures is provided, along with confirming the relevance of the problems solved in the article and the study in general. It was substantiated that it is necessary to adjust the previously developed project on the overbridge of a thickener (OT); the applicability of the developed methodology was demonstrated.

Aim. In the article, the methodology for determining the stress-strain state of frame metal structures was tested in the light of deviations, using the example of an OT.

Materials and methods. The following materials and methods were used:

- the finite element method implemented in SCAD 11.5 was applied in the numerical study of the state of the (OT) having deviations;
- the theory of dimensional chains and the method of geometric modeling implemented in the authoring software entitled the "Dimensional analysis of rod structures" Computational Complex were used to determine the values of geometric deviations.

Results. The results presented in the article allowed for timely substantiation of the amendments of the documentation and an increase in the reliability and economic efficiency of the OT, as well as the entire facility.

During research:

- possible geometric deviations of the OT were forecasted, along with plotting the limiting values of possible geometric deviations of nodes in three directions (X, Y, Z);
- effect of possible geometric deviations on the stress-strain state of the OT metal structures was included in its verification calculations, which substantiated the necessity of adjusting the project and optimizing previously made decisions;
- values of permanent and temporary loads were reduced, which allowed the possible emergency situations at the facility to be avoided.

Conclusions. The developed methodology for determining the stress-strain state of frame metal structures was validated on the example of an overbridge of a thickener, taking into account the accumulation of geometric deviations during its manufacture and installation.

Keywords: assembling stress, accuracy calculation, finite element method, displacement of long-span steel structures, tailings thickener

For citation: Bondarev A.B., Yugov A.M. Influence of geometric deviations on the stress-strain state of over-bridge at tailings thickener. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;35(4):17–29. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-17-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-17-29)

Author contribution statements

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.11.2022

Revised 01.12.2022

Accepted 06.12.2022

Введение

В данной статье представлен опыт апробации методик [1, 4, 15] на примере мостового перехода объекта «Сгуститель хвостов обогащения № 1» (сооружение 8.5) при строительстве Наталкинского горнодобывающего комбината (НГОК) на базе золоторудного месторождения «НАТАЛКА», расположенного в Тенькинском районе Магаданской области Российской Федерации. Заказчик строительства НГОК – АО «Рудник им. Матросова», являющийся в настоящее время Управляемым Обществом (УО) Управляющей компании «ПОЛЮС» (УК «ПОЛЮС»). Работы по строительству исследуемого объекта, в том числе монтаж металлоконструкций переходного моста сгустителя, выполнен ООО «Полюс Строй».

Объект исследования – металлоконструкции мостового перехода на объекте 8.5 «Сгуститель хвостов обогащения № 1».

Цель исследования – получить более экономически эффективный и надежный переходной мост сгустителя хвостов обогащения Наталкинского ГОКа.

В основу исследований положены следующие **методы исследования**:

- метод конечных элементов (МКЭ) – при численном исследовании работы объекта исследования под действием нагрузок и отклонений, реализованный в BK SCAD 11.5;

– теория размерных цепей и геометрический метод – при определении величин геометрических отклонений и решении систем алгебраических уравнений.

В статье решены следующие **задачи исследования**:

- выполнен краткий обзор исследований по учету влияния отклонений монтажа металлоконструкций на их напряженно-деформированное состояние (НДС);
- произведен расчет и анализ точности металлоконструкций переходного моста сгустителя, изготовленного фирмой «DELKOR»;
- произведен расчет и анализ НДС металлоконструкций переходного моста, изготовленного фирмой «DELKOR» с учетом отклонений, полученных в ВК РАСК [1].

Краткий обзор ранее выполненных исследований

Известно, что одновременно с появлением и развитием нового горно-металлургического предприятия, как правило, получают импульс и развитие прикладные исследования, происходит интеграция академической и отраслевой наук, содействующих эффективному развитию новообразовавшегося предприятия – НГОК. Примерами таких исследований могут служить работы Ю. Д. Норова и Е. Г. Кассихиной [6, 10].

