

Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года

А.М.Белостоцкий, НИЦ «СтаДиО», Москва
П.А.Акимов, РААСН, НИЦ «СтаДиО»; Москва
А.А.Аул, НИЦ «СтаДиО», Москва
Д.С.Дмитриев, НИЦ «СтаДиО», Москва
Ю.Н.Дядченко, НИЦ «СтаДиО», Москва
А.И.Нагибович, НИЦ «СтаДиО», Москва
К.И.Островский, НИЦ «СтаДиО», Москва
А.С.Павлов, НИЦ «СтаДиО», Москва

Очевидно, что современное проектирование и строительство уникальных зданий, сооружений и комплексов требует расчётного обоснования и глубоких всесторонних исследований поведения несущих конструкций под действием разного рода факторов. Одними из наиболее грандиозных и ответственных объектов строительства являются уникальные большепролётные сооружения. Это, в частности, стадионы, дворцы спорта и аквапарки, торгово-развлекательные комплексы, пешеходные, автомобильные и железнодорожные мосты различных конструктивных решений. В настоящей статье представлены теоретические основы и результаты математического (численного) моделирования состояния [в части анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости] российских футбольных стадионов, возведённых к Чемпионату мира по футболу 2018 года. Для дискретизации по пространству и решения соответствующих краевых задач строительной механики был применён самый универсальный и мощный современный численный метод механики – метод конечных элементов (МКЭ). В статье, в частности, описаны некоторые особенности создания соответствующих расчётных моделей и основные результаты расчётного обоснования механической безопасности трёхмерных большепролётных систем «грунтовое основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия и фасадов» указанных футбольных стадионов при основных и особых сочетаниях нагрузок. Кроме того, кратко изложены ключевые процедуры научного сопровождения при прохождении экспертизы. В целом, в результате выполненного комплекса научно-исследовательских работ на новом уровне решена социально значимая и наукоёмкая проблема обеспечения механической (конструктивной) безопасности уникальных комбинированных объектов строительства (трёхмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов»).

Ключевые слова: математическое моделирование, численное моделирование, компьютерное моделирование,

численные методы, метод конечных элементов, механическая безопасность, напряжённо-деформированное состояние, футбольный стадион.

Analysis of Mechanical Safety of Stadiums for the World Cup 2018

A.M.Belostotsky, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
P.A.Akimov, RAACS, Scientific and Research Center "StadyO"; Moscow
A.A.Aul, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
D.S.Dmitriev, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
Y.N.Dyadchenko, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
A.I.Nagibovich, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
K.I.Ostrovsky, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow
A.S.Pavlov, Scientific and Research Center "StadyO", Moscow

It is obvious that contemporary design and construction of unique buildings and structures is unthinkable without mathematical (numerical) and computer modelling and advanced analysis of load-bearing structures under various kinds of loads and impacts. One of the most ambitious and important construction projects is the unique large-span structures. These are, in particular, stadiums, sports palaces and water parks, shopping malls, pedestrian, road and railway bridges of various design solutions. The distinctive paper is devoted to theoretical foundations and results of mathematical (numerical) modeling of the state (in terms of the analysis of stress-strain state, strength and stability) of football stadiums built for the 2018 FIFA World Cup in Russia. Finite element method is used for approximation and high-precision numerical solution of corresponding boundary problems of structural mechanics. It is the most universal and powerful numerical method of mechanics. The paper, in particular, describes some features of development of finite element models and the main results

of the analysis of the mechanical (structural) safety of three-dimensional large-span systems “soil foundation – reinforced concrete structures of foundations and stands – steel structures of the coating and facades” of these football stadiums with the basic and special load combinations. In addition, the key procedures of scientific support during the corresponding expertise and assessments are outlined. Generally, socially significant and knowledge-intensive problem of providing mechanical (constructive) safety of unique combined objects of construction (three-dimensional systems “foundation – reinforced concrete structures of foundations and stands – steel structures of coating and facades”) has been solved at a new level as a result of the performed complex of research works.

Keywords: mathematical modelling, numerical modelling, computer modelling, numerical methods, finite element method, mechanical safety, stress-strain state, football stadium.

Введение

Современный этап развития математического моделирования состояния строительных объектов [в том числе напряжённо-деформированного состояния (НДС)] связан с широким использованием численных методов. Практика выдвигает на передний план задачи многовариантных исследований многомерных систем, адекватное решение которых, как правило, возможно только лишь численным путём [1, с.5, 25]. Следует

отметить, что в последние годы появились определённые предпосылки для дальнейшего развития численно-аналитических (полуаналитических) методов, эффективно сочетающих качественные свойства замкнутых решений с общностью численных методов [4; 18, с. 21, 23]. Вместе с тем эти разработки актуальны лишь для отдельных классов задач, а для проблем расчётного обоснования уникальных строительных объектов можно говорить о безальтернативности численных методов.

Как известно, в период с 14 июня по 15 июля 2018 года в России прошёл Чемпионат мира по футболу. Подготовка к этому мероприятию, разумеется, потребовала значительных материальных и интеллектуальных затрат, сопряжённых в первую очередь с проектированием и строительством новых весьма вместительных стадионов, отвечающие современным требованиям безопасности и критериям Международной федерации футбола (FIFA). Были возведены 12 футбольных стадионов: «Лужники» и «Открытие Арена» в Москве, «Санкт-Петербург Арена» («Зенит») в Санкт-Петербурге, «Казань Арена» в Казани, «Нижний Новгород Арена» в Нижнем Новгороде, «Волгоград Арена» в Волгограде, «Ростов Арена» в Ростове-на-Дону, «Екатеринбург Арена» в Екатеринбурге, «Самара Арена» в Самаре, «Мордовия Арена» в Саранске, «Арена Балтика» в Калининграде, «Фишт» в Сочи.

В 2011–2018 годах коллективом Научно-исследовательского центра «СтаДиО» под руководством члена-корреспондента РААСН А.М. Белостоцкого был выполнен комплекс работ по научно-техническому сопровождению проектов – расчётному обоснованию механической безопасности [24] [напряжённо-деформированного состояния (НДС), динамики, прочности и устойчивости] пространственных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» стадионов в Санкт-Петербурге, Самаре, Нижнем Новгороде, Волгограде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий (рис. 1) [4].

