

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURESDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-251-260
УДК 624.07:004.942

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчетное обоснование механической безопасности Конгресс-холла в Челябинске

А.М. Белостоцкий^{1,2}, П.А. Акимов^{1,2,3,*}, Д.С. Дмитриев², А.С. Павлов², Ю.Н. Дядченко², А.И. Нагибович²¹Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6²Научно-исследовательский центр СтаДиО, Российская Федерация, 125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, 18³Российская академия архитектуры и строительных наук, Российская Федерация, 107031, Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1

*pavel.akimov@gmail.com

История статьи:

Поступила в редакцию: 3 июня 2019 г.

Доработана: 12 июля 2019 г.

Принята к публикации: 29 июля 2019 г.

Аннотация

Цели. Статья посвящена актуальным вопросам расчетных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости основания и несущих конструкций при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий, сравнительного анализа результатов альтернативных расчетов уникального проектируемого объекта строительства – общественно-делового центра «Конгресс-холл» в Челябинске. Описаны природные условия района расположения здания, устройство комбинированного основания, фундаментов и несущих конструкций объекта, основные и особые нагрузки (расчетные и нормативные) и их сочетания, постановка задач расчетных исследований, инструментарий их решения и полученные результаты. **Методы.** Дискретизация по пространству и решение результирующих задач математического (численного) моделирования состояния объекта осуществлялись методом конечных элементов в перемещениях. Построены, разработаны и проверены подробные конечноэлементные модели системы «комбинированное основание – несущие конструкции здания» и отдельных подсистем, адекватно отражающие геометрию-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики объекта и результирующее НДС, проанализирована устойчивость против прогрессирующего обрушения. Все основные расчеты проведены с использованием лицензионного конечноэлементного программного комплекса ANSYS Mechanical, верифицированного в Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН). **Результаты.** Рассмотрены результирующие параметры НДС, прочности и динамики основания и несущих конструкций объекта при нормативно-регламентированных сочетаниях вертикальных и ветровых нагрузок, а также результаты расчетов на устойчивость против прогрессирующего обрушения. В заключении делается обоснованный вывод о достоверности полученных расчетами критериальных параметров, определяющих прочность, устойчивость и динамику несущих конструкций объекта.

Ключевые слова: математическое моделирование; численное моделирование; компьютерное моделирование; численные методы; метод конечных элементов; механическая безопасность; прочность; устойчивость; напряженно-деформированное состояние; уникальный общественно-деловой комплекс

Для цитирования

Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Дмитриев Д.С., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И. Расчетное обоснование механической безопасности Конгресс-холла в Челябинске // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 4. С. 251–260. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-251-260>

Белостоцкий Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН; профессор, департамент строительства; генеральный директор; eLIBRARY SPIN-код: 8372-9904; Author ID: 16677; ORCID iD: 0000-0003-3727-2168.

Акимов Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, профессор; профессор, департамент строительства; заместитель генерального директора по науке; eLIBRARY SPIN-код: 3838-0100; Author ID: 256191; Web of Science ResearcherID: B-4230-2016; Scopus ID: 35974766800.

Дмитриев Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер-расчетчик, отдел расчетных исследований; eLIBRARY SPIN-код: 7607-6978; Author ID: 971521.

Павлов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-расчетчик, отдел расчетных исследований; eLIBRARY SPIN-код: 2381-8699; Author ID: 215544; ORCID iD: 0000-0002-0539-5094.

Дядченко Юлия Николаевна, старший инженер-расчетчик, отдел расчетных исследований.

Нагибович Александр Игоревич, ведущий инженер-расчетчик, отдел расчетных исследований; eLIBRARY SPIN-код: 3400-0273; Author ID: 803240.

© Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Дмитриев Д.С., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., 2019

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

Введение.

Описание объекта и задач исследования

Климат района работ умеренно-континентальный согласно СП 131.13330.2012 [1], нормативная глубина сезонного промерзания принята по СП 22.13330.2016 [2]. Участок, предназначенный для размещения проектируемого здания, расположен в центральном районе Челябинска, на левом и правом берегах реки Миасс и имеет равнинную поверхность. Категория сложности инженерно-геологических условий на участке работ по геологическим условиям в соответствии с СП 47.13330.2012 [3] – III (сложная). Согласно сейсмическому районированию территории Российской Федерации по СП 14.13330.2014 [4] и картам общего сейсмического районирования территории Российской Федерации сейсмическая интенсивность участка работ по ОСР-2015 С (1 %) – 6 баллов. Здание общественно-делового центра представляет собой прямоугольный в плане и разновысотный в углах прямоугольника объем, покрытый оболочкой третьего порядка (гиперболический параболоид – гипар).

Здание запроектировано в виде двух башен (блоки А и С), расположенных на разных берегах реки Миасс, и пролетной части с помещениями (блок В) над рекой, объединяющей башни в единое здание (рис. 1). Башня на левом берегу (блок А) имеет ширину 81,5 м и длину 80,2 м, высота составляет 174,5 м; ширина и длина башни на правом берегу (блок С) 81,5 и 54,4 м соответственно, высота – 96 м; пролетная часть с помещениями, соединяющая башни, равна 81,5 м в ширину и 84,5 м в длину, блок В размещен на арках, которые опираются на фундаменты башен А и С, стрела арок от поверхности воды составляет 13 м. Общая площадь здания – 131 913,75 м². Количество этажей в блоке А – 30, в блоке В – 6, в блоке С – 16. Высота этажей принята разной для разных частей здания и изменяется от 8,1 до 3,9 м в соответствии с функциональным назначением. Согласно техническому заданию на проектирование здание имеет первых два уровня на разных берегах реки, а третьим уровнем на отметке +13,800 они объединяются в единый объем и тем самым соединяют два берега пешеходным мостом в теплом периметре здания. Для входа в здание на отметке ±0,000 на обоих берегах предусмотрены вестибюли с тамбурами, через которые посетители с помощью эскалаторов и лифтов поднимаются на третий уровень и имеют возможность переходить с одного берега реки Миасс на другой.

