

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-19-29  
УДК 624.07

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Расчетная оценка влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности многоярусных промышленных металлоконструкций (этажерок) в рамках научно-технического сопровождения строительства

А.М. Белостоцкий<sup>1,2</sup>, Д.С. Дмитриев<sup>2\*</sup>, С.О. Петряшев<sup>2</sup>, Т.Е. Нагибович<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26<sup>2</sup>ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», Российская Федерация, 125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д. 18  
\*stadyo@stadyo.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 16 января 2021 г.  
Доработана: 18 февраля 2021 г.  
Принята к публикации: 20 февраля 2021 г.

### Для цитирования

Белостоцкий А.М., Дмитриев Д.С., Петряшев С.О., Нагибович Т.Е. Расчетная оценка влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности многоярусных промышленных металлоконструкций (этажерок) в рамках научно-технического сопровождения строительства // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 19–29. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-19-29>

**Аннотация.** Рассматривается важный сегмент научно-технического сопровождения (НТС) строительных объектов на этапе строительства, а именно оценка влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности несущих металлоконструкций. В качестве примера выступает многоярусное промышленное сооружение (технологическая этажерка), на котором продемонстрированы основные особенности такой оценки. Представлен подход к анализу исполнительной документации и выбору наиболее значимых отклонений конструктивных элементов металлоконструкций от проектного положения. Исследовано влияние учета последовательности монтажа (генетической нелинейности) при расчетной оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, смонтированных с геометрическими отклонениями от проектного положения. Сопоставлены результаты динамического и статического анализа проектной и фактической (с учетом геометрических отклонений) моделей технологической этажерки. Сформированы методические рекомендации для реализации расчетной оценки влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности схожих каркасных систем.

**Ключевые слова:** научно-техническое сопровождение, начальные несовершенства, отклонения от проекта, расчетное обоснование, метод конечных элементов, генетическая нелинейность

**Белостоцкий Александр Михайлович**, генеральный директор НИЦ СтаДиО, профессор кафедры прикладной математики НИУ МГСУ, доктор технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 8372-9904, Scopus Author ID: 36771895000, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3727-2168>.

**Дмитриев Дмитрий Сергеевич**, заведующий отделом расчетных исследований, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 7607-6978, Scopus Author ID: 57204526893.

**Петряшев Сергей Олегович**, ведущий инженер отдела расчетных исследований; eLIBRARY SPIN-код: 5646-4982, Scopus Author ID: 56433506500.

**Нагибович Татьяна Евгеньевна**, инженер отдела расчетных исследований; eLIBRARY SPIN-код: 2099-6520, Scopus Author ID: 57196032819.

© Белостоцкий А.М., Дмитриев Д.С., Петряшев С.О., Нагибович Т.Е., 2021

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Calculated assessment of the impact of geometric deviations from the design on the parameters of mechanical safety of building metal structures within the framework of scientific and technical support for construction

Alexander M. Belostotsky<sup>1,2</sup>, Dmitry S. Dmitriev<sup>2\*</sup>, Sergey O. Petryashev<sup>2</sup>, Tatyana E. Nagibovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

<sup>2</sup>Research and Development Center StaDiO, 18 3rd Yamskogo Polya St, Moscow, 125124, Russian Federation

\*stadyo@stadyo.ru

### Article history

Received: January 16, 2021

Revised: February 28, 2021

Accepted: February 20, 2021

### For citation

Belostotsky A.M., Dmitriev D.S., Petryashev S.O., Nagibovich T.E. Calculated assessment of the impact of geometric deviations from the design on the parameters of mechanical safety of building metal structures within the framework of scientific and technical support for construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(1):19–29. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-19-29>

**Abstract.** An important part of scientific and technical support of civil engineering facilities at a construction stage – evaluation of influence of fluctuations from a designed geometry onto mechanical safety parameters of load-bearing metal structures – is considered. A multi-tier structure (industrial frame tower) is employed to demonstrate main features of such an assessment. Given is an approach to an analysis of as-built documentation and to a choice of most significant fluctuations of structural metal elements from a designed geometry. Effect of erection sequence being taken into consideration, the so-called genetic non-linearity, during computational estimation of a stress-strain state of metal structures mounted with deviations from their design positions is investigated. Results of static and dynamic analyses of designed and as-built (with geometry fluctuations taken into consideration) models of the multi-level industrial frame tower are obtained and compared with each other. Basing on these results, guidelines for computational assessment of effects of fluctuations from a designed geometry onto mechanical safety parameters of similar frame systems are formulated.

**Keywords:** scientific and technical support, initial imperfections, deviations from the project, calculation justification, finite element method, genetic non-linearity

### Введение

Согласно п. 10.5 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» научно-техническое сопровождение (НТС) объектов повышенного уровня ответственности (класса КС-3) предусматривается при проектировании, изготовлении и монтаже конструкций, а также их технический мониторинг при возведении и эксплуатации [1; 2]. И если формат научно-технического сопровождения на этапе проектирования устоялся и отчасти сформирован требованиями государственной экспертизы и нормативными документами [3–5], то НТС на этапе строительства зачастую отсутствует или имеет формальный характер. Тем не менее в современной строительной практике встречаются случаи, когда проведение всестороннего научно-технического сопровождения с опорой на математическое моделирование является обязательным и безальтернативным.

Имеются прецеденты, когда объекты повышенного класса ответственности, проекты которых получили положительное заключение государственной экспертизы, на этапе строительства монтируются со значимыми геометрическими отклонениями от проекта, превышающими предельно допустимые значения в соответствии с табл. 4.9 и 4.10 СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции». В таком случае надзорные органы не могут принять объект в эксплуатацию и выдают предписания по устранению дефектов монтажа. Устранить эти отклонения без полного демонтажа металлоконструкции чаще всего невозможно. Единственным выходом из такой ситуации является оценка технического состояния

*Alexander M. Belostotsky*, General Director of the RDC StaDiO, Professor of the Department of Applied Mathematics of the NRU MGSU, Doctor of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 8372-9904; Author ID: 16677; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3727-2168>.