1. О построении конечноэлементных моделей стадионов

Для дискретизации по пространству и решения соответствующих задач математического (численного) и компьютерного моделирования состояния рассматриваемых стадионов применяется универсальный и мощный современный численный метод механики – метод конечных элементов (МКЭ). Матричное уравнение движения геометрически линейной системы (малые перемещения и деформации) в форме метода перемещений имеет вид:

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

и учитывает кинематические граничные условия и доопределяется начальными условиями (из решения статической задачи при $t = t_0$). Здесь M, C, K и K_G – симметричные блочно-редкозаполненные матрицы масс, демпфирования, линейной (начальной) и геометрической жёсткости конечноэлементной модели (КЭМ) системы (заметим, что в общем случае, кроме





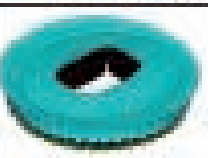

Компьютерная модель стадиона	Матрица жесткости (элементов)	Компьютерная модель стадиона	Матрица жесткости (элементов)
 Санкт-Петербург («Санкт-Петербург Арена», «Зенит»)	1 848 491 элементов 1 481 461 элементов	 Казань («Казань Арена»)	1 091 171 элементов 871 127 элементов
 Нижний Новгород («Нижний Новгород Арена»)	1 044 408 элементов 1 164 371 элементов	 Ростов-на-Дону («Ростов Арена»)	459 108 элементов 764 611 элементов
 Волгоград («Волгоград Арена»)	349 140 элементов 484 100 элементов	 Самара («Самара Арена»)	470 000 элементов 344 000 элементов

Рис. 1. Общие виды разработанных трёхмерных оболочечно-стержневых конечноэлементных моделей футбольных стадионов (программный комплекс «ANSYS Mechanical») с указанием их вычислительных размерностей

того, матрица M является симметрической положительно определённой, матрица K в силу разного рода эффектов может не являться положительно определённой или симметрической); t – время; «точка» означает дифференцирование по времени; $\bar{F}(t)$ – вектор заданных статических и динамических нагрузок; $\bar{R}(\bar{u}, \dot{\bar{u}})$ – вектор псевдонагрузок, моделирующий физически нелинейные эффекты [8; 9; 11; 12; 17; 22]; $\bar{u}(t)$ – искомый вектор обобщённых динамических перемещений КЭМ.

Приведённая общая динамическая постановка естественным образом сводится к важным частным задачам – статической, на собственные значения (собственные частоты и формы колебаний; критические числа и формы потери начальной устойчивости) и спектральной формулировки динамических задач – при соответствующем виде нагрузок и решений путём обнуления незначимых матриц.

Матрицы K, K_G, M, C и векторы \bar{F} и \bar{R} строятся на основе соответственно матриц и векторов сосредоточенных факторов, а также матриц и векторов конечных элементов, вычисляемых в общем случае с применением квадратур оптимальной точности.

Для адекватной и гибкой аппроксимации геометрико-жесткостных, инерционных и диссипативных свойств, статических и динамических нагрузок и результирующего НДС разнообразных пространственных комбинированных систем разработан представительный набор стержневых, мембранных, плитно-оболочечных, двумерных и трёхмерных (объёмных) конечных элементов, совместимых в единой расчётной модели и допускающих альтернативные процедуры сборки.

2. Основные проблемы и достижения в расчётном обосновании стадионов при основных сочетаниях нагрузок и воздействий

В процессе выполнения перечисленных работ авторский коллектив выявил ряд характерных особенностей разработки расчётных моделей [6; 10] и расчётного обоснования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов при основных сочетаниях нагрузок и воздействий. Ниже приведены наиболее значимые из них.

2.1. «Экстремальная» вычислительная размерность задач с известными последствиями. Очевидная сложность заключается в анализе и надлежащей обработке значительного объёма проектной и нормативной документации и построения в точном соответствии с ними подробной геометрической, а затем и конечноэлементной модели системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий. Модели включают в себя внушительное (от несколько сотен до тысяч) количество типов сечений, жесткостей, материалов конструкций (рис. 2).

2.2. Необходимость сравнительного анализа параметров НДС и динамических характеристик (значимой части спектра собственных частот и форм колебаний) полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем «металлические

конструкции покрытия» и «основание – железобетонные конструкции трибун», позволяющего обосновать возможность исследования подсистем в рамках сепаратных моделей различными коллективами конструкторов-расчётчиков. Сопоставив собственные частоты и формы колебаний полной модели сооружения и подмодели конструкций покрытия, можно оценить, насколько велико влияние податливости опорной подсистемы «основание – железобетонные конструкции чаши» на статическое состояние, динамику и устойчивость упомянутой подсистемы «металлоконструкции покрытия».

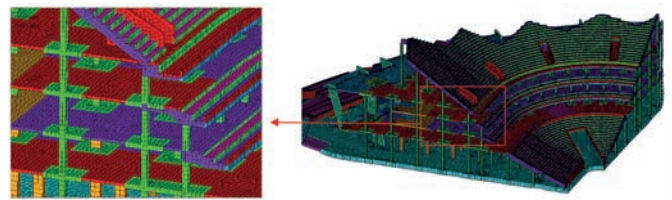


Рис. 2. Фрагмент оболочно-стержневой конечноэлементной модели чаши стадиона в Самаре. Цветом показаны элементы с различными сечениями (программный комплекс «ANSYS Mechanical»)

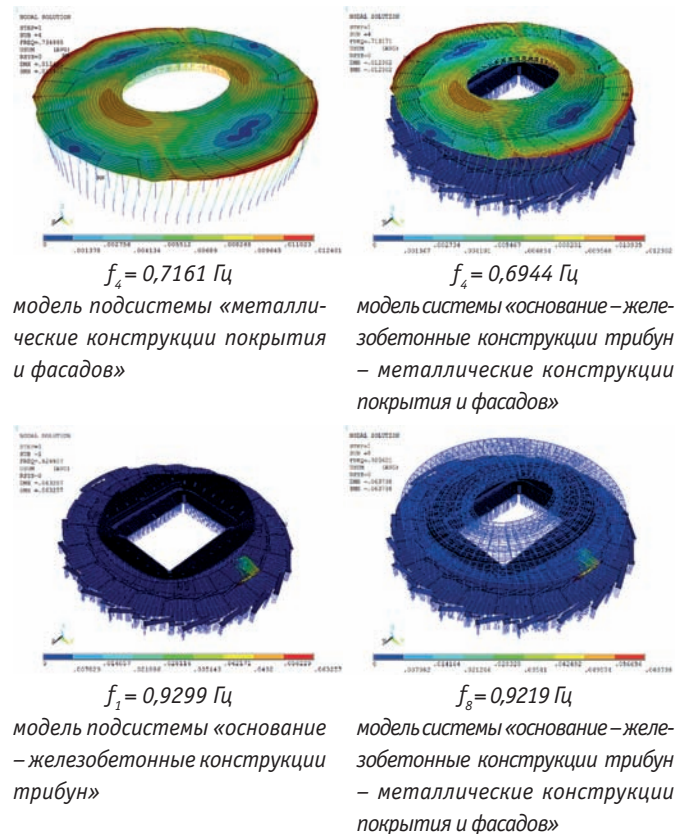


Рис. 3. Сопоставление собственных частот и форм колебаний полной КЭ-модели «основание – железобетонные конструкции трибун – металлические конструкции покрытия и фасадов» стадиона в Нижнем Новгороде и моделей подсистем «металлические конструкции покрытия и фасадов» и «основание – железобетонные конструкции трибун» (программный комплекс «ANSYS Mechanical»)

При слабом влиянии (то есть при отсутствии совместных форм и незначительном расхождении значений частот колебаний для родственных форм) можно сделать вывод о возможности исследования НДС в рамках сепаратных моделей.