В качестве исходных материалов для расчетных исследований использовались комплект акту-

альных чертежей и схем объекта, подготовленных в пакете Autodesk AutoCAD, соответствующие файлы в формате pdf, а также весь объем инженерных изысканий, рекомендации по назначению климатических нагрузок и специальные технические условия (СТУ).



Рис. 1. Визуализация здания общественно-делового центра [Figure 1. Visualization of the cultural and business complex]

Для блока А фундаменты приняты свайно-плитными (сваи были предусмотрены на участках залегания скальных грунтов на больших глубинах), стены, колонны и плиты перекрытия выполнены из монолитного железобетона, на некоторых участках имеются металлические колонны, конструкции шпилей – металлические согласно СП 16-13330.2011 [5] и соответствующим СТУ.

Для блока В конструкция покрытия кровли выполнена в виде плоских ферм, объединенных между собой поперечными балками, продольными и поперечными связями (покрытие представляет собой пространственную металлическую конструкцию, плиты перекрытий решены в железобетоне). Внутреннее пространство блока В – каркасная система с железобетонными плитами перекрытий и ядрами жесткости (лифтовыми и лестничными шахтами, стенами ограждения зрительного зала).

Для блока С фундаменты приняты свайно-плитными, стены, колонны и плиты перекрытий выполнены из монолитного железобетона, конструкции шпилей – металлические согласно СП 16-13330.2011 [5] и СТУ.

Сбор нагрузок произведен в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016. Снеговые и ветровые нагрузки принимались с учетом рекомендаций Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций (ЦНИИСК) имени В.А. Кучеренко АО «Научно-исследовательский центр “Строительство”» (результаты были получены компанией УНИКОН при модельных испытаниях в аэродинамической трубе с учетом аэродинамически значимых объектов окружающей застройки (рис. 2)).

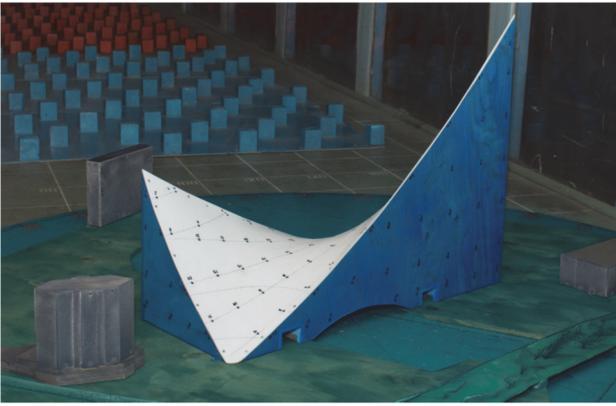


Рис. 2. Модель объекта в аэродинамической трубе
[Figure 2. Object model in a wind tunnel]

Согласно отчету по геологии грунтовые условия по сейсмическим свойствам относятся к I и II категориям. Учитывая СТУ при расчете конструкций принимались следующие поправочные коэффициенты к спектру воздействия: $K_0 = 1,1$, $K_1 = 0,25$, $K_\psi = 1,0$, $A = 0,25$ м/с². В программном комплексе ANSYS использовался спектр ускорений, приведенный вариант которого для грунтов I и II категории с учетом указанных коэффициентов показан на рис. 3.

Определение расчетных сочетаний нагрузок и усилий производилось согласно СП 20.13330.2011 [6], сочетания разделялись на основные и особые (сейсмические и прогрессирующее обрушение).

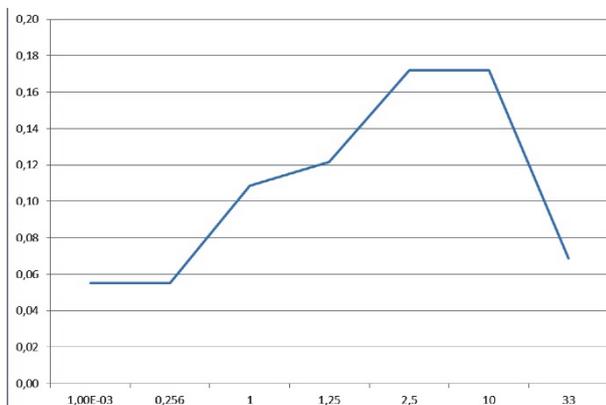


Рис. 3. Приведенный спектр ускорений для программного комплекса ANSYS
[Figure 3. Acceleration spectrum for the ANSYS software package]

В соответствии с техническим заданием были поставлены и решались следующие задачи:

- анализ и обобщение проектной документации и данных изысканий, постановка задач расчетных исследований;
- разработка и верификация расчетных пространственных оболочечно-стержневых конечноэлементных моделей (общую и отдельных блоков) общественно-делового центра;

- определение параметров напряженно-деформированного состояния (перемещения, усилия) при нормативно регламентированных сочетаниях вертикальных и ветровых нагрузок;

- расчеты на устойчивость против прогрессирующего обрушения.