*Dmitry S. Dmitriev*, Head of Computational Research Department, PhD of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 7607-6978, Scopus Author ID: 57204526893.

*Sergey O. Petryashev*, leading engineer of Computational Research Department; eLIBRARY SPIN-code: 5646-4982, Scopus Author ID: 56433506500.

*Tatyana E. Nagibovich*, engineer of Computational Research Department; eLIBRARY SPIN-code: 2099-6520, Scopus Author ID: 57196032819.

смонтированных с отклонениями строительных конструкций с необходимыми расчетами в рамках НТС строительства. Положительная оценка является основанием для ввода в эксплуатацию строительного объекта и рекомендуется ФАУ «Главгосэкспертиза России» со ссылкой на ГОСТ 27751-2014.

Вопросам учета отклонений от проекта для железобетонных монолитных сооружений посвящен ряд работ [6–11]. Настоящая статья посвящена многоярусным промышленным металлоконструкциям (этажеркам) и оценке параметров их механической безопасности с учетом фактических геометрических отклонений от проекта, что является актуальной инженерной задачей и имеет ряд особенностей, связанных с расчетным обоснованием.

Фактические геометрические отклонения конструктивных элементов сооружения чаще всего являются результатом совокупности нескольких элементарных ошибок, допускаемых при изготовлении, обработке и сборке монтажного элемента. Значения предельно допустимых отклонений конструктивных элементов от проектного положения перечислены в табл. 4.9 и 4.10 СП 70.13330.2012, который в свою очередь «унаследовал» их из соответствующих разделов СНиП III-18-75 «Правила производства и приемки работ».

### Проведение расчетной оценки влияния геометрических отклонений

Методика проведения расчетной оценки влияния геометрических отклонений на параметры механической безопасности металлоконструкции, а также некоторые особенности таких расчетов показаны на примере технологической этажерки (рис. 1), смонтированной с выявленными по результатам обследования геометрическими отклонениями от проекта, некоторые из которых превышают предельно допустимые значения по СП 70.13330.2012. Рассматриваемое сооружение представляет собой рамно-связевой каркас на железобетонном основании (монолитная плита) с размерами в плане 26×36 м и высотой 68,60 м. Пространственная жесткость и геометрическая неизменяемость конструкций технологической этажерки обеспечивается рамами с жестким защемлением колонн в фундаменты, а также вертикальными и горизонтальными связями между металлическими колоннами.

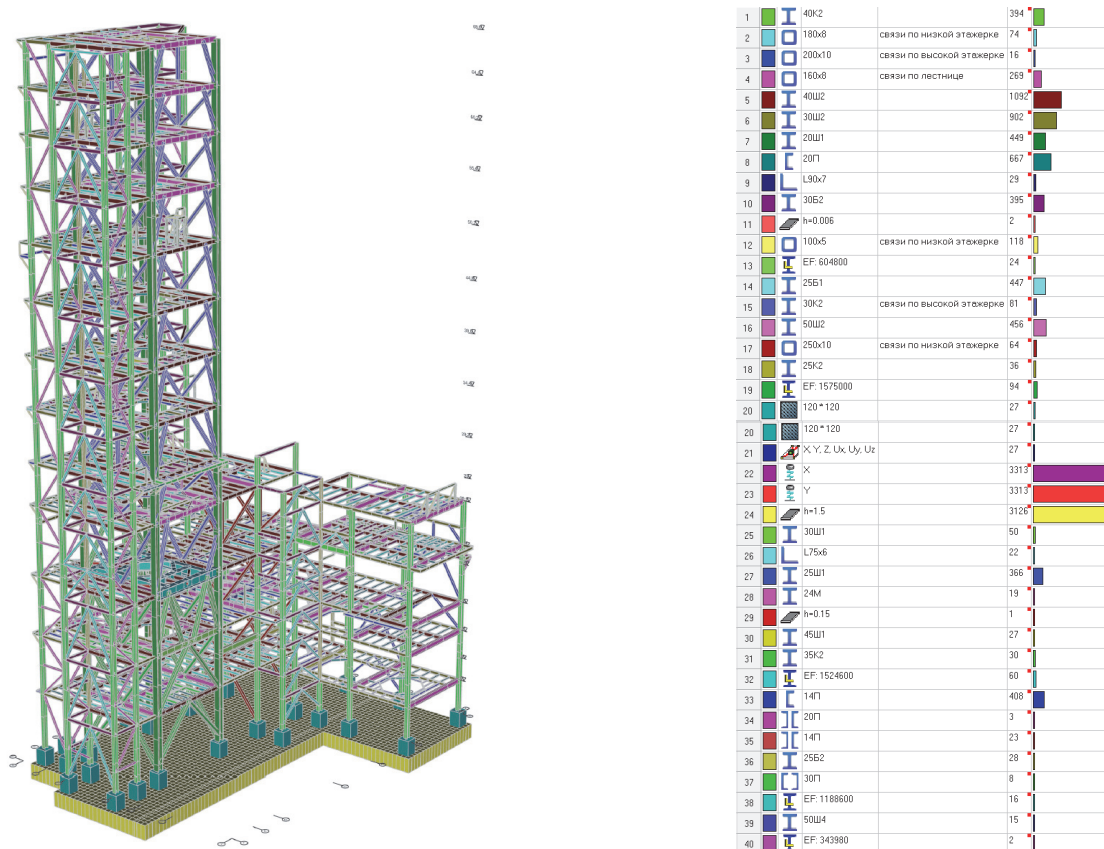
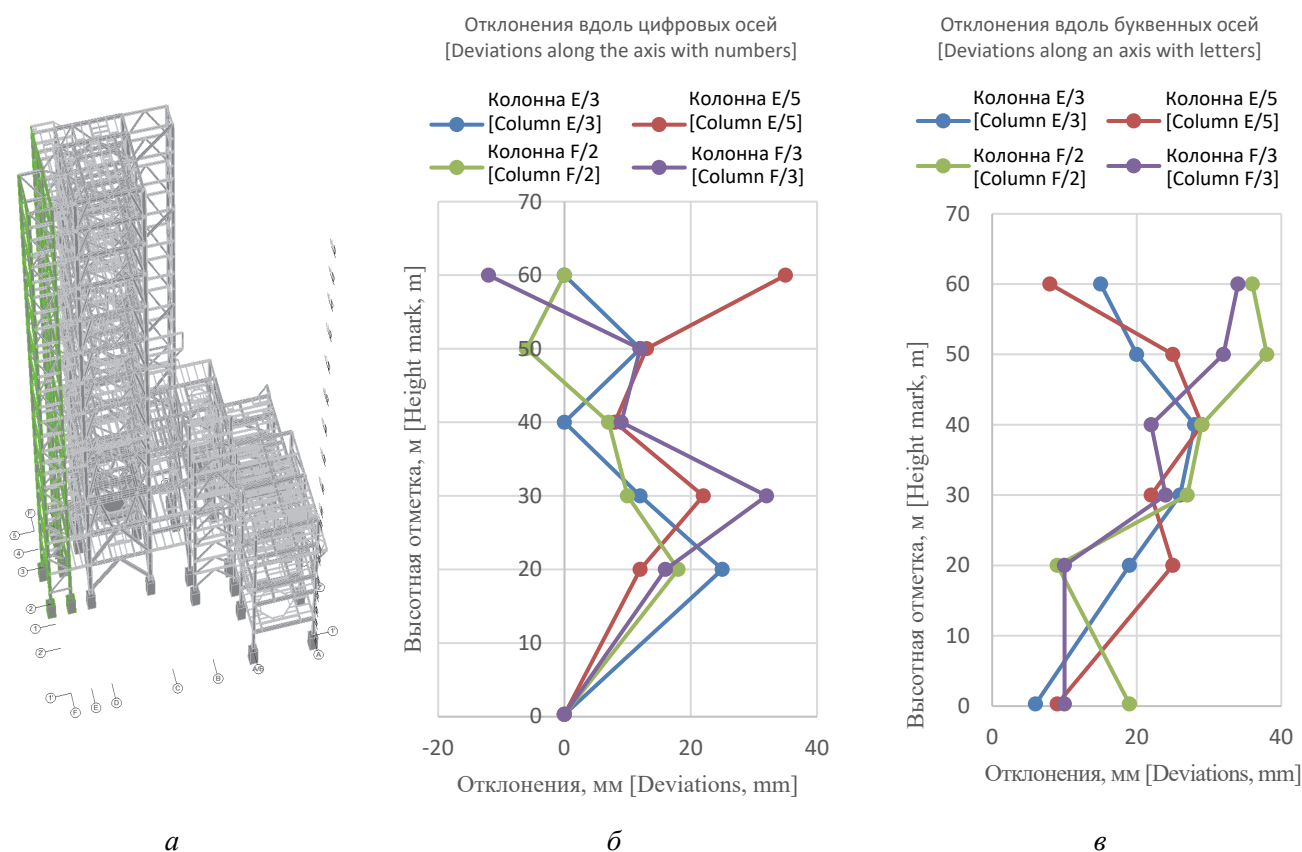