Таким образом, оказалось возможным исследование НДС, прочности, устойчивости и динамики конструкций для всех рассмотренных стадионов. На рисунке 3 приведён вариант такого обоснования на примере стадиона в Нижнем Новгороде.

Альтернативным подходом, который можно применить даже в том случае, когда сравнительный анализ собственных частот и форм колебаний полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем не даёт удовлетворительного ответа (возможность декомпозиции), является метод суперэлементов (МСЭ) или метод динамического синтеза подконструкций.

Ключевой процедурой МСЭ является исключение неизвестных, соответствующих внутренним степеням свободы подконструкции (алгоритм статической конденсации).

Пусть имеем конечноэлементную систему уравнений равновесия для подконструкции:

$$K \bar{u} = \bar{F} \tag{2}$$

где K – матрица жесткости; \bar{u} и \bar{F} – векторы узловых перемещений и нагрузок.

После разбиения неизвестных на внутренние (соответствующий индекс « i ») и граничные (соответствующий индекс « b ») систему (2) можно представить в блочной форме:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_i \\ F_b \end{bmatrix} \tag{3}$$

Выразив из первого блочного уравнения системы \bar{u}_i и подставив полученное выражение во второе блочное уравнение, получим систему уравнений относительно \bar{u}_b :

$$\bar{K} \bar{u}_b = \bar{F} \tag{4}$$

где $\bar{K} = K_{bb} - K_{bi} K_{ii}^{-1} K_{ib}$; $\bar{F} = F_b - K_{bi} K_{ii}^{-1} F_i$.

Суперэлементный подход также распространяется на решение системы линейных уравнений на каждом шаге неявной схемы прямого интегрирования уравнений движения (1), а также на каждой итерации при определении собственных частот и форм колебаний.

2.3. Моделирование неоднородного грунтового основания [7; 16] и свайного поля, содержащего десятки тысяч свай. В рамках проведённых исследований моделировались

свайные поля, содержащие порядка 10000 свай (рис. 4), для чего широко применялись макросы, написанные на языке APDL – встроенном в программный комплекс «ANSYS Mechanical», сваи моделировались конечными элементами типа «COMBIN14» с заданной жёсткостью.

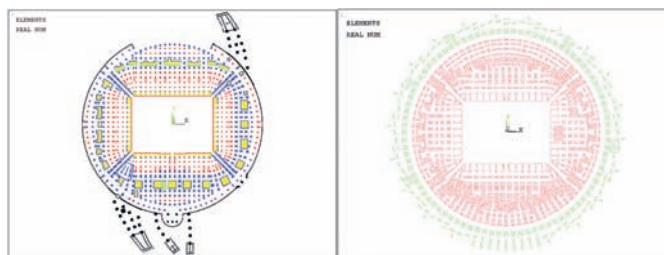
2.4. Многоитерационный процесс дополнения и корректировки (актуализации) положения и характеристик несущих конструкций стадионов на основании результатов соответствующих статических и динамических расчётов, в том числе для удовлетворения критериям зыбкости конструкции «гребёнки» трибун.

При проектировании конструкций трибун спортивных сооружений необходимо исключить возможность их резонансного возбуждения от синхронного движения людей. Для этого предельные прогибы конструкций трибун должны быть определены исходя из физиологических требований («зыбкости») по п. 10.10 СНиП 2.01.07-85* [15]. Кроме того, частоты собственных колебаний конструкций трибун должны быть в вертикальном направлении больше 5 Гц, а в горизонтальном направлении – больше 3 Гц [данные критерии могут незначительно отличаться и определяются в соответствующих специальных технических условиях (СТУ)].

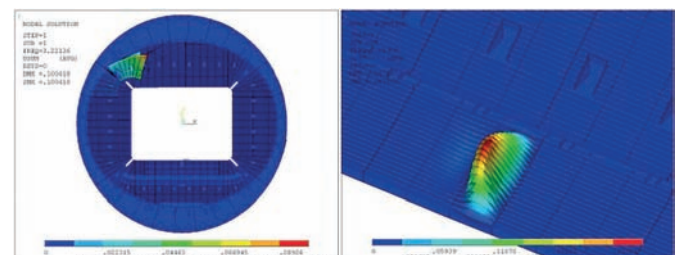
Следует отметить, что при проведении расчётов на «зыбкость» трибун стадионов в Нижнем Новгороде и Волгограде (рис. 5) была выявлена недостаточная жёсткость несущих конструкций. Критерии по низшим собственным частотам трибун не были удовлетворены, что потребовало оперативного внесения изменений в проект. Общая жёсткость конструкций стадионов повышалась путём добавления диафрагм жёсткости.

2.5. Оптимизационный процесс дополнения и корректировки конструкций сборно-разборных (временных) трибун для удовлетворения критериев прочности и устойчивости несущих элементов конструкции и динамической комфортности (зыбкости) трибун.

В составе конструкций некоторых стадионов, возводимых и реконструируемых к проведению Чемпионата мира по футболу 2018 года, для увеличения количества зрительских мест было предусмотрено устройство временных сборно-разборных трибун. В частности, такие трибуны установлены на стадионе в Екатеринбурге, располагаются с двух сторон – северной и южной (сектора за воротами), за пределами



Ростов-на-Дону. 11 091 свая Нижний Новгород. 9 945 свай
Рис. 4. Общий вид свайных полей стадионов в Ростове-на-Дону и Нижнем Новгороде



$f_1 = 3,2214$ Гц $f_{26} = 5,2836$ Гц
Рис. 5. Низшие собственные частоты и формы колебания трибун стадиона в Волгограде

основных конструкций чаши стадиона и установлены на собственных фундаментах. Трибуны представляют собой сложную пространственную стержневую систему.