1. Методика исследований

Дискретизация по пространству и решение задач математического (численного) и компьютерного моделирования состояния рассматриваемого объекта осуществлялись методом конечных элементов (МКЭ). Результирующее уравнение движения геометрически линейной системы в матричной форме метода перемещений (в условиях малости перемещений и деформаций) имеет вид [7–13]

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K + K_G)\bar{u}(t) = \bar{F}(t) + \bar{R}(\bar{u}, \dot{u}), \quad (1)$$

где M , C , K , K_G – симметрические, положительно определенные, блочноредкозаполненные матрицы масс, демпфирования, жесткости и геометрической жесткости конечноэлементной модели (КЭМ) системы соответственно; t – время; точка ($\dot{\cdot}$) – дифференцирование по времени; $\bar{F}(t)$ – вектор заданных статических и динамических нагрузок; $\bar{R}(\bar{u}, \dot{u})$ – вектор псевдонагрузок, моделирующий физически нелинейные эффекты [14]; $\bar{u}(t)$ – искомый вектор обобщенных динамических перемещений КЭМ.

Общая динамическая постановка (1) естественным образом сводится к важным частным задачам – статической и на собственные значения (собственные частоты и формы колебаний, критические числа и формы потери начальной устойчивости), а также к спектральным формулировкам динамических задач. Для этого используются соответствующие виды нагрузок и решений, выполняется обнуление незначимых матриц. Так, уравнение движения при определении собственных частот колебаний без учета демпфирования имеет вид

$$M\ddot{u}(t) + K\bar{u}(t) = 0. \quad (2)$$

Так как для линейных систем колебания являются гармоническими, то

$$\bar{u}(t) = \bar{\varphi}_i \cos(\omega_i t), \quad (K - \omega_i^2 M)\bar{\varphi}_i = 0, \quad (3)$$

где ω_i – i -ая собственная циклическая частота (в радианах в единицу времени); $\bar{\varphi}_i$ – вектор собственных колебаний.

Отметим, что уравнение движения может также содержать члены уравнения, учитывающие контакт тел, демпфирование, большие деформации. Через

полученные значения циклических частот собственных колебаний можно выразить частоту собственных колебаний:

$$f_i = \omega_i / (2\pi). \quad (4)$$

Очевидно, что разрабатывавшиеся расчетные модели должны были адекватно отражать геометрико-жесткостные и инерционные свойства и нагрузочные характеристики строительных конструкций и основания здания. Для определения перемещений и усилий в строительных конструкциях от действия постоянной и временной, снеговой и ветровой нагрузок строились и анализировались квазистатические расчетные конечноэлементные модели системы «оболочечно-стержневые конструкции – свайное поле» (жесткость свай принималась согласно данным испытаний свай статическими нагрузками). Для определения перемещений и усилий в строительных конструкциях от действия пульсационной ветровой и сейсмической нагрузок строились и анализировались динамические расчетные конечноэлементные модели системы «оболочечно-стержневые конструкции – свайное поле».

Динамическая (пульсационная) составляющая ветрового нагружения определялась на основе статической составляющей с учетом коэффициентов динамичности и пульсации, определенных по СП 20.13330.2011 [6].

Для многоэтажных зданий с постоянными по высоте характеристиками пульсационную составляющую допускается определять по формуле

$$w_p = w_m \xi \zeta(z_e) v, \quad (5)$$

где w_m – значение средней составляющей основной ветровой нагрузки, принимаемое по данным аэродинамических исследований [6; 7]; ξ – коэффициент динамичности, определяемый по графику из [6] при значении логарифмического декремента колебаний $\delta = 0,3$ и параметра $\varepsilon = \sqrt{\gamma_f W_0} / 940 / f_1$; ζ – коэффициент пульсаций ветра; v – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления.

Динамическую реакцию допускается принимать по трем низшим формам колебаний (двум изгибным, одной крутильной) в виде суммы квадратов полученных реакций.

Следует констатировать, что в настоящее время отсутствует обоснованная, внутренне непротиворечивая методика определения критериального параметра – максимального ускорения перекрытий верхних этажей a_{\max} при действии пульсационной составляющей ветровой нагрузки (не должна

превышать $0,08 \text{ м/с}^2$). Практикуются различные приближенные подходы, сводящиеся, как правило, к использованию формулы

$$a_{\max} = u_{\max} \omega^2, \quad (6)$$

где u_{\max} – максимальное горизонтальное перемещение; ω – превалирующая собственная частота (рад/с).

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС), динамических характеристик и устойчивости несущих конструкций здания выполнялось по лицензионному программному комплексу (ПК) ANSYS 19.2, реализующему развитые схемы методов конечных элементов и суперэлементов для статических и динамических расчетов пространственных комбинированных систем и поддерживающему все необходимые типы расчетного анализа.