Для оценки влияния отклонений на НДС металлоконструкций В. А. Савельев [12], А. С. Гвамичава [5], М. В. Моисеев [9] и другие использовали метод статистических испытаний, который широко известен в проектировании металлоконструкций.

Н. М. Кирсанов [7] приводит в своей работе индуктивный метод определения погрешностей, схожий с методом Мора. М. Sonmez [23], Н. S. Kim, А. К. Shin [19] для определения погрешностей и ферменных конструкций предлагают алгоритм оптимизации. Для борьбы с отклонениями и деформациями в мостовых конструкциях А. Preumont [21] использует активную систему управления. В работе А. М. Белостоцкого, А. С. Павлова [3] в качестве сейсмоизоляции покрытия большепролетного сооружения предлагается использовать эластомерные опоры, которые могут выполнять функцию компенсаторов отклонений.

А. В. Перельмутер, О. В. Кабанцев [11, 18], а также зарубежные исследователи [14, 16, 17, 19, 20, 21, 23] занимаются моделированием поведения конструкций многоэтажных зданий с учетом последовательности их возведения. Исследования А. В. Перельмутера, О. В. Кабанцева и М. С. Барабаш [2] являются современными, но не учитывают величин возможных отклонений при монтаже.

Ранее А. М. Югов и А. Б. Бондарев исследовали поведение конструкций большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий с учетом накопления геометрических отклонений, а также проводили оценку их НДС с учетом монтажных нагрузок, вызванных отклонениями [1, 4, 15]. А. А. Григорян под руководством Е. В. Лебеда [8] занимался исследованием начальных усилий в двухпоясных металлических куполах, вызванных погрешностями изготовления и монтажа их конструкций, а также устранением погрешностей.

Характеристика объекта исследования

Сгуститель хвостов обогащения № 1 запроектирован в виде монолитной железобетонной чаши крутой формы в плане. Монолитная чаша сгустителя поднята над планировкой земли на 14 м. Она запроектирована в виде плит, опертых по контуру с толщиной перекрытия

1500 мм. Диаметр сгустителя составляет 65 м. Под чашей расположена разгрузочная камера и галереи. Исследуемый переходной мост сгустителя, входящий в состав сгустителя хвостов обогащения № 1, представляет собой жесткую сварную конструкцию в виде пространственной фермы, которая опирается на верхнюю часть (борт) чаши сгустителя. Ситуационный план площадки золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) и его фрагмент с расположением объекта, а также аксонометрическая схема моста сгустителя приведены в статье [13]. Переходной мост сгустителя разработан институтом ЗАО «ПитерГОРпроект» с использованием металлоконструкций фирмы «DELKOR Technik India Pvt» Ltd («DELKOR»). При рассмотрении и анализе чертежей ЗАО «ПитерГОРпроект» было установлено, что отсутствуют таблицы нагрузок и ведомостей элементов с указанием сечений и усилий в элементах металлоконструкций переходного моста сгустителя.

Численное исследование отклонений металлоконструкций моста сгустителя

В чертежах компании «DELKOR» отсутствует информация о параметрах НДС металлоконструкций переходного моста сгустителя. ЗАО «ПитерГОРпроект» указал, что *«не принимает никакие претензии в части вопросов несущей способности конструкций мостового перехода и возможных деформациях указанных конструкций после монтажа панелей»*.

Учитывая, что информация о НДС металлоконструкций в проектах отсутствовала, было принято решение выполнить поверочные расчеты общей устойчивости, несущей способности и геометрической неизменяемости конструкций мостового перехода с учетом того, что сэндвич-панели смонтированы для эксплуатационной стадии, а также с учетом возможных геометрических отклонений. Следовательно, авторы определили НДС металлоконструкций переходного моста сгустителя с учетом действующих нагрузок и отклонений, определенных в ВК РАСК [1].

Сначала для проведения численного исследования геометрических отклонений металлоконструкций переходного моста сгустителя его конструкции разбиты на монтажные блоки в соответствии с конструктивной разбивкой на блоки по проекту компании «DELKOR» (рис. 1).