Моделирование и расчёт временных сборно-разборных трибун стадиона в Екатеринбурге имело многоитерационный характер. Для удовлетворения критериев прочности потребовались корректировки первоначальных вариантов конструкций временных трибун на основании результатов статических и динамических расчётов. В результате проведённых расчётных исследований было установлено, что конструкции удовлетворяют как требованиям прочности и устойчивости, так и физиологическим требованиям по «зыбкости».

2.6. Уточнённый трёхмерный физически нелинейный конечноэлементный анализ НДС и прочности наиболее напряжённых конструктивных узлов металлических покрытий [14] с учётом реальной диаграммы деформирования.

Для наиболее сложных и ответственных узлов металлических конструкций покрытий стадионов разрабатывались и анализировались в программном комплексе «ANSYS» подробные конечноэлементные модели, состоящие из объёмных и/или оболочечных элементов. В центральных зонах конструктивных узлов сетка конечных элементов сгущалась. В зонах стыковки объёмных/оболочечных и балочных элементов задавались специальные условия для создания жёстких связей между узлами. Зоны болтовых соединений принимались без учёта контакта и сдвига, болты явно не моделировались.

Подробные модели узлов встраивались в общие модели покрытия (рис. 6). Разработанные модели верифицировались путём сравнения максимальных перемещений до и после включения узла в общую модель от расчётной нагрузки. Расчёт проводился на первой итерации в линейно-упругой обстановке. В случае превышения допустимых напряжений проводилась вторая итерация расчёта с учётом физической нелинейности. В результате проведённых расчётных исследований с учётом физической нелинейности была обоснована прочность узлов металлических конструкций покрытия и фасадов футбольных стадионов.

2.7. Расчёт на устойчивость металлических конструкций покрытий и фасада с учётом физической и геометрической нелинейностей, а также начальных несовершенств.

Расчёты на устойчивость в геометрически и физически нелинейной постановках проводились для конструкций покрытий стадионов. В каждом случае рассматривались несколько наиболее опасных сочетаний нагрузок (из общего количества порядка сотни сочетаний), для которых и проводился расчёт. Диаграммы деформирования задавались на основе расчётных значений пределов текучести и временного сопротивления материалов.

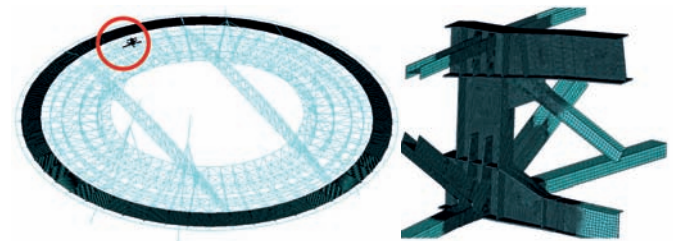
По результатам расчетов были выявлены формы потери устойчивости элементов металлических конструкций покрытий при коэффициентах запаса больше 1.

Выполненными расчётными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта

(геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние металлических конструкций покрытий удовлетворяет нормативным критериям устойчивости (рис. 7).

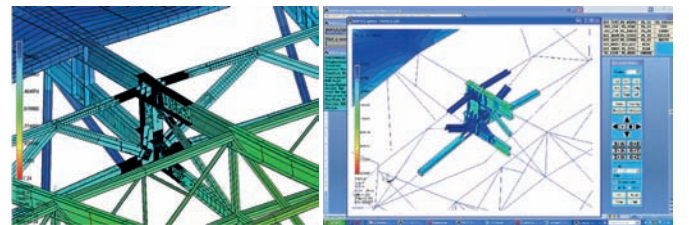
3. Основные проблемы и достижения в расчётном обосновании стадионов при особых сочетаниях нагрузок и воздействий и научном сопровождении экспертизы

В ходе выполнения работ по расчетному обоснованию напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов при особых (сейсмических и аварийных) сочетаниях нагрузок и воздействий, а также научном сопровождении при прохождении экспертизы, авторскому коллективу пришлось столкнуться с рядом характерных особенностей. Ниже приведены наиболее значимые из них.



КЭ-модель несущих конструкции покрытия с оболочечным узлом

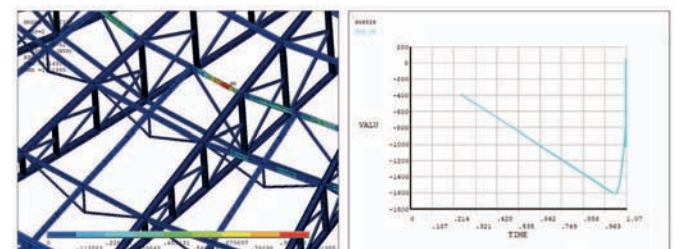
Вид оболочечной КЭ-модели узла



Суммарные перемещения модели узла в составе общей модели (3D-визуализация), м

Эквивалентные напряжения (по Мизесу) конструкции с узлом (на срединных поверхностях и осевых линиях), кН/м²

Рис. 6. Результаты расчета одного из узлов несущих конструкций покрытия стадиона в Санкт-Петербурге



Первая форма потери устойчивости

График изменения во времени продольной силы в верхнем поясе кольцевой фермы при потере устойчивости, кН. Коэффициент потери устойчивости 1,04

Рис. 7. Некоторые результаты расчёта на устойчивость в нелинейной постановке конструкций покрытия стадиона в Нижнем Новгороде

3.1. Геометрически нелинейное моделирование предварительно напряжённых вантовых элементов в составе конструкций покрытия, в том числе при расчёте на прогрессирующее обрушение.

Для несущих конструкций покрытий и фасадов стадионов были получены основные параметры НДС и динамические характеристики, прочность конструкций оценивалась на основании нелинейных (с учётом геометрической нелинейности) статических расчётов для ряда сочетаний нагрузок, устойчивость – на основании нелинейных расчётов с учётом больших перемещений и деформаций, а также пластичности материала.

При расчётах конструкций на прогрессирующее обрушение рассматривались возможные сценарии локального разрушения, указанные в СТУ [например, для покрытия стадиона в Волгограде: отказ одного из канатов в пакете для нижнего несущего кольца (ННК); отказ одного из поясов радиальных вантовых ферм; отказ одного из канатов шпренгеля стропильных балок над фойе стадиона; отказ одного из несущих элементов фасада, кроме опорных].

В процессе выключения элементов по определённым сценариям происходит резкое возрастание перемещений, скоростей деформирования и кинетической энергии по схеме. В дальнейшем за счёт достаточной жёсткости конструкций происходит стабилизация с перераспределением усилий и падением кинетической энергии.