На основании анализа и обобщения имеющихся исходных данных в ПК ANSYS Mechanical были построены и верифицированы пространственные оболочечно-стержневые конечноэлементные модели несущих конструкций отдельных блоков и всего объекта. Железобетонные плиты фундамента, перекрытий, несущие стены моделировались плоскими треугольными и четырехугольными в плане оболочечными конечными элементами (КЭ) постоянной толщины, реализующими гипотезы Кирхгофа – Лява. Железобетонные колонны и балки были представлены пространственными стержневыми КЭ. КЭ жестких вставок типа MPC184 с опцией «жесткая балка» вводились в местах стыковки плит перекрытий и фундаментной плиты с колоннами. Для задания коэффициента жесткости основания (Винклера) элементы поверхностных эффектов типа SURF154 были «наклеены» на фундаментную плиту. Разработаны модели с линейными характеристиками материалов для определения усилий, проверки сечений конструктивных элементов на прочность, определения форм собственных колебаний и форм потери устойчивости. Также разработаны модели для динамических расчетов и расчетов на прогрессирующее обрушение. Эти модели имели более подробную сетку конечных элементов и учитывали геометрическую и физическую нелинейности.

Разработанные расчетные [15] модели адекватно отражали геометрико-жесткостные и инерционные свойства, а также нагрузочные характеристики строительных конструкций и основания здания. Об этом, в частности, свидетельствует и вычислительная размерность построенных ANSYS-моделей. В табл. 1 приведены размерности всех моделей. Особо отметим, что сетка КЭ на плитах фундамента и перекрытий не только обладает необходимой

подробностью для воспроизведения перемещений, сил и моментов, но и сгущена в зонах колонн и пилонов. В табл. 2 представлены сводные данные

по применяемым в ANSYS конечным элементам, которые были использованы в расчетных моделях объекта.

Таблица 1

Разработанные расчетные конечноэлементные модели систем/подсистем несущих конструкций общественно-делового центра и его отдельных блоков
 [Table 1. Computational finite element models of systems/subsystems of load-bearing structures of cultural and business complex and its fragments]

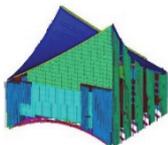
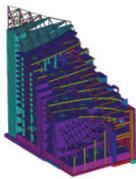
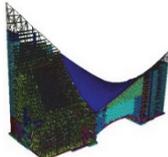
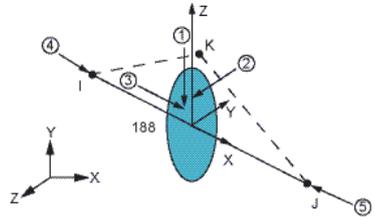
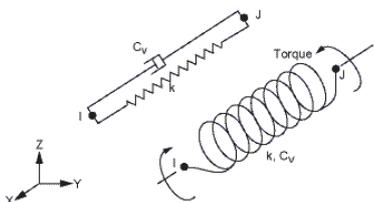
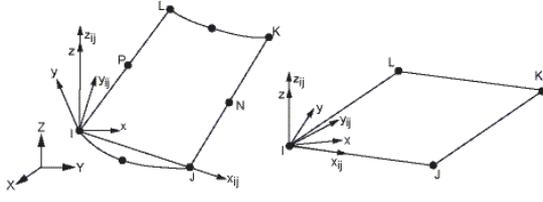
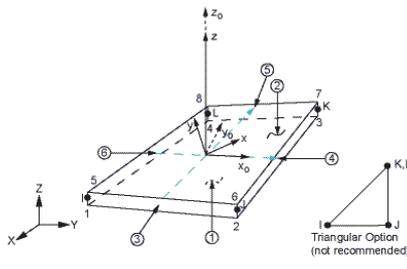
№ [No.]	КЭ-модели системы/подсистемы [Finite element models of systems/subsystems]	Изображение [Visualization]	Количество узлов [Number of nodes]	Количество элементов [Number of finite elements]	Типы КЭ [Types of finite elements]
1	Конструкции блока А – основание [Structures of the block A – foundation]		675 066	635 632	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154
2	Конструкции блока В – основание [Structures of the block B – foundation]		69 132	93 886	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154
3	Конструкции блока С – основание [Structures of the block C – foundation]		308 149	322 900	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154
4	Конструкции всего здания – основание [Structures of the building – foundation]		972 691	1 052 418	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154

Таблица 2

Конечные элементы в программном комплексе ANSYS
 [Finite elements in ANSYS]

Конечный элемент [Finite element]	Эскиз [Sketch]	Описание [Description]
BEAM188		Двухузловой конечный элемент конечных деформаций [Two-node finite element final deformations]
COMBIN14		Двухузловой конечный элемент пружины, который применяется для моделирования эластомеров [Two-node finite element of springs which is applied for the modeling of elastomers]

Конечный элемент [Finite element]	Эскиз [Sketch]	Описание [Description]
SURF154		Конечный элемент оболочки для приложения нагрузки [Finite element of shells for the application loads]
SHELL181		Трехузловой и четырехузловой конечный элемент оболочки конечных деформаций [Three-node and four-node finite element of end shells deformations]

Соответствие геометрико-жесткостных, инерционных и нагрузочных параметров расчетных моделей проектным данным проверялось:

- визуализацией характерных фрагментов и всей модели в различных ракурсах;
- выдачей объемов, масс и нагрузок характерных фрагментов расчетной модели, их сопоставлением с проектными данными и расчетными моделями в альтернативных программных комплексах;
- анализом результатов статического и динамического расчета, в частности для предельных случаев, имеющих прозрачный физический смысл.

Отметим, что определение собственных частот и форм колебаний механических систем – едва ли не самые информативные верификационные задачи, интегрирующие многие факторы и параметры расчетной модели и в то же время позволяющие выявить их различие.