Расчет точности и оценка отклонений при сборке металлоконструкций переходного моста сгустителя выполнены по пространственному отклонению для узлов и линейному – для составных и замыкающих стержней размерной цепи с последующим их сравнением с номинальными значениями. Определение отклонений производилось на основе многократных построений. Количество построений $n = 1000$ раз. В результате расчетов точности моста сгустителя с помощью ВК РАСК получены эпюры отклонений (рис. 2).

В качестве величин допусков принят линейный допуск по ГОСТ 21779–82 как для 2-го класса точности $\pm 1,6$ мм. Положение узлов металлоконструкций переходного моста сгустителя оценивалось по их отклонениям от номинального положения по всем трем пространственным направлениям DX , DY , DZ . На эпюрах отклонений показаны предельные величины отклонений, полученные на основе многократных расчетов точности металлоконструкций переходного моста сгустителя – n . В качестве закона распределения отклонений принят нормальный гауссовский закон распределения случайных величин.

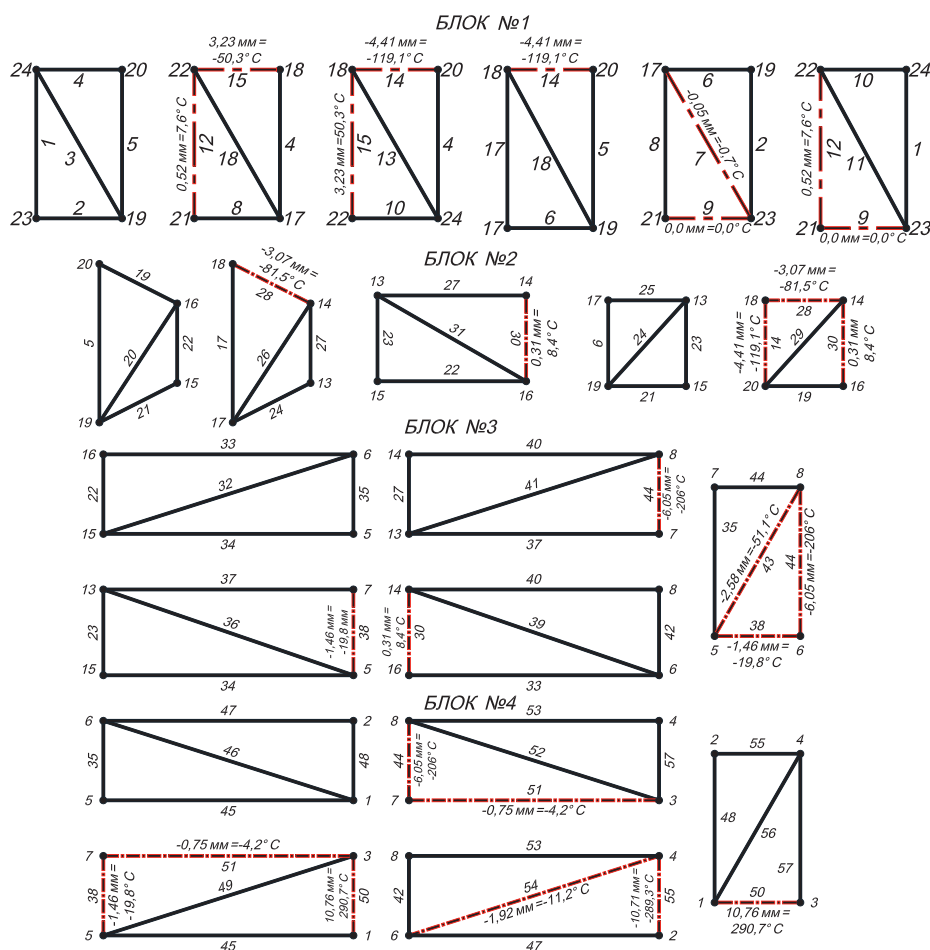


Рис. 1. Схема блоков 1–4 для расчета точности
 Fig. 1. Diagram of units 1–4 for calculating accuracy

На эпюрах отклонений показаны предельные отклонения по направлениям DX , DY , DZ . Из всех направлений наибольшие отклонения зафиксированы в узле 2 по DX , в узле 8 по DX – 40,6 и 34,9 мм соответственно, а также в узле 4 по DZ – 46,5 мм. Наибольшие отклонения зафиксированы в 44, 50, 55 замыкающих стержнях – 38,4, 56,0 и 66,3 мм соответственно. В узлах 2, 20 и 24 по направлению DZ отклонения отсутствуют. В результате расчета точности установлено, что возможные отклонения переходного моста сгустителя превышают допускаемые по СНиП 3.03.01–87*.