Рис. 1. Общий вид технологической этажерки  
[Figure 1. General view of the technological stack]

**Анализ исполнительной документации.** На первом этапе расчетной оценки влияния фактических отклонений металлоконструкций выполнен всесторонний анализ исполнительных схем, которые являются частью рабочей документации и представляют собой комплект чертежей, отражающих фактическое исполнение проектных решений. По результатам проведенного анализа отмечены все элементы конструкций (колонны и опоры, балки, ригели), в которых отклонение от проектного положения (плановое или высотное) превышает предельно допустимые значения.

Наибольший интерес с точки зрения влияния на механическую безопасность конструкций представляет планово-высотное положение вертикальных несущих конструкций (колонн), так как отклонение вертикального несущего элемента вносит более существенный вклад в напряженно-деформированное состояние конструкции, чем плановое смещение горизонтальных несущих элементов (балок) [12; 13]. Указанные дефекты изменяют расчетную схему, вызывают дополнительные моменты в колоннах вследствие эксцентричного приложения нагрузок от балок и элементов покрытия и могут привести к преждевременной потере устойчивости.

В итоге из всех выявленных типов отклонений были отобраны только планово-высотные отклонения колонн, превышающие предельно допустимые значения. Эти отклонения были локализованы в двух соседних рамах по осям *F* и *E* (рис. 2). Максимальное горизонтальное отклонение колонны от проектной отметки составило 38 мм при предельно допустимых значениях  $\pm 5$  мм. Колонны в остальных рамах (кроме рам по осям *F* и *E*), согласно исполнительной документации, не имели отклонений, превышающих предельно допустимые значения, их положение в расчетной схеме оставалось согласно проекту.



**Рис. 2.** Оси с наибольшими плановыми отклонениями колонн (*a*, отмечены зеленым) и графики максимальных отклонений колонн от проектного положения (*б, в*)  
[Figure 2. The axes with the largest planned deviations of the columns (*a*, marked in green) and graphs of the maximum deviations of the columns from the design position (*б, в*)]

Следует отметить, что поэтажные исполнительные схемы, отражающие положение смонтированных конструктивных элементов, выполняются поэтапно вместе со стадиями монтажа металлоконструкций этажерки (ярус за ярусом). Поэтому на завершающих стадиях монтажа, когда геодезическая съемка для исполнительной документации производится на верхних отметках, свой вклад в геометрические отклонения конструкции могут вносить деформации нижележащих конструкций от нагрузок, таких как собственный

вес и часть эксплуатационных нагрузок (в зависимости от технологии монтажа). Принимая во внимание вышеизложенное, были проведены расчетные исследования, отражающие влияние учета последовательности монтажа и нагружения (генетической нелинейности) на итоговое НДС несущих конструкций.