2. Результаты исследований

Анализ результатов расчетных исследований, выполненных по верифицированному программному комплексу ANSYS Mechanical, показал непротиворечивую картину распределения перемещений и усилий (сил и моментов) в основании, фундаменте и каркасе здания при вертикальных статических и ветровых нагрузках, значимых собственных частот и форм колебаний здания. Критериальные значения кинематических параметров несущих конструкций общественно-делового центра (прогибы, горизонтальные перемещения верха здания, ускорения верхних этажей) находятся в диапазоне нормативно-регламентированных величин (рис. 4).

Проверка сечений покрытия, стальных колонн и опорных арок производилась на основании требований СП 16.13330.2011 [5]. Полученные по комбинациям усилия на базе ПК ANSYS использовались для проверки сечений в сертифицированном ПК СТК-САПР [16].

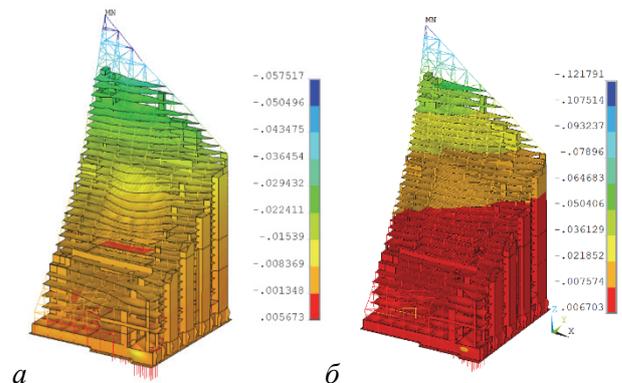


Рис. 4. Блок А. Изополя горизонтальных перемещений U_y (м): а – особое сочетание нагрузок (сейсмическое воздействие по направлению оси Y) $U_{y_{max}} = 57,5$ мм; б – основное сочетание нагрузок (статический ветер в направлении оси Y) $U_{y_{max}} = 121,8$ мм [Figure 4. Block A. Isofields of horizontal displacements U_y (m): а – special load combination (seismic effect along the Y axis direction) $U_{y_{max}} = 57.5$ mm; б – main combination of loads (static wind in the direction of the Y axis) $U_{y_{max}} = 121.8$ mm]

Расчеты включали проверки по первому предельному состоянию (прочность по нормальным, касательным и эквивалентным напряжениям, устойчивости), второму предельному состоянию (гибкости).

Для решения задач устойчивости против прогрессирующего обрушения [17–22] были сформулированы следующие расчетные предпосылки:

– расчет производится в геометрически и физически нелинейной постановке (для стальных конструкций);

– развитие процесса рассматривается во временной области методом прямого интегрирования уравнений динамики (применялся неявный метод Ньюмарка);

– влияние скоростей деформирования на предельную несущую способность элементов в запас не учитывается;

– нагружение модели проводится в два этапа: квазистатически (получение статического НДС конструкций покрытия, временной интервал от 0 до 1,0 сек.) и этап аварийного воздействия (удаление элемента, реакция системы – от 1 сек. и далее до стабилизации или обрушения);

– удаление элемента производится снижением жесткости элемента в 1000 раз за 0,001 сек.;

– расчет производится на расчетные длительные составляющие комбинации нагрузок, которая включает собственный вес, постоянную нагрузку, технологическую нагрузку и снег по карте 1;

– вязкое демпфирование конструкции покрытия принимается 2 % от критического;

– при превышении в любом элементе в любой точке его сечения предела временного сопротивления элемент удаляется из расчетной модели в запас.

На рис. 5 показана схема расположения удаляемых элементов по сценариям инициирующего локального разрушения (сценарий 1 – отказ опорного узла фермы (рис. 6, 7); сценарий 2 – отказ верхнего пояса фермы покрытия в середине пролета).

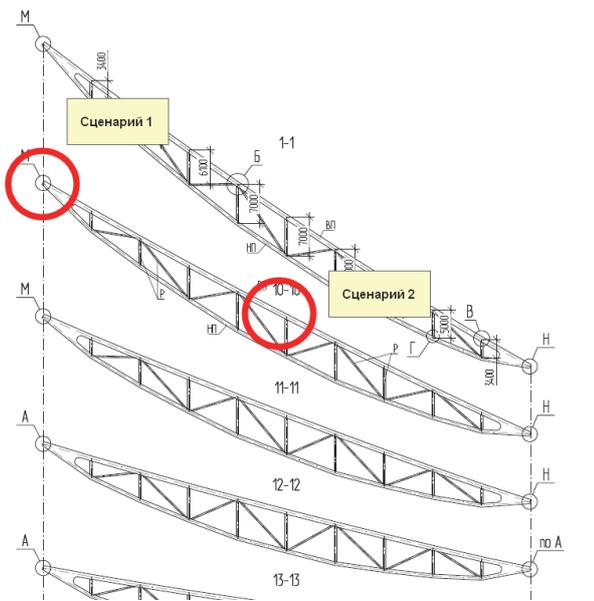


Рис. 5. Схема расположения удаляемых элементов по сценариям 1, 2

[Figure 5. Layout of the remove elements for scenarios 1, 2]

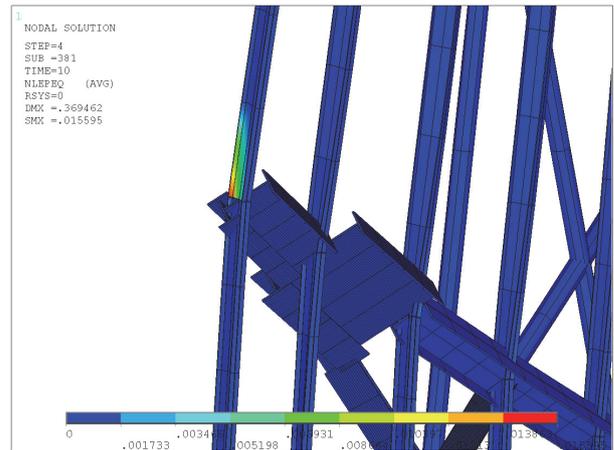


Рис. 6. Накопленные пластические деформации в зоне опорного узла на момент времени 10 сек.