Решение задачи производилось в геометрически и физически нелинейных постановках с применением интегрирования уравнений движения во времени методом Ньюмарка

по этапам: от 0 до 7 секунд производилось квазистатическое нагружение схемы по комбинации нагрузок с равномерным снегом для конструкций покрытия с повышенным демпфированием; от 7 до 10 секунд проводится расчёт покрытия при повышенном демпфировании для анализа поведения системы после загрузки нормативной нагрузкой; от 10 до 11 секунд схема переводится в рабочее состояние, демпфирование снижается до 2%; на 11-ой секунде производится удаление элемента с последующим расчётом схемы в течение 40 секунд. Удаление элементов в расчёте производилось путём снижения их жёсткости в 10000 раз. Демпфирование для металлоконструкций принималось на уровне 2% от критического.

В результате выполненных расчётных исследований установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) металлические конструкции покрытия устойчивы к прогрессирующему обрушению. Здесь представлены схемы сценариев потенциального разрушения и графические результаты расчётов для второго сценария локального разрушения покрытия стадиона в Волгограде: локализация удаляемого элемента; график перемещения узлов сетки в зонах «вышедших из строя» элементов; график изменения кинетической энергии (для подтверждения стабилизации перемещений конструкции) (рис. 8).

3.2. Динамические расчёты системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия уровня «проектное землетрясение» (ПЗ; по линейно-спектральной методике на трёхкомпонентные спектры ускорений) и «максимальное расчётное землетрясение» (МРЗ; прямым интегрированием уравнений движения на трёхкомпонентные акселерограммы) [13].

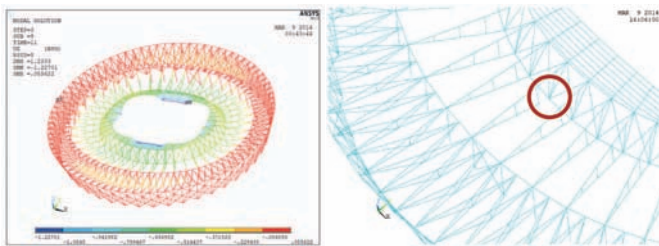
Динамический расчёт системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия уровня 7 баллов, заданное трёхкомпонентной акселерограммой, проводился для стадиона в Ростове-на-Дону. Расчёт производился в линейной области без учёта физической нелинейности с применением метода прямого интегрирования Ньюмарка уравнений динамики во времени, шаг интегрирования – 0,01 с, демпфирование принято 5% от критического.

Эквивалентное рэлеевское демпфирование выражалось через коэффициенты:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 3.14 \cdot D \cdot f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2} = 0.490; \quad \beta = \frac{D}{3.14 \cdot (f_1 + f_2)} = 0.00047, \quad (6)$$

где D – величина демпфирования 0,05 (5%); f_1 и f_2 – начальная и конечная частота демпфируемого диапазона (0,8 Гц и 33 Гц соответственно).

Нагружение квазистатическим воздействием производилось в течение первых 7-ми секунд счёта, на следующем этапе подключалась трёхкомпонентная акселерограмма (рис. 9).



Перемещения по Z для стадии квазистатики, м (T = 11 сек) Локализация удаляемого элемента

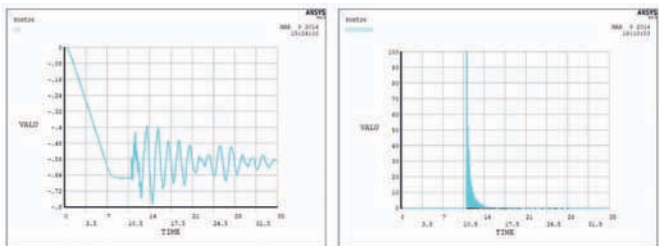


График изменения во времени вертикальных перемещений в узле покрытия в зоне удаляемого элемента, м График изменения во времени кинетической энергии в узле покрытия в зоне удаляемого элемента, кДж

Рис. 8. Результаты расчёта на прогрессирующее обрушение по сценарию № 2 металлических конструкций покрытия и фасада стадиона в Волгограде

С учётом расчётов на акселерограммы одним из важных вопросов анализа и проверки прочности и устойчивости конструкции является определение вклада от сейсмического воздействия.

Для конструкций, рассчитанных в линейной постановке, вводится понижающий множитель $K_1 = 0,25$ с целью учёта нелинейной работы конструкций покрытия. С учётом этого необходимо провести процедуру вычитания статической составляющей из динамической. За статические усилия принимаются усилия на момент окончания процедуры квазистатического нагружения конструкции (условно – на 7-ой секунде). На следующем этапе для зоны наибольшего вклада акселерограммы в перемещения и усилия (условно от 7 до 15 секунд) производится вычленение динамической составляющей, которая перемножается с коэффициентом $K_1 = 0,25$. Финальное усилие получается по следующей формуле:

$$F = [F_{sta} + K_1(F_{sei} - F_{sta})] \gamma_n \quad (7)$$

Выполненными расчётными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих металлических конструкций покрытия удовлетворяет соответствующим нормативным критериям несущей способности (деформативности, прочности и устойчивости) при рассмотренных особых сочетаниях нагрузок и воздействий (рис. 10).

3.3. Сопоставление результатов альтернативных расчётов, выполненных согласно требованиям специальных технических условий, в верифицированных/сертифицированных программных комплексах.

Для повышения качества расчётных обоснований проектных решений современных сложных объектов строительства, во избежание просчётов в проектировании, приводящих к аварийным ситуациям в ходе строительства и эксплуатации [4], разработаны требования, согласно которым проектным организациям рекомендуется осуществлять расчёты не менее чем по двум моделям, независимо разработанным в двух верифицированных ПК, проводить сопоставительный анализ полученных результатов.

Авторским коллективом выработан «стандарт» и проведено в соответствии с ним сопоставление альтернативных результатов расчётов. Эти альтернативные расчёты выполнены согласно требованиям специальных технических условий (а в последнее время – и действующих ГОСТов) в верифицированных/сертифицированных программных комплексах. Для моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» – «ANSYS Mechanical», «MIDAS Civil», «Robot Structural», «SOFiStiK»; для моделей подсистемы «основание – железобетонные конструкции чаши» – «ANSYS Mechanical», «SCAD», «Лира», «SOFiStiK».

Сопоставлялись основные интегральные характеристики конструкций, такие как масса сооружения, собственные частоты и формы колебаний, перемещения сооружения целиком и отдельных конструктивных элементов, усилия в основных типах несущих конструктивных элементов. Для того чтобы

добиться приемлемого различия значений в тесном взаимодействии с коллегами, выполняющими альтернативный расчёт, были проведены калибровки расчётных моделей и устранены все возможные расхождения в жесткостных характеристиках, нагрузках и т.д. При сопоставлении результатов альтернативных расчётов, удалось свести расхождения в значениях сравниваемых параметров конструкций до 5–10% (рис. 11–14).