**Учет влияния последовательности монтажа на геометрические отклонения.** В рамках этих исследований разработана расчетная модель в программном комплексе SCAD Office 21 на основе проектной (без отклонений) модели сооружения в соответствии с фактическими стадиями монтажа и нагружения технологической этажерки. Согласно исполнительной документацией, монтаж сооружения включал 12 стадий – это последовательное возведение основных несущих конструкций и настила 12 ярусов до отметки 68,600 м и приложение на последней стадии всех эксплуатационных нагрузок.

Результаты расчетов по модели с учетом монтажа (генетически нелинейная модель 1) сопоставлялись с исходной проектной одномоментной схемой (модель 2). Для данных верификационных задач расчеты проводились на жестком основании, чтобы исключить влияние основания.

Для каждой из моделей сопоставлялись результаты для двух расчетных случаев:

- 1) учтены только накопительные нагрузки (собственный вес и вес настила), характерные непосредственно для возведения конструкции;
- 2) рассмотрено основное сочетание с влиянием всех вертикальных нагрузок.

При расчете только на накопительные нагрузки (собственный вес металлоконструкций и вес настила) проявляется влияние учета монтажа. Для этого расчетного случая наблюдается как качественные, так и количественные отличия в картинах деформирования, однако количественные значения разности перемещений (максимально 1,61 мм) значительно меньше отклонений от проектного положения по исполнительным схемам (от 5 мм до нескольких десятков мм).

При расчете на основное сочетание нагрузок картины деформирования несущих конструкций практически идентичны. Добавление всех нагрузок на последнем шаге монтажа выравнивает результаты для обеих расчетных схем. Влияние только собственного веса мало, по сравнению с остальными нагрузками, что характерно для подобных металлоконструкций.

Анализ полученных результатов показал незначительное влияние последовательности монтажа на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций, следовательно, для оценки параметров механической безопасности рассматриваемой конструкции с отклонениями от проекта не требуется учитывать последовательность монтажа. Основываясь на полученных выводах, дальнейшие расчетные исследования фактической модели сооружения проведены по одномоментной схеме.

Построение фактической модели, проводилось путем корректировки проектной. На соответствующих высотных отметках было задано смещение узлов колонн на необходимое значение, согласно исполнительным схемам. Далее были проведены расчеты на основное и особое сочетание нагрузок по фактической и проектной моделям, а результаты сопоставлены.

**Результаты расчетных исследований.** Определение собственных частот и форм колебаний механических систем – едва ли не самая информативная верификационная задача, интегрирующая многие факторы и параметры расчетной модели и в то же время позволяющая выявить их различие. Поэтому на первом этапе был проведен модальный анализ обеих моделей технологической этажерки. Отметим, что динамические характеристики для фактической модели весьма близки с проектной. Наиболее значимое отличие между фактической и проектной моделями отмечено для третьей собственной формы колебаний и не превышает 1 % (табл. 1). Это объясняется тем, что на третьей собственной форме колеблется фрагмент технологической этажерки, в который вносились фактические отклонения (оси  $F$  и  $E$ ).

Сопоставление результатов статического расчета проектной и фактической моделей на основные сочетания нагрузок представлено в табл. 2. Максимальные перемещения от нормативных нагрузок отличаются только по горизонтальному направлению (разница составляет 0,21 %). Максимальные усилия по основным группам конструктивных элементов отличаются также незначительно (разница не более 3,25 %).

В рамах, в которых зафиксированы максимальные отклонения от проекта, отличия по усилиям в отдельно взятых локальных элементах достигает 5 %. При этом следует заметить, что в отдельных случаях усилия по фактической модели меньше, что объясняется незначительным перераспределением усилий за счет геометрических отклонений несущих элементов.

Максимальные коэффициенты использования по группам конструктивных элементов для проектной и фактической моделей технологической этажерки практически не изменились. При рассмотрении отдельных рам можно выделить отличия в коэффициентах использования несущей способности по отдельно взятым локальным элементам, которые не превышают 10 % (рис. 3–6).

Таблица 1

**Частоты собственных колебаний**  
 [Table 1. Frequencies of natural vibrations]

Номер собственной формы [Custom form number]	Значение собственной частоты, Гц [Natural frequency value, Hz]		Отклонение, % [Deviation, %]
	Проектная модель [Design model]	Фактическая модель [Actual model]	
1	0,5480	0,5480	0,0000
2	0,6200	0,6201	0,0161
3	1,0260	1,0244	0,1562
4	1,0893	1,0893	0,0000
5	1,3484	1,3484	0,0000
6	1,3614	1,3613	0,0073
7	1,4699	1,4697	0,0136
8	1,6114	1,6115	0,0062
9	1,8273	1,8271	0,0109
10	1,8748	1,8748	0,0000

Таблица 2

**Параметры НДС при основном сочетании нагрузок**  
 [Table 2. Parameters of the stress-strain state at the main combination of loads]