[Figure 6. Accumulated plastic deformation in the area of the reference node at the time of 10 sec.]

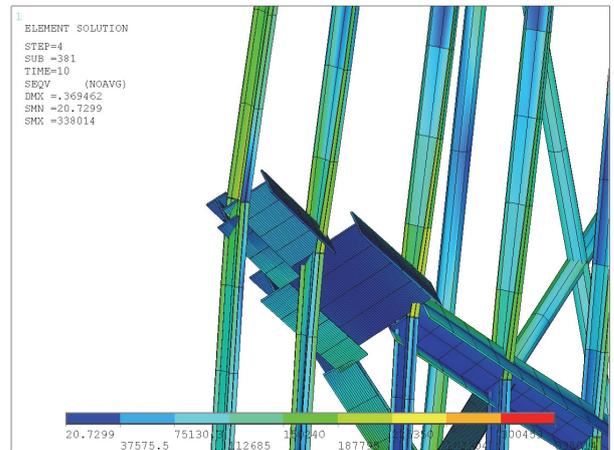


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу (Па) в зоне опорного узла на момент времени 10 сек.

[Figure 7. Equivalent von Mises stresses (Pa) in the area of the reference node at the time of 10 sec.]

Выполненными расчетными исследованиями сценариев инициирующего локального разрушения несущих конструкций установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) конструкции каркаса здания устойчивы к прогрессирующему обрушению.

Выводы

Результаты расчетных исследований НДС, прочности и устойчивости основания и несущих конструкций при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий, а также итоги сравнительного анализа результатов альтернативных расчетов объекта позволяют сделать вывод о механической безопасности [23; 24] соответствующих проектных решений здания общественно-делового центра «Конгресс-холл» в Челябинске.

Полученные результаты математического моделирования для здания общественно-делового центра – статические и ветровые перемещения, собственные частоты и формы колебаний – рекомендуется использовать при разработке программы и методики проведения мониторинга состояния основания и несущих конструкций здания в процессе его строительства и эксплуатации [25; 26].

Список литературы

1. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями № 1, 2). Введ. 2013-01-01.
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменением № 1). Введ. 2017-07-01.
3. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. Введ. 2013-07-01.
4. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Введ. 2014-06-01.
5. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменением № 1). Введ. 2011-05-20.
6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменением № 1). Введ. 2017-06-04.
7. Белостоцкий А.М., Акимов П.А. Научно-исследовательский центр СтаДиО. 25 лет на фронте численного моделирования // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). 2016. Vol. 12. Issue 1. Pp. 8–45.
8. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 118–129.
9. Rossi D.F., Ferreira W.G., Mansur W.J., Calenzani A.F.G. A Review of Automatic Time-Stepping Strategies on Numerical Time Integration for Structural Dynamics Analysis // Engineering Structures. 2014. Vol. 80. Pp. 118–136.
10. Travush V.I., Belostotsky A.M., Akimov P.A. Contemporary Digital Technologies in Construction. Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. 012029.
11. Travush V.I., Belostotsky A.M., Akimov P.A. Contemporary Digital Technologies in Construction. Part 2: About Experimental & Field Studies, Material Sciences, Construction Operations, BIM and “Smart” City // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. 012030.
12. Wang L., Zhong H. A Time Finite Element Method for Structural Dynamics // Applied Mathematical Modelling. 2017. Vol. 41. Pp. 445–461.
13. Yin J., Xu L., Wang H., Xie P., Huang S., Liu H., Yang Z., Li B. Accurate and Fast Three-Dimensional Free

Vibration Analysis of Large Complex Structures Using the Finite Element Method // Computers & Structures. 2019. Vol. 221. Pp. 142–156.

14. Петров В.В. Расчет неоднородных по толщине оболочек с учетом физической и геометрической нелинейностей // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 112–117.

15. Ляхович Л.С., Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Роль парадоксов в оценке корректности расчетных моделей // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). 2013. Vol. 9. Issue 2. Pp. 34–42.

16. Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015. Руководство пользователя. Обучающие примеры. М.: Электронное издание, 2015. 460 с.

17. Барабаш М.С. Моделирование жизненного цикла конструкций высотных зданий с учетом сопротивляемости прогрессирующему разрушению // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). 2013. Vol. 9. Issue 4. Pp. 101–106.

18. Кашеварова Г.Г., Пенелаяев А.А. Исследование проблемы защиты типовых жилых зданий от прогрессирующего разрушения // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). 2008. Vol. 4. Issue 2. Pp. 69–70.

19. Lin S.-C., Bai Y., Hou J., Huang Y. Progressive Collapse Analysis and Structural Robustness of Steel-Framed Modular Buildings // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 104. Pp. 643–656.