Численное исследование НДС переходного моста сгустителя с учетом отклонений

В результате расчета точности получены отклонения и температурные воздействия в замыкающих стержнях, приведенные в табл. 1. Температурными воздействиями смоделировано влияние отклонений на НДС металлоконструкций переходного моста сгустителя. Результаты

численных расчетов НДС подтверждают, что указания ЗАО «ПитерГОРпроект» относительно прочности и жесткости металлоконструкций переходного моста сгустителя обоснованы.

По результатам численных расчетов установлено, что в элементах металлоконструкций переходного моста сгустителя возникают максимальные величины усилий, представленные на рис. 3 а и в табл. 2. Максимальные перемещения узлов нижних и верхних поясов пролетных строений мостового перехода отражены на рис. 3 б. Максимальные величины суммарного перемещения узлов нижнего и верхнего поясов переходного моста сгустителя с утеплением по проекту ЗАО «ПитерГОРпроект» составляют 70 и 77 мм соответственно.

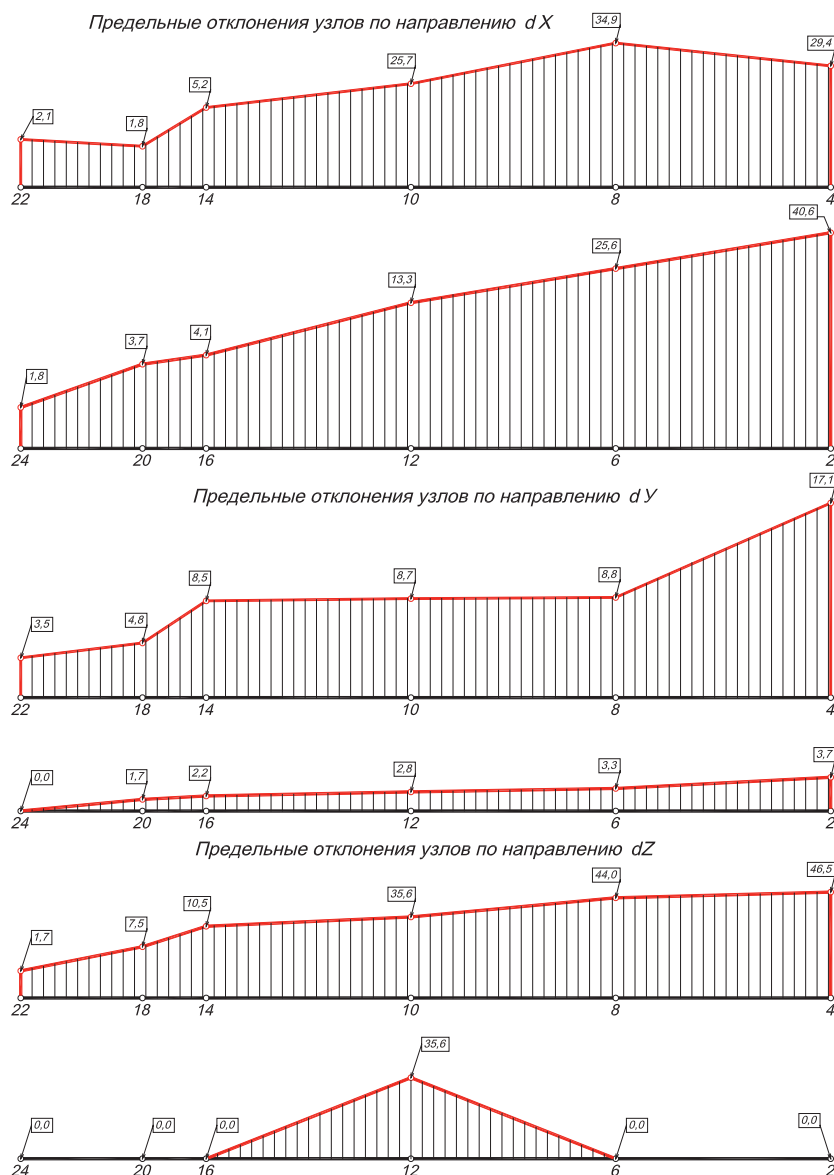


Рис. 2. Эпюры предельных отклонений DX, DY, DZ при сборке сгустителя

Fig. 2. Diagrams of limit displacements DX, DY, and DZ when assembling thickener

Таблица 1

Отклонения и температурные воздействия в замыкающих стержнях

Table 1

Deviations and temperature effects in the closing rods