Наименование параметра [Parameter name]	Проектная модель [Design model]	Фактическая модель [Actual model]	Отклонение, % [Deviation, %]
Максимальные вертикальные перемещения (нормативные нагрузки без учета коэффициента $\gamma_n$ ) [Maximum vertical displacements (standard loads excluding $\gamma_n$ coefficient)]	84,67 мм [mm]	84,67 мм [mm]	0,00
Максимальные перемещения вдоль оси $X$ (нормативные нагрузки без учета коэффициента $\gamma_n$ ) [Maximum displacements along the $X$ -axis (standard loads excluding $\gamma_n$ coefficient)]	107,27 мм [mm]	107,50 мм [mm]	0,21
Максимальные перемещения вдоль оси $Y$ (нормативные нагрузки без учета коэффициента $\gamma_n$ ) [Maximum displacements along the $Y$ -axis (standard loads excluding $\gamma_n$ coefficient)]	160,57 мм [mm]	160,48 мм [mm]	0,06
Максимальные усилия в металлических колоннах – двутавр 40К2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal columns – I-beam 40K2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -76,74$ Т [t] $M_y = -30,34$ Т×м [t×m] $M_z = -14,39$ Т×м [t×m]	$N_x = -76,71$ Т [t] $M_y = -31,28$ Т×м [t×m] $M_z = -14,40$ Т×м [t×m]	0,01 3,10 0,07
Максимальные усилия в металлических балках – двутавр 40Ш2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal beams – I-beam 40SH2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = 113,62$ Т [t] $M_y = -34,09$ Т×м [t×m]	$N_x = 113,72$ Т [t] $M_y = -34,15$ Т×м [t×m]	0,09 0,18
Максимальные усилия в металлических балках – двутавр 30Ш2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal beams – I-beam 30SH2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = 81,82$ Т [t] $M_y = 14,30$ Т×м [t×m]	$N_x = 81,71$ Т [t] $M_y = 14,31$ Т×м [t×m]	0,13 0,07
Максимальные усилия в металлических балках – двутавр 30Б2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal beams – I-beam 30B2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -40,01$ Т [t] $M_y = 2,64$ Т×м [t×m]	$N_x = -39,92$ Т [t] $M_y = 2,64$ Т×м [t×m]	0,23 0,00
Максимальные усилия в металлических балках – двутавр 50Ш2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal beams – I-beam 50SH2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = 102,89$ Т [t] $M_y = -57,27$ Т×м [t×m]	$N_x = 102,90$ Т [t] $M_y = -59,13$ Т×м [t×m]	0,01 3,25



Наименование параметра [Parameter name]	Проектная модель [Design model]	Фактическая модель [Actual model]	Отклонение, % [Deviation, %]
Максимальные усилия в металлических балках – двутавр 25Ш1 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in metal beams – I-beam 25SH1 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = 5,23 \text{ т [t]}$ $M_y = 4,95 \text{ т}\times\text{м [t}\times\text{m]}$	$N_x = 5,08 \text{ т [t]}$ $M_y = 4,95 \text{ т}\times\text{м [t}\times\text{m]}$	2,95 0,00
Максимальные усилия в связях – тр.□160×8 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – tr.□160×8 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -48,57 \text{ т [t]}$	$N_x = -48,56 \text{ т [t]}$	0,02
Максимальные усилия в связях – тр.□100×5 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – tr.□100×5 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -14,79 \text{ т [t]}$	$N_x = -14,78 \text{ т [t]}$	0,07
Максимальные усилия в связях – тр.□180×8 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – tr.□180×8 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -44,77 \text{ т [t]}$	$N_x = -44,80 \text{ т [t]}$	0,07
Максимальные усилия в связях – тр.□250×10 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – tr.□250×10 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -136,17 \text{ т [t]}$	$N_x = -136,27 \text{ т [t]}$	0,07
Максимальные усилия в связях – тр.□200×10 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – tr.□200×10 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -66,99 \text{ т [t]}$	$N_x = -67,20 \text{ т [t]}$	0,31
Максимальные усилия в связях – двутавр 30К2 (расчетные нагрузки с учетом коэффициентов $\gamma_f$ и $\gamma_n$ ) [Maximum efforts in ties – I-beam 30K2 (design loads taking into account the coefficients $\gamma_f$ and $\gamma_n$ )]	$N_x = -146,38 \text{ т [t]}$	$N_x = -146,37 \text{ т [t]}$	0,01