20. Rahnavard R., Fard F.F.Z., Hosseini A., Suleiman M. Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings // Case Studies in Construction Materials. 2018. Vol. 8. Pp. 359–379.

21. Al-Salloum Y.A., Abbas H., Almusallam T.H., Ngo T., Mendis P. Progressive Collapse Analysis of a Typical RC High-Rise Tower // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2017. Vol. 29. Issue 4. Pp. 313–320.

22. Wilkes J., Krauthammer T. An Energy Flow Approach for Progressive Collapse Assessment // Engineering Structures. 2019. Vol. 190. Pp. 333–344.

23. Travush V., Emelianov S., Kolchunov V., Bulgakov A. Mechanical Safety and Survivability of Buildings and Building Structures under Different Loading Types and Impacts // Procedia Engineering. 2016. Vol. 164. Pp. 416–424.

24. Travush V.I., Martirosyan A.S., Kashevarova G.G. Computer Modeling as Evaluation Method of Column Base Bearing Capacity in Tower Buildings // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 773–780.

25. Hattab O., Chaari M., Franchek M.A., Wassar T. An Adaptive Modeling Approach to Structural Health Monitoring of Multistory Buildings // Journal of Sound and Vibration. 2019. 440. Pp. 239–255.

26. Kayukov T.B., Belostotsky A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical and Computer Modelling as the Basis of Structural Health Monitoring // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. 012072.

Numerical analysis of mechanical safety parameters of Congress Hall building in Chelyabinsk

Alexander M. Belostotsky^{1,2}, Pavel A. Akimov^{1,2,3*}, Dmitry S. Dmitriev²,
Andrey S. Pavlov², Yulia N. Dyadchenko², Alexander I. Nagibovich²

¹Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

²Scientific Research Center "StADyO", 18 3-ya Yamskogo Polya St., Moscow, 125124, Russian Federation

³Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 24 Bolshaya Dmitrovka St., Moscow, 107031, Russian Federation

*pavel.akimov@gmail.com

Article history:

Received: June 3, 2019

Revised: July 12, 2019

Accepted: July 29, 2019

For citation

Belostotsky A.M., Akimov P.A., Dmitriev D.S., Pavlov A.S., Dyadchenko Yu.N., Nagibovich A.I. (2019). Numerical analysis of mechanical safety parameters of Congress Hall building in Chelyabinsk. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(4), 251–260. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-251-260>

Abstract

Aims of research. The article is devoted to actual problems of computational analysis of stress-strain state, strength and stability of load-bearing structures with allowance for the main and special combinations of loads and impacts, comparison of the results of alternative structural analysis of unique cultural and business complex "Congress Hall" in Chelyabinsk. The natural conditions of the area of location of this object and main load-bearing structures of the object are described. Besides, characteristic and design loads, their combinations, formulation of objectives of computational research and methods of solution are presented. **Methods.** Space discretization and solution of the corresponding problems of mathematical (numerical) and computer modelling of the considering unique building were carried out with the use of finite element method. Detailed finite element models of the coupled system "combined foundation – load-bearing structures" and its fragments (subsystems) were developed and verified. They adequately reflect geometric-stiffness, inertial and load parameters of the object and the resulting stress-strain state. Progressive collapse analysis are under consideration as well. Licensed, certified and verified (by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences) finite element software package "ANSYS Mechanical" was used. **Results.** The resulting parameters of stress-strain state, strength and dynamics of load-bearing structures of the building with allowance for design (in accordance with design codes) combinations of vertical and wind loads are considered. Besides, information about results of progressive collapse analysis is presented. Thus, a reasonable conclusion is made about the reliability of the criterion parameters of strength, stability and dynamics of the load-bearing structures of the object.

Keywords: mathematical modelling; numerical modelling; computer modelling; numerical methods; finite element method; mechanical safety; strength; stability; stress-strain state; unique cultural and business complex

References

1. SP 131.13330.2012. *Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 23-01-99* (s Izmeneniyami No. 1, 2) [Construction climatology. Updated version of SNIp 23-01-99* (with Modifications 1, 2)]*. Enter. 2013-01-01.

Alexander M. Belostotsky, Doctor of Science (Technical), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); Professor, Department of Construction; Executive Director; eLIBRARY SPIN-code: 8372-9904; Author ID: 16677; ORCID iD: 0000-0003-3727-2168.

Pavel A. Akimov, Doctor of Science (Technical), Professor, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); Professor, Department of Construction; Vice-Director for Science; eLIBRARY SPIN-code: 3838-0100; Author ID: 256191; Web of Science ResearcherID: B-4230-2016; Scopus ID: 35974766800.

Dmitry S. Dmitriev, leading structural engineer, Department of Computational Analysis; eLIBRARY SPIN-code: 7607-6978; Author ID: 971521.

Andrey S. Pavlov, Candidate of Sciences, leading structural engineer, Department of Computational Analysis; eLIBRARY SPIN-code: 2381-8699, Author ID: 215544; ORCID iD: 0000-0002-0539-5094.

Yulia N. Dyadchenko, senior structural engineer, Department of Computational Analysis.

Alexander I. Nagibovich, senior structural engineer, Department of Computational Analysis; eLIBRARY SPIN-code: 3400-0273; Author ID: 803240.

2. SP 22.13330.2016. *Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.02.01-83* (s Izmeneniyami No. 1) [Foundations of buildings and structures. Updated version of SNIp 2.02.01-83* (with Modification 1)]*. Enter. 2017-07-01.