Номер стержня	Величина отклонения случайная, мм	Величина отклонения предельная, мм	Длина стержня, мм	Температурная нагрузка, °С
ВАРИАНТ № 1				
7	-0,05	0,9	6175,74	-0,7
9	0,00	0,0	3085,00	0,0
12	0,52	2,2	5700,00	7,6
14	-4,41	8,0	3085,00	-119,1
15	3,23	6,1	5350,00	50,3
28	-3,07	11,2	3139,48	-81,5
30	0,31	10,4	3085,00	8,4
31	-4,27	4,5	3937,98	-90,4
38	-1,46	24,2	6138,99	-19,8
43	-2,58	18,7	4206,76	-51,1
44	-6,05	38,4	2447,53	-206,0
50	10,76	56,0	3085,00	290,7
51	-0,75	10,6	14925,56	-4,2
54	-1,92	31,1	14234,33	-11,2
55	-10,71	66,3	3085,47	-289,3

Величины предельных прогибов, которые получены в результате расчетов, не превышают требования СП 20.13330.2016 – 238 мм. По результатам из табл. 2 видно, что несущая способность металлоконструкций верхнего пояса и стоек переходного моста не обеспечена в соответствии с СП 16.13330.2011 и СП 20.13330.2016. Следовательно, необходима корректировка проекта с целью обеспечения несущей способности металлоконструкций переходного моста сгустителя. Рассмотрев расчеты, изложенные в данной статье, проектный институт ООО «Полус Проект» принял решение откорректировать проект утепления переходного моста сгустителя хвостов обогащения. Откорректированный проект подразумевал утепление только привода сгустителя – рис. 4, а от утепления пролетной части переходного моста было принято решение отказаться.