4. Научно-техническое сопровождение проекта

Научно-техническое сопровождение проекта уникального сооружения в Федеральном автономном учреждении «Главное управление государственной экспертизы» (ФАУ «Главгосэкспертиза России») (в части расчётного обоснования механической безопасности) включает ряд научно- и трудоёмких работ, которые были успешно выполнены авторским коллективом:

- большая предварительная работа, в том числе со смежниками-альтернативщиками, по достижению приемлемого соответствия основных результатов расчётов (см. выше);
- развёрнутые научно обоснованные ответы на замечания и предложения штатных и приглашённых экспертов, в ряде случаев требующие дополнительных исследований;
- убеждение экспертов в достоверности полученных результатов с применением не столько научной аргументации, сколько глубокого знания российских и мировых нормативных основ проектирования и расчётов уникальных сооружений;
- необходимость выполнения работ в сжатые сроки, обусловленные сроком действия договора на экспертизу проекта, при обеспечении высокого научного уровня проводимых исследований.

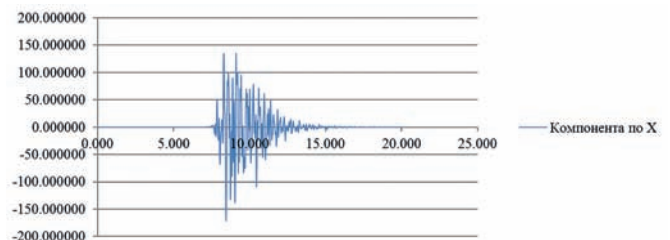


Рис. 9. Составляющая трёхкомпонентной акселерограммы по X (по оси абсцисс – время, с; по оси ординат – ускорение, см/с²). Стадион в Ростове-на-Дону

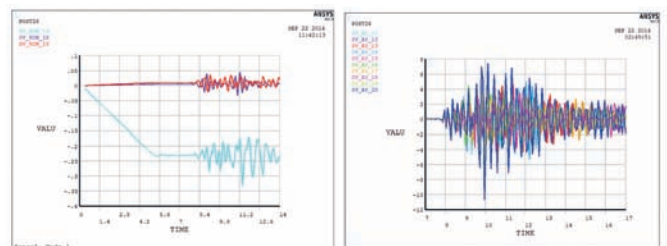


График зависимости перемещений. График ускорений в опорной группе во времени. Перемещение узла по узлов покрытия. Выбраны консольного элемента покрытия узлы с максимальной по модулю по направлениям X, Y, Z (м, сек). амплитуде по U, м/с².

Рис. 10. Результаты расчёта несущих конструкций на сейсмическое воздействие. Стадион в Ростове-на-Дону

По всем исходным и оптимизированным вариантам проектов стадионов к Чемпионату мира 2018 года (Санкт-Петербург, Самара, Нижний Новгород, Волгоград, Ростов-на-Дону, Екатеринбург) в итоге многоитерационного взаимодействия «расчётчик – эксперт» были получены положительные заключения ФАУ «Главгосэкспертиза России».

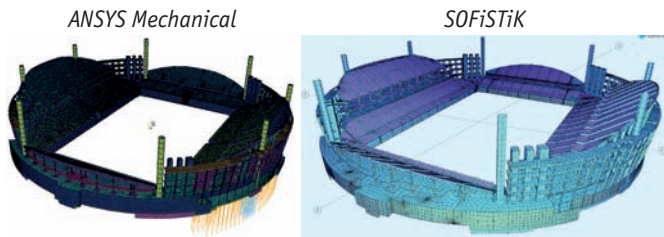


Рис. 11. Расчётные КЭ-модели чаши трибун стадиона в Екатеринбурге

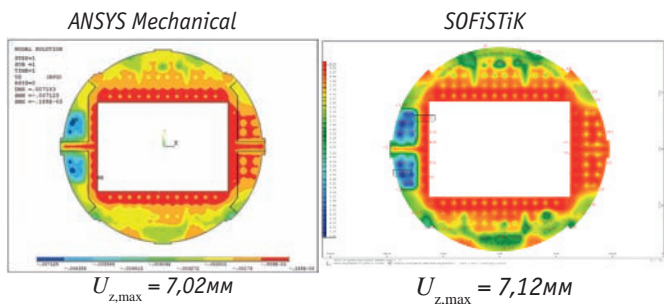


Рис. 12. Сопоставление вертикальных перемещений U_z (мм) конечноэлементных моделей чаши трибун стадиона в Екатеринбурге. Программные комплексы «ANSYS Mechanical» и «SOFiSTiK»

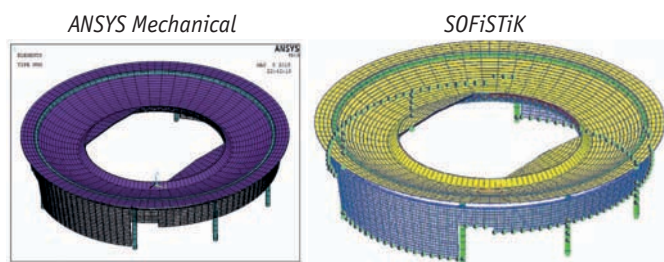


Рис. 13. Расчётные конечноэлементные модели покрытия стадиона в Екатеринбурге. Программные комплексы «ANSYS Mechanical» и «MIDAS Civil»

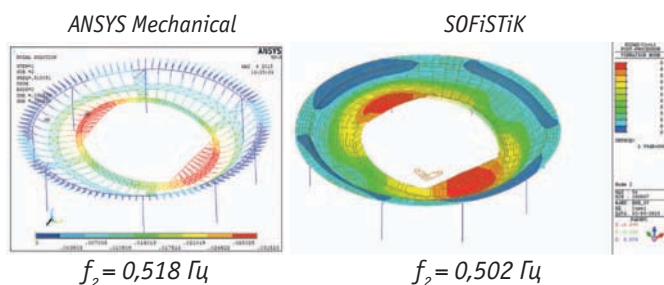


Рис. 14. Сопоставление собственных частот и форм конечноэлементных моделей покрытия стадиона в Екатеринбурге. Программные комплексы «ANSYS Mechanical» и «MIDAS Civil»

Заключение

Изложенные выше и ряд других наукоёмких проблем успешно решены авторским коллективом НИЦ «СтаДиО» при расчётном обоснования НДС, прочности и устойчивости основания и несущих конструкций стадионов в Санкт-Петербурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону и Екатеринбурге при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий. Расчётные исследования выполнены по необходимости в сложных постановках с применением адекватных математических моделей и современных численных методов механики в верифицированных [в системе Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН)] программных комплексах.