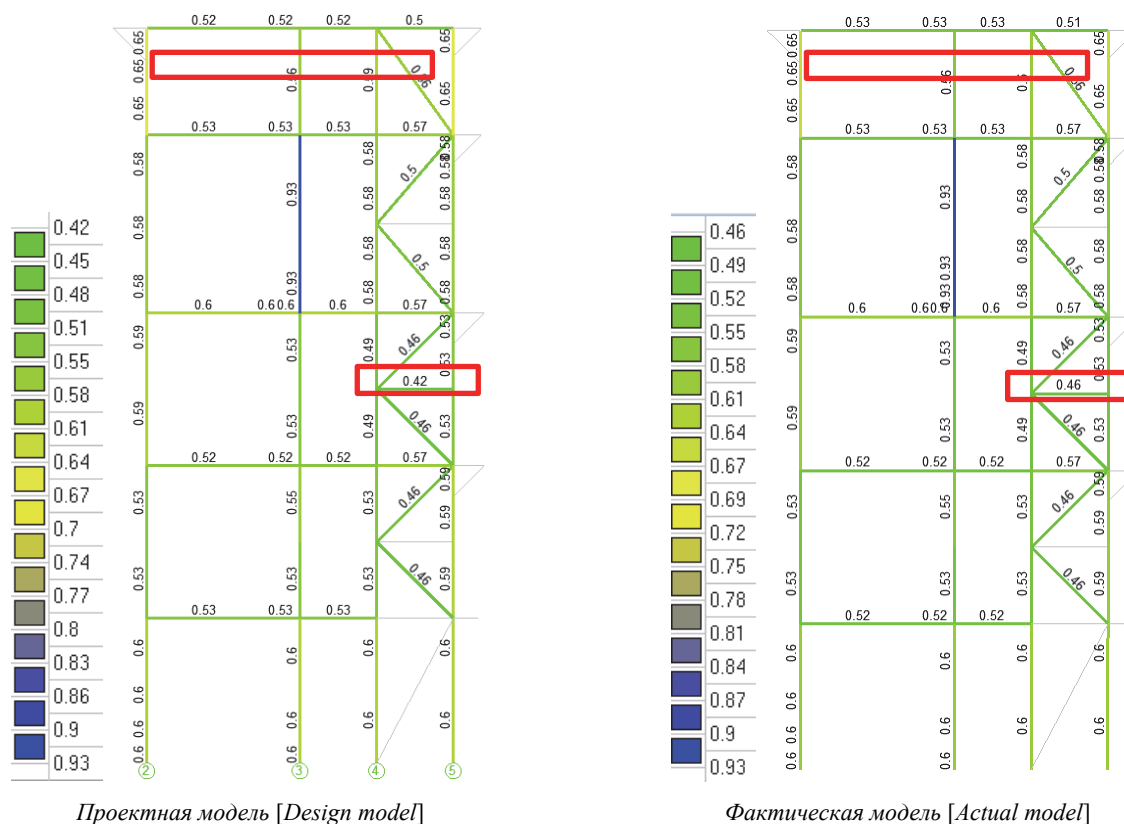
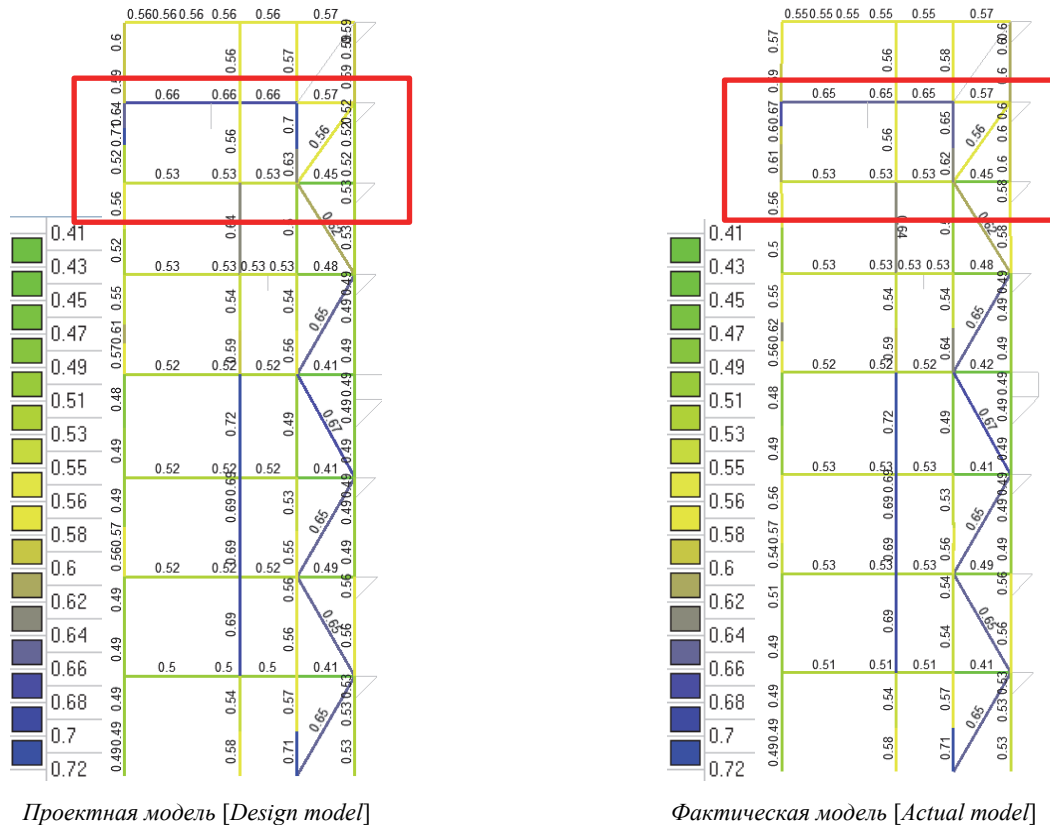
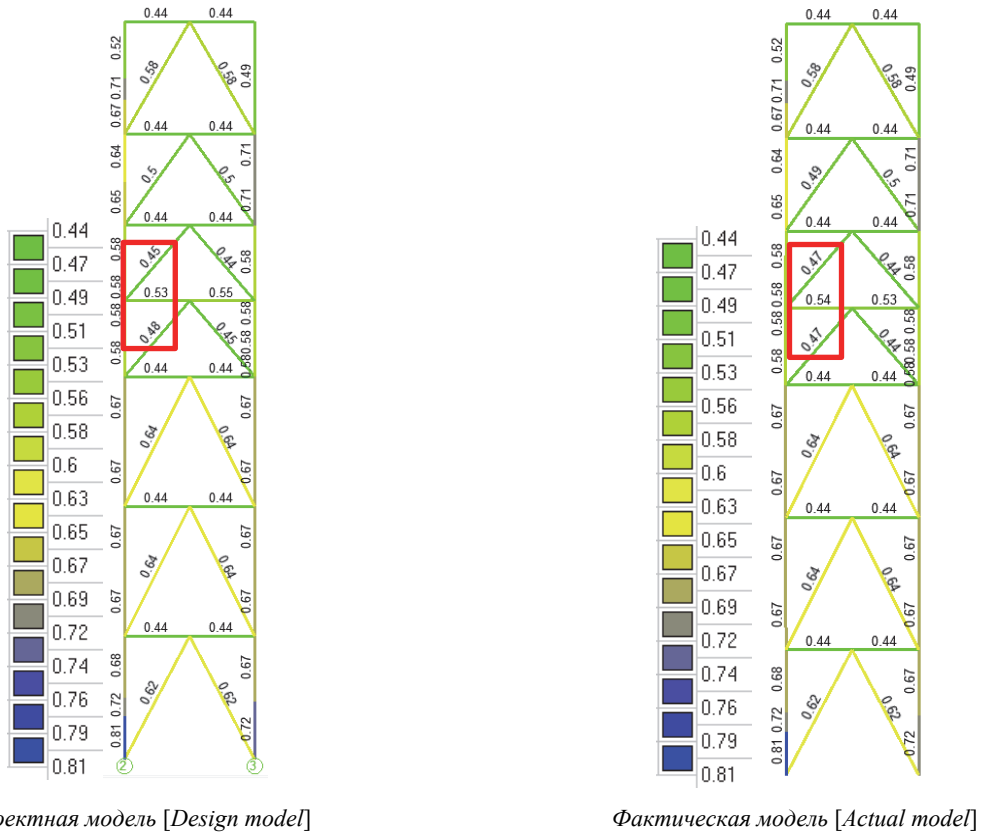


Рис. 3. Коэффициенты использования. Рама по оси E/2–5 на отметках 0–29,2  
[Figure 3. Usage factors. Frame along the E/2–5 axis at marks 0–29.2]