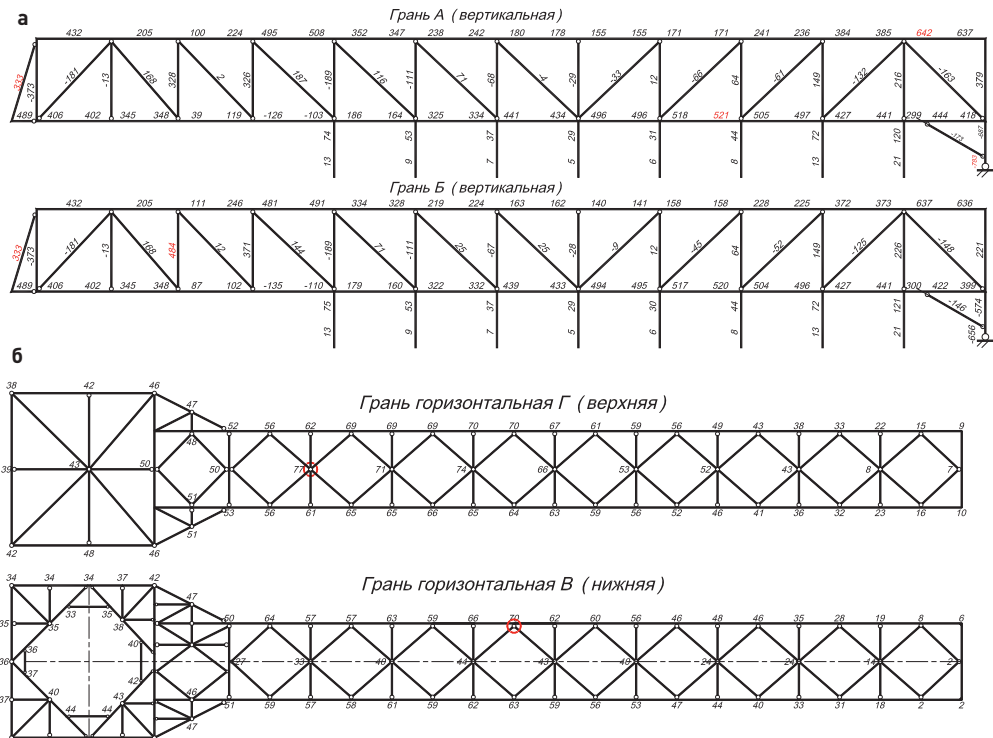


Рис. 3. Схема мостового перехода: а – усилия в нелинейной постановке, выражены в кН; б – суммарные перемещения в узлах в нелинейной постановке, выражены в мм

Fig. 3. Scheme of overbridge: а – forces in nonlinear setting, kN; б – total displacement in nodes at nonlinear setting, mm

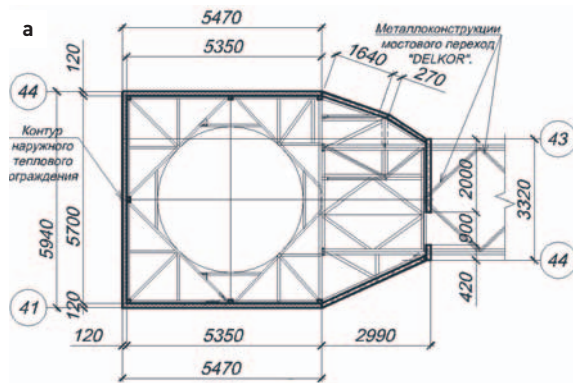


Рис. 4. Утепление привода сгустителя № 1: а – план-схема; б – общий вид

Fig. 4. Insulation of thickener drive unit 1: а – complex diagram; б – general view

Таблица 2

Усилия в элементах по проекту «ПитерГОРпроект» с учетом отклонений

Table 2

Efforts in the elements of the “Petergorproject” project, taking into account deviations

Наименование элементов	Сечение	Марка стали	Несущая способность, кН	Максимальное усилие от загрузений № 1–11, кН	Перегруз сечения (ЗАО «ПитерГОР-проект»), %	Перегруз сечения (ООО «Полюс Проект»)*, %
Верхний пояс	Двутавр 14 Б	С345–4	556	642	15	-48
Нижний пояс	Двутавр 14 Б	С345–4	556	521	-6	-26
Раскосы вертикальных панелей	Квадрат 120×3	С345–4	475	333	-30	-54
Раскосы горизонтальных панелей	Квадрат 120×3	С345–4	475	140	-71	-71
Стойки	Квадрат 120×3	С345–4	475	484	2	-9

Примечание: * Знак «-» означает имеющийся запас прочности в сечении при возникновении всех расчетных нагрузок

Note: * The “-” sign means the available margin of safety in the cross section when all design loads occur

Выводы

На основании анализа результатов, полученных при численных исследованиях НДС металлоконструкций переходного моста сгустителя с учетом отклонений монтажа, можно сформулировать такие выводы:

1. В результате численного статистического исследования геометрических отклонений металлоконструкций переходного моста сгустителя построены эпюры предельных значений возможных геометрических отклонений узлов по трем направлениям. Наибольшие отклонения зафиксированы в узле 2 по DX , в узле 8 по DX – 40,6 и 34,9 мм соответственно, а также в узле 4 по DZ – 46,5 мм.

2. Учет возможных геометрических отклонений на параметры НДС металлоконструкций переходного моста сгустителя при его поверочных расчетах позволил обосновать необходимость корректировки проекта ЗАО «ПитерГОРпроект» институтом ООО «Полюс Проект».