В результате выполненного комплекса научно-исследовательских работ на новом уровне решена социально значимая и наукоёмкая проблема обеспечения механической (конструктивной) безопасности уникальных комбинированных объектов строительства (трёхмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов»), имеющих современные архитектурные формы и конструктивные решения, предназначенных для проведения Чемпионата мира по футболу 2018 года (режим FIFA) и для дальнейшего использования после него (режим «Наследие»).

Упомянутые результаты расчётных исследований и специально разрабатываемые (на базе рассмотренных проектных) адаптивные прогнозные математические (конечноэлементные) модели должны составить основу реализуемых систем мониторинга состояния несущих конструкций стадионов для всех стадий «жизненного» цикла.

Основные подходы, методики численного моделирования и результаты расчётных исследований легли в основу курса лекций и практических занятий для студентов, магистрантов и аспирантов ряда ведущих российских университетов [Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ), Российский университет транспорта (МИИТ), Российский университет дружбы народов (РУДН), Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ) и др.], разрабатываются в ряде диссертаций на соискание учёных степеней кандидата наук и доктора наук, апробированы на международных конференциях и симпозиумах, опубликованы в ряде статей и монографий.

Литература

1. Белостоцкий, А.М. Модернизация и применение численных методов к расчету плитно-оболочечных систем на статические и динамические воздействия / А.М. Белостоцкий // Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования. – М.: Наука, 1980. – С. 11–58.
2. Белостоцкий, А.М. Построение эффективных пространственных моделей для статического и динамического расчёта

систем «сооружение – основание» / А.М. Белостоцкий // Труды ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1990. – С. 175–180.

3. *Белостоцкий, А.М.* Прогнозное математическое моделирование состояния и техногенной безопасности ответственности объектов и комплексов мегаполиса / А.М. Белостоцкий // Вестник МГСУ. – 2006. – № 3. – С. 20–61.

4. *Белостоцкий, А.М.* Научно-исследовательский центр Стадио. 25 лет на фронте численного моделирования / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2016. – Vol. 12. – Issue 1. – Pp. 8–45.

5. *Белостоцкий, А.М.* Суперэлементные алгоритмы решения пространственных нелинейных статических и динамических задач большой размерности. Реализация в программном комплексе СТАДИО и опыт расчётных исследований / А.М. Белостоцкий, М.В. Белый // Труды XVIII Международной конференции ВЕМ&FEM-2000. – СПб., 2000. – С. 65–69.

6. *Бондаренко, В.М.* Модели при решении технических задач / В.М. Бондаренко, В.С. Фёдоров // Перспективы развития строительного комплекса. – М., 2014. – С. 262–267.

7. *Ильичёв, В.А.* Обеспечение конструктивной безопасности объектов с подземной частью путём преобразования свойств грунтов (на примере Алабяно-Балтийского тоннеля в Москве) / В.А. Ильичёв, Н.С. Никифорова, Ю.А. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 2. – С. 35–39.

8. *Карпенко, Н.И.* К оценке прочности, жёсткости, момента образования трещин и их раскрытия в зоне чистого изгиба железобетонных балок с применением нелинейной деформационной модели / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016 – № 3 (687). – С. 5–12.

9. *Колчунов, В.И.* Деформационные модели железобетона при особых воздействиях / Колчунов В.И., Колчунов В.И., Фёдорова Н.В. // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 54–60.

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

11. *Петров, В.В.* Математическое моделирование долговечности тонкостенных пространственных конструкций в агрессивной среде / В.В. Петров // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/Международный журнал по расчёту гражданских и строительных конструкций. – 2016. – Vol. 12. – Issue 3. – P. 114–128.

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

13. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* [актуализированная редакция СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)] (с Изменением №1). – М.: ФГУП ЦПП, 2014.

14. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: Минрегион России, 2011.

15. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: ФГУП ЦПП, 2011.

16. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* – М.: ФГУП ЦПП, 2016.

17. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями №1, 2) – М.: ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП, 2012.

18. *Akimov P.A.* Correct Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis Based on Precise Analytical Solutions of Resulting Multipoint Boundary Problems for Systems of Ordinary Differential Equations / P.A. Akimov // Applied Mechanics and Materials. – Vols. 204–208 (2012). – P. 4502–4505.

19. *Akimov, P.A.* Correct Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis / P.A. Akimov, A.M. Belostosky, M.L. Mozgaleva, Aslami Mojtaba, O.A. Negrozov // Advanced Materials Research. – Vol. 1040 (2014). – P. 664–669.

20. *Akimov, P.A.* Advanced Wavelet-Based Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method for Three-Dimensional Local Structural Analysis / P.A. Akimov, M.L. Mozgaleva, O.A. Negrozov // ACSR-Advances in Computer Science Research. – 2015. – Vol. 18. – P. 713–716.

21. *Chen, J.* Rapid simulation of electromagnetic telemetry using an axisymmetric semianalytical finite element method / J. Chen, S. Zeng, Q. Dong, Y. Huang // Journal of Applied Geophysics. – 2017. – Vol. 137. – P. 49–54.

22. *Karpenko, S.N.* Deformability and Strength Determining of Coupling Fittings of Steel Reinforcement in the Reinforced Concrete Structures / S.N. Karpenko, V.I. Travush, I.G. Chepyzubov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 111. – P. 398–403.

23. *Subramanian, V.R., White R.E.* Semianalytical method of lines for solving elliptic partial differential equations / V.R. Subramanian, R.E. White // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. – Issue 4. – P. 781–788.

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

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

Literatura

1. *Belostotskij A.M.* Modernizatsiya i primeneniye chislennykh metodov k raschetu plitnoobolocheknykh sistem na staticheskie

и динамические воздействия / А.М. Белостотский // Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования. – М.: Наука, 1980. – С. 11–58.

2. *Belostotskij A.M.* Postroenie effektivnyh prostranstvennyh modelej dlya staticheskogo i dinamicheskogo rascheta sistem «sooruzhenie – osnovanie» / А.М. Белостотский // Trudy TsNIISK im. Kucherenko, 1990. – С. 175–180.

3. *Belostotskij A.M.* Prognoznoe matematicheskoe modelirovanie sostoyaniya i tehnogennoj bezopasnosti otvetstvennosti ob"ektov i kompleksov megapolisa / А.М. Белостотский // Vestnik MGSU. – 2006. – № 3. – С. 20–61.

4. *Belostotskij A.M.* Nauchno-issledovatel'skij tsentr StaDiO. 25 let na fronte chislennogo modelirovaniya / А.М. Белостотский, P.A. Akimov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstruksij. – 2016. – Vol. 12. – Issue 1. – Pp. 8–45.