**Рис. 4.** Коэффициенты использования. Рама по оси E/2–5 на отметках 29,2–68,3  
 [Figure 4. Usage factors. Frame along the E/2–5 axis at 29.2–68.3]



**Рис. 5.** Коэффициенты использования. Рама по оси F/2–3 на отметках 0,0–34,4  
 [Figure 5. Usage factors. Frame along the F/2–3 axis at 0.0–34.4 marks]



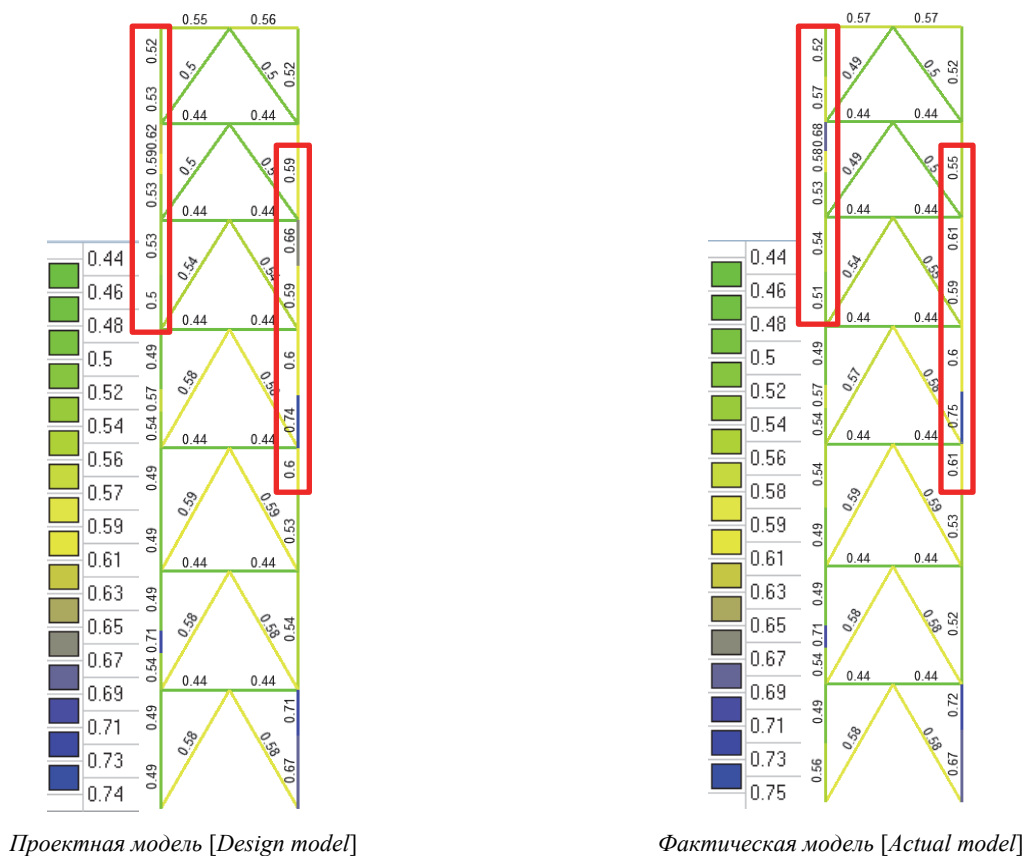


Рис. 6. Коэффициенты использования. Рама по оси F/2–3 на отметках 34,4–68,6  
 [Figure 6. Usage factors. Frame along the F/2–3 axis at 34.4–68.6]

Для представленной конструкции помимо расчетов на основные сочетания нагрузок также были проведены расчеты на особые сочетания (устойчивость к прогрессирующему обрушению). Рассматривались два сценария локального разрушения – удаление наиболее нагруженных колонн по осям *E* и *F*. Результаты показали схожую картину с расчетами на основное сочетание. Усилия в отдельных элементах изменились в пределах 5 %, при этом коэффициенты использования изменились в пределах 10 %. Фактор, по которому реализовано максимальное значение коэффициента использования, – прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов. При этом конструкция удовлетворяет нормативным требованиям прочности, жесткости и устойчивости.

Анализ полученных данных показывает незначительное влияние фактических отклонений от проекта на несущую способность конструкций технологической этажерки. Данный вывод применим только к конкретному сооружению с определенными значениями геометрических отклонений от проекта. Распространять полученные результаты на другие сооружения данного типа недопустимо. Это связано с тем, что геометрические отклонения от проекта в отдельных элементах конструкции могут создавать бесконечное множество комбинаций для сооружения в целом, а следовательно, и вариантов картины фактического НДС может быть очень много.

### Заключение

На основании проведенных расчетных исследований, представленных в статье, можно сформулировать ряд методических указаний и рекомендаций для проведения расчетного анализа металлических конструкций типа многоярусных металлических этажерок при оценке влияния геометрических отклонений от проекта:

1. Последовательность монтажа и нагружения конструкции незначительно влияет на результирующее напряженно-деформированное состояние многоярусных промышленных металлоконструкций (этажерок). При анализе влияния отклонений от проекта (для рассматриваемого типа сооружений) расчеты с учетом генетической нелинейности (последовательности монтажа) обоснованно можно не проводить.

2. Наибольшее влияние на изменение НДС конструкции оказывают горизонтальные отклонения вертикальных несущих элементов. Поэтому отклонениями горизонтальных несущих элементов в уровне перекрытия (которые по своим значениям значительно меньше размеров сечений основных элементов) можно обоснованно пренебречь.

3. Рекомендуется проводить анализ исполнительных схем по горизонтальным отклонениям вертикальных несущих элементов и задавать их максимальное значение в расчетной схеме как минимум на двух соседних рамах.

4. Если в фактической расчетной схеме усилия и коэффициенты использования в отдельных конструктивных элементах конструкции при основном сочетании нагрузок увеличиваются по сравнению с проектной схемой не более чем на 10 % (при условии, что максимальный коэффициент использования ниже 0,95), можно обоснованно отказаться от расчета на прогрессирующее обрушение по фактической схеме.