3. Проведенные исследования и предложенный на их основании проект ООО «Полюс Проект» позволили снизить величины постоянных и временных нагрузок, а также избежать возможного возникновения аварийных состояний на объекте НГОК «Сгуститель хвостов обогащения № 1».

Список литературы

1. Бондарев А.Б., Югов А.М. Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК»). Авторское свидетельство 47952 Украина; 20.02.2013.
2. Барабаш М.С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012;8(3):58–67.
3. Белостоцкий А.М., Павлов А.С. Комплексное конечноэлементное моделирование НДС и устойчивости сетчатой оболочки покрытия большепролетного сооружения с эластомерными опорами. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2014;10(3):64–70.
4. Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки. *Инженерно-строительный журнал*. 2015;56(4):28–37.
5. Гвамичава А.С. Разработка и внедрение конструктивных форм и методов расчета крупногабаритных космических антенных сооружений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова; 1984.
6. Кассихина Е.Г. Новая конструктивная форма надшахтного копра многофункционального назначения. *Горный журнал*. 2017;(8):56–60.
7. Кирсанов М.Н. Индуктивный анализ влияния погрешностей монтажа на жесткость и прочность плоской фермы. *Инженерно-строительный журнал*. 2012;(5):38–42.
8. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Влияние монтажных расчетных схем ребер двухпоясного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей. *Вестник МГСУ*. 2015;(8):66–79.
9. Моисеев М.В. Начальные усилия и собираемость стальных структурных конструкций при случайных отклонениях длин стержней: дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГАСА; 2004.
10. Норов Ю.Д. Научное сопровождение горно-металлургического производства. *Горный журнал*. 2017;(8):56–60.
11. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. Учет изменения жесткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации. *Инженерно-строительный журнал*. 2015;(1):6–14.
12. Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: дис. ... канд. техн. наук. Москва: ЦНИИСК им. Мельникова; 1995. 40 с.
13. Югов А.М., Малаш Е.А., Бондарев А.Б. Опыт монтажа технологического оборудования сгустителя хвостов обогащения № 1 Наталкинского горно-обогатительного комбината. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2016;(10):2–6.
14. Mahović A. Typology of Retractable Roof Structures in Stadiums and Sports Halls. *Igra ustvarjalnosti – Creativity game*. 2015;3:90–99. <https://doi.org/10.15292/iu-cg.2015.03.090-099>
15. Bondarev A.B., Yugov A.M. The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015;117:953–963. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.188>
16. Jadhav H.S., Patil Ajit S. Parametric study of double layer steel dome with reference to span to height ratio. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2013;2(8):110–118.
17. Jianguo Cai, Jian Feng, Chao Jiang. Development and analysis of a long span retractable roof structure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;92:175–182. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.09.006>
18. Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Modeling Transition in Design Model when Analyzing Specific Behaviors of Structures. *Procedia Engineering*. 2013;57:479–488. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.062>
19. Kim H.S., Shin A.K. Column shortening analysis with lumped construction sequence. *Procedia Engineering*. 2011;14:1791–1798. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.225>
20. Patidar S., Gandhe V. Typology of Retractable Roof Structure. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2017;3(3):556–560.
21. Preumont A. Vibration control of active structures: an introduction. 2-nd Ed. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers; 2002. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2033-6>
22. Poojara S.D., Patel P.V. Axial deformation of columns in multi-story R.C. buildings. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014;5(3):294–300.
23. Sonmez M. Artificial bee colony algorithm for optimization of truss structures. *Applied Soft Computing*. 2011;11:2406–2418.