3. SP 47.13330.2012. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 11-02-96 [Engineering site investigations for construction. Main provisions. Updated version of SNIp 11-02-96]*. Enter. 2013-07-01.

4. SP 14.13330.2014. *Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah. Aktualizirovannaya redakciya SNIp II-7-81* [Construction in seismic areas. Updated version of SNIp II-7-81*]*. Enter. 2014-06-01.

5. SP 16.13330.2011. *Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIp II-23-81* (s Izmeneniyami No. 1) [Steel structures. Updated version of SNIp II-23-81* (with Modification 1)]*. Enter. 2011-05-20.

6. SP 20.13330.2016. *Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.01.07-85* (s Izmeneniyami No. 1) [Loads and impacts. Updated version of SNIp 2.01.07-85* (with Modification 1)]*. Enter. 2017-06-04.

7. Belostotsky A.M., Akimov P.A. (2016). Nauchno-issledovatel'skij centr StaDiO. 25 let na fronte chislenogo modelirovaniya [Scientific Research Centre “StaDiO”. 25 years on the front of numerical modeling]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 12(1), 8–45.
8. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Yu.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I. (2018). Raschetnoe obosnovanie mekhanicheskoy bezopasnosti stadionov k Chempionatu mira po futbolu 2018 goda [Analysis of Mechanical Safety of Stadiums for the World Cup 2018]. *Academia. Architecture and Construction*, (3), 118–129.
9. Rossi D.F., Ferreira W.G., Mansur W.J., Calenzani A.F.G. (2014). A review of automatic time-stepping strategies on numerical time integration for structural dynamics analysis. *Engineering Structures*, 80, 118–136.
10. Travush V.I., Belostotsky A.M., Akimov P.A. (2018). Contemporary digital technologies in construction. Part 1: About mathematical (numerical) modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 456, 012029.
11. Travush V.I., Belostotsky A.M., Akimov P.A. (2018). Contemporary Digital Technologies in construction. Part 2: About experimental & field studies, material sciences, construction operations, BIM and “Smart” city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 456, 012030.
12. Wang L., Zhong H. (2017). A time finite element method for structural dynamics. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 445–461.
13. Yin J., Xu L., Wang H., Xie P., Huang S., Liu H., Yang Z., Li B. (2019). Accurate and fast three-dimensional free vibration analysis of large complex structures using the finite element method. *Computers & Structures*, 221, 142–156.
14. Petrov V.V. (2016). Raschet neodnorodnyh po tolshchine obolochek s uchedom fizicheskoy i geometricheskoy nelinejnostej [Calculation of inhomogeneous thickness of shells with considering physical and geometrical nonlinearities]. *Academia. Architecture and Construction*, (1), 112–117.
15. Lyakhovich L.S., Perelmutter A.V., Slivker V.I. (2013). Rol' paradoksov v ocenke korrrektnosti raschetnyh modelej [Role of paradoxes when estimating the correctness of design models]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 9(2), 34–42.
16. Vodopjanov R.Ju., Titok V.P., Artamonova A.E. (2015). *Programmnyj kompleks LIRA-SAPR 2015. Rukovodstvo pol'zovatelja. Obuchajushhie primery* [Program complex LIRA-SAPR 2015. User's guide. Educational examples]. Moscow: Electronic edition, 460. (In Russ.)
17. Barabash M.S. (2013). Modelirovanie zhiznennogo cikla konstrukcij vysotnyh zdaniy s uchetom soprotivlyaemosti progres-siruyushchemu razrusheniyu [Modeling the Life Cycle High-Rise Buildings Structures in View Resistance Progressive Destruction]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 9(2), 101–106.
18. Kashevarova G.G., Pepelyaev A.A. (2008). Issledovanie problemy zashchity tipovyh zhilyh zdaniy ot progressiruyushchego razrusheniya [Analysis of the Problem of Protecting of Typical Residential Buildings from Progressive Collapse]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 4(2), 69–70.
19. Lin S.-C., Bai Y., Hou J., Huang Y. (2019). Progressive Collapse Analysis and Structural Robustness of Steel-Framed Modular Buildings. *Engineering Failure Analysis*, 104, 643–656.
20. Rahnard R., Fard F.F.Z., Hosseini A., Sulaiman M. (2018). Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 359–379.
21. Al-Salloum Y.A., Abbas H., Almusallam T.H., Ngo T., Mendis P. (2017). Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 29(4), 313–320.
22. Wilkes J., Krauthammer T. (2019). An Energy Flow Approach for Progressive Collapse Assessment. *Engineering Structures*, 190, 333–344.
23. Travush V., Emelianov S., Kolchunov V., Bulgakov A. (2016). Mechanical Safety and Survivability of Buildings and Building Structures under Different Loading Types and Impacts. *Procedia Engineering*, 164, 416–424.
24. Travush V.I., Martirosyan A.S., Kashevarova G.G. (2016). Computer Modeling as Evaluation Method of Column Base Bearing Capacity in Tower Buildings. *Procedia Engineering*, 153, 773–780.
25. Hattab O., Chaari M., Franchek M.A., Wassar T. (2019). An adaptive modeling approach to structural health monitoring of multistory buildings. *Journal of Sound and Vibration*, 440, 239–255.
26. Kaytukov T.B., Belostotsky A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N. (2018). Mathematical and Computer Modeling as the Basis of Structural Health Monitoring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 456, 012072.