Предложенный и рассмотренный в настоящей статье подход предварительного анализа чувствительности к геометрическим отклонениям от проекта (с выработкой рекомендаций по упрощенному расчетному анализу) можно распространить на иные конструктивные схемы.

### Список литературы

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Т. 1. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. М.: Издательство АСВ, 2016. 426 с.
2. Белостоцкий А.М., Акимов П.А. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Т. 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. М.: Издательство АСВ, 2016. 426 с.
3. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Dmitriev D.S., Nagibovich A.I. Computational analysis of the stress-strain state, strength and stability of tallest skyscraper of the Moscow International Business Center with allowance for static and wind loads and hypothetical local damage // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 2. Pp. 022066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022066>
4. Belostotsky A.M., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Y.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S., Akimov P.A., Sidorov V.N. Computer-aided analysis of mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018 in Russia. Part 1. Introduction, creation of finite element models, structural analysis at basic combinations of loads and impacts // 2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). IEEE, 2019. Pp. 21–29.
5. Belostotsky A.M., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Y.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S., Akimov P.A., Kayukov T.B., Sidorov V.N. Computer-aided analysis of mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018 in Russia. Part 2. Structural analysis at special combinations of loads and impacts, structural health monitoring // 2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). IEEE, 2019. Pp. 30–37.
6. Свинцова А. Влияние отклонения осей колонн от вертикали на несущую способность фундаментов // Вестник магистратуры. 2017. № 2–2. С. 44–45.
7. Уваров С. Об учете влияния начальных горизонтальных отклонений при производстве работ на несущую способность конструкций монолитных железобетонных каркасных зданий // Вестник ТвГТУ. 2016. Т. 184. № 2 (30). С. 114–117.
8. Обухова Т., Кузнецов О. Влияние отклонения осей колонн от вертикали на несущую способность фундаментов // Вестник ОГУ. 2007. № 2. С. 169–171.
9. Игошин В., Лебедев В. Учет начальных отклонений от вертикали колонн каркасных зданий на их несущую способность // Жилищное строительство. 2011. № 7. С. 30–34.
10. Kasama K., Whittle A.J., Kitazume M. Effect of spatial variability of block-type cement-treated ground on the bearing capacity of foundation under inclined load // Soils and Foundations. 2019. Vol. 59. Pp. 2125–2143. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.007>
11. Wang J., Wan Ch., Zeng Q., Shen L., Malik M.A., Yan D. Effect of eccentricity on retrofitting efficiency of basalt textile reinforced concrete on partially damaged masonry columns // Composite Structures. 2020. Vol. 232. P. 111585. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111585>
12. Belostotsky A.M. et al. Adaptive finite-element models in structural health monitoring systems // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 2 (78). Pp. 169–178.
13. Kayukov T.B., Belostotsky A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical and computer modelling as the basis of structural health monitoring // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 456. Issue 1. Pp. 01207. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012072>

### References

1. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Aktual'nye problemy chislenного modelirovaniya zdaniy, sooruzhenij i kompleksov. T. 1. K 25-letiyu Nauchno-issledovatel'skogo centra StaDiO [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes. Vol. 1. To the 25th anniversary of the Research and Development Center StaDiO]. Moscow: ASV Publishing House; 2016. (In Russ.)

2. Belostotsky A.M., Akimov P.A. Aktual'nye problemy chislennogo modelirovaniya zdaniy, sooruzhenij i kompleksov. T. 2. K 25-letiyu Nauchno-issledovatel'skogo centra StaDyO [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes. Vol. 2. To the 25th anniversary of the Research and Development Center StaDiO]. Moscow: ASV Publishing House; 2016. (In Russ.)
3. Belostosky A.M., Akimov P.A., Dmitriev D.S., Nagibovich A.I. Computational analysis of the stress-strain state, strength and stability of tallest skyscraper of the Moscow International Business Center with allowance for static and wind loads and hypothetical local damage. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;698:022066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022066>
4. Belostotsky A.M., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Y.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S., Akimov P.A., Sidorov V.N. Computer-aided analysis of mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018 in Russia. Part 1. Introduction, creation of finite element models, structural analysis at basic combinations of loads and impacts. *2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. IEEE; 2019. p. 21–29.
5. Belostotsky A.M., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Y.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S., Akimov P.A., Kaytukov T.B., Sidorov V.N. Computer-aided analysis of mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018 in Russia. Part 2. Structural analysis at special combinations of loads and impacts, structural health monitoring. *2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. IEEE; 2019. p. 30–37.
6. Svintsova A. Influence of the deviation of the axes of the columns from the vertical on the bearing capacity of the foundations. *Magistracy Bulletin*. 2017;2(2):44–45. (In Russ.)
7. Uvarov S. On taking into account the influence of initial horizontal deviations in the production of work on the bearing capacity of structures of monolithic reinforced concrete frame buildings. *Vestnik TvSTU*. 2016;2(30):114–117.
8. Obukhova T., Kuznetsov O. The influence of the deviation of the axes of the columns from the vertical on the bearing capacity of foundations. *Vestnik OSU*. 2007;(2):169–171.
9. Igoshin V., Lebedev V. Taking into account the initial deviations from the vertical of the columns of frame buildings for their bearing capacity. *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2011;(7):30–34.
10. Kasama K., Whittle A.J., Kitazume M. Effect of spatial variability of block-type cement-treated ground on the bearing capacity of foundation under inclined load. *Soils and Foundations*. 2019;59:2125–2143. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.007>
11. Wang J., Wan Ch., Zeng Q., Shen L., Malik M.A., Yan D. Effect of eccentricity on retrofitting efficiency of basalt textile reinforced concrete on partially damaged masonry columns. *Composite Structures*. 2020;232:111585. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111585>
12. Belostotsky A.M. et al. Adaptive finite-element models in structural health monitoring systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;2(78):169–178.
13. Kaytukov T.B., Belostosky A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical and computer modelling as the basis of structural health monitoring. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018;456:01207. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012072>