References

1. *Bondarev A.B., Yugov A.M.* Computer program "Computational complex "Dimensional analysis of rod structures" ("VK RASK"). Copyright certificate 47952 Ukraine; 20.02.2013 (in Russian).
2. *Barabash M.S.* The methods of computer simulation erection process of high-rise buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012;8(3):58–67 (in Russian).
3. *Belostotsky A.M., Pavlov A.S.* Complex finite element modeling of VAT and stability of the mesh shell covering a large-span structure with elastomeric supports. *International Journal of Computational Civil and Construction Engineering*. 2014;10(3):64–70 (in Russian).
4. *Bondarev A.B., Yugov A.M.* Assessment of installation efforts in a metal coating taking into account assembly. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*. 2015;56(4):28–37 (in Russian).
5. *Gvamichava A.S.* Development and implementation of design forms and methods of calculation of large-sized space antenna structures: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow: TSNIIPSK named after N.P. Melnikov; 1984 (in Russian).
6. *Kassikhina E.G.* A new constructive form of a multi-purpose overhead copra. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(8):56–60 (in Russian).
7. *Kirsanov M.N.* Inductive analysis of the influence of mounting errors on the rigidity and strength of a flat truss. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*. 2012;(5):38–42 (in Russian).
8. *Lebed' E.V., Grigoryan A.A.* The influence of the mounting design schemes of the edges of a two-belt metal dome on the initial efforts to eliminate errors. *Vestnik MGSU*. 2015;(8):66–79 (in Russian).
9. *Moiseev M.V.* Initial efforts and assemblability of steel structural structures with random deviations of rod lengths [dissertation]. Kazan: Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 2004 (in Russian).
10. *Norov Yu.D.* Scientific support of mining and metallurgical production. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(8):56–60 (in Russian).
11. *Perelmuter A.V., Kabantsev O.V.* Consideration of changes in the stiffness of elements during installation and operation. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*. 2015;(1):6–14 (in Russian).
12. *Savelyev V.A.* Theoretical foundations of the design of metal domes [dissertation]. Moscow: TSNIISK named after Melnikov; 1995 (in Russian).
13. *Yugov A.M., Malash E.A., Bondarev A.B.* Experience of installation of technological equipment of the enrichment tailings thickener No. 1 of the Natalka mining and processing plant. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve [Assembly and special works in construction]*. 2016;(10):2–6 (in Russian).
14. *Mahovič A.* Typology of Retractable Roof Structures in Stadiums and Sports Halls. *Igra ustvarjalnosti – Creativity game*. 2015;3:90–99. <https://doi.org/10.15292/iu-cg.2015.03.090-099>
15. *Bondarev A.B., Yugov A.M.* The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015;117:953–963. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.188>
16. *Jadhav H.S., Patil Ajit S.* Parametric study of double layer steel dome with reference to span to height ratio. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2013;2(8):110–118.
17. *Jianguo Cai, Jian Feng, Chao Jiang.* Development and analysis of a long span retractable roof structure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;92:175–182. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.09.006>
18. *Kabantsev O.V., Perelmuter A.V.* Modeling Transition in Design Model when Analyzing Specific Behaviors of Structures. *Procedia Engineering*. 2013;57:479–488. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.062>
19. *Kim H.S., Shin A.K.* Column shortening analysis with lumped construction sequence. *Procedia Engineering*. 2011;14:1791–1798. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.225>
20. *Patidar S., Gandhe V.* Typology of Retractable Roof Structure. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2017;3(3):556–560.
21. *Preumont A.* Vibration control of active structures: an introduction. 2-nd Ed. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers; 2002. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2033-6>
22. *Poojara S.D., Patel P.V.* Axial deformation of columns in multi-story R.C. buildings. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014;5(3):294–300.
23. *Sonmez M.* Artificial bee colony algorithm for optimization of truss structures. *Applied Soft Computing*. 2011;11:2406–2418.

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Борисович Бондарев✉, руководитель проектов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru, abondarev@niizhb-fgup.ru

Alexey B. Bondarev✉, Project Manager of the NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru, abondarev@niizhb-fgup.ru

Анатолий Михайлович Югов, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Технология и организация строительства», государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ГОУ ВПО ДонНАСА), Макеевка

e-mail: amyrus@mail.ru

Anatoliy M. Yugov, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department "Technology and Construction Management" of the State Educational Institution of Higher Professional Education "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture" (SEI HPE DonNACEA), Makeyevka

e-mail: amyrus@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author