5. *Belostotskij A.M.* Superelementnye algoritmy resheniya prostranstvennyh nelinejnyh staticheskikh i dinamicheskikh zadach bol'shoj razmernosti. Realizatsiya v programmnom komplekse STADIO i opyt raschetnyh issledovanij / А.М. Белостотский, M.V. Belyj // Trudy XVIII Mezhdunarodnoj konferentsii BEM&FEM-2000. – SPb., 2000. – С. 65–69.

6. *Bondarenko V.M.* Modeli pri reshenii tehniceskikh zadach / V.M. Bondarenko, V.S. Fedorov // Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa. – 2014. – С. 262–267.

7. *Il'ichev V.A.* Obespechenie konstruktivnoj bezopasnosti ob"ektov s podzemnoj chast'yu putem preobrazovaniya svojstv gruntov (na primere Alabyano-Baltijskogo tonnelya v Moskve) / V.A. Il'ichev, N.S. Nikiforova, Yu.A. Gotman // Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov. – 2017. – № 2. – С. 35–39.

8. *Karpenko N.I.* K otsenke prochnosti, zhestkosti, momenta obrazovaniya treshhin i ih raskrytiya v zone chistogo izgiba zhelezobetonnyh balok s primeneniem nelinejnoj deformatsionnoj modeli / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radajkin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. – 2016 – № 3 (687). – С. 5–12.

9. *Kolchunov V.I.* Deformatsionnye modeli zhelezobetona pri osobnyh vozdeystviyah / Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2018. – № 8. – С. 54–60.

10. *Lyahovich L.S.* Rol' paradoksov v otsenke korrektnosti raschetnyh modelej / L.S. Lyahovich, A.V. Perel'muter, V.I. Slivker // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstruksij. – 2013. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 34–42.

11. *Petrov V.V.* Matematicheskoe modelirovanie dolgovechnosti tonkostennyh prostranstvennyh konstruksij v agressivnoj srede / V.V. Petrov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstruksij. – 2016. – Vol. 12. – Issue 3. – P. 114–128.

12. *Petrov V.V.* Raschet neodnorodnyh po tolshhine oboloček s uchetom fizicheskoy i geometricheskoy nelinejnostej / V.V. Petrov // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2016. – № 1. – С. 112–117.

13. SP 14.13330.2014. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah SNiP II-7-81* [aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81* «Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah» (SP 14.13330.2011)] (s Izmeneniyem №1). – М.: FGUP TsPP, 2014.

14. SP 16.13330.2011. Stal'nye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81*. – М.: Minregion Rossii, 2011.

15. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. – М.: FGUP TsPP, 2011.

16. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83*. – М.: FGUP TsPP, 2016.

17. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003 (s Izmeneniyami №1, 2) – М.: GUP «NIIZhB», FGUP TsPP, 2012.

Белостоцкий Александр Михайлович, 1952 г.р. (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Генеральный директор Научно-исследовательского центра «СтаДиО» (125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, оф. 810. ЗАО НИЦ «СтаДиО»), профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» Российского университета транспорта (МИИТ), профессор кафедры строительной механики Томского государственного архитектурно-строительного университета, профессор департамента строительства Инженерной академии Российского университета дружбы народов, профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела, строительная аэрогидродинамика, механика сплошной среды. ел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: amb@stadyo.ru.

Акимов Павел Алексеевич, 1977 г.р. (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Главный ученый секретарь Российской академии архитектуры и строительных наук (107031, Москва, Большая Дмитровка, 24. РААСН), заместитель директора по науке Научно-исследовательского центра СтаДиО СтаДиО», профессор кафедры строительной механики Томского государственного архитектурно-строительного университета, профессор департамента строительства Инженерной академии

Российского университета дружбы народов. Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, численно-аналитические методы, постановки и методы решения задач строительной механики; комплексы программ, строительная механика, строительная аэрогидродинамика. Тел.: +7 (495) 625-71-63. E-mail: akimov@raasn.ru.

Аул Андрей Андреевич, 1985 г.р. (Москва). Ведущий инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра СтаДиО СтаДиО (125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, оф. 810. ЗАО НИЦ «СтаДиО»). Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела, механика сплошной среды, расчетное обоснование трубопроводных систем. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Дмитриев Дмитрий Сергеевич, 1988 г.р. (Москва). Ведущий инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра «СтаДиО» СтаДиО (125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, оф. 810. ЗАО НИЦ «СтаДиО»). Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела, механика сплошной среды, гидротехническое строительство. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Дядченко Юлия Николаевна (Москва). Старший инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра СтаДиО СтаДиО (125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, оф. 810. ЗАО НИЦ «СтаДиО»). Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Нагибович Александр Игоревич, 1986 г.р. (Москва). Ведущий инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра «СтаДиО» СтаДиО (125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, оф. 810. ЗАО НИЦ «СтаДиО»). Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Островский Константин Игоревич, 1988 г.р. (Москва). Кандидат технических наук. Ведущий инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра «СтаДиО». Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Павлов Андрей Сергеевич, 1984 г.р. (Москва). Кандидат технических наук. Ведущий инженер-расчётчик отдела расчётных исследований Научно-исследовательского центра СтаДиО. Научные интересы: математическое моделирование, численное моделирование, численные методы, комплексы программ, строительная механика, механика деформируемого твердого тела. Тел.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Belostotsky Alexander Mikhailovich, born in 1952 (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAACS. Director General of the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO), Professor of the Department of Building Constructions, Buildings and Structures at the Russian University of Transport (MIIT), Professor of the Department of Building Mechanics of the Tomsk State University of Architecture and Construction, Professor of the Construction Department of the Engineering Academy of the Russian Peoples' Friendship University, Professor of the Department of Building Constructions and Computational Mechanics at the Perm National Research Polytechnic University. Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids, construction aerohydrodynamics, continuum mechanics. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: amb@stadyo.ru.

Akimov Pavel Alekseevich, born in 1977 (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the RAACS. Chief Scientific Secretary at the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (107031, Moscow, Bolshaya Dmitrovka st., 24. RAACS), Deputy Director for Science of the "Scientific and Research Center StaDyO", Professor of the Department of Construction Mechanics at the Tomsk State University of Architecture and Construction, Professor of the Construction Department at the Engineering Academy of Peoples' Friendship University of Russia. Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, numerically-analytical methods, statements and methods for solving the problems of construction mechanics; complexes of programs, construction mechanics, construction aerohydrodynamics. Tel.: +7 (495) 625-71-63. E-mail: akimov@raasn.ru.

Aul Andrey Andreevich, born in 1985 (Moscow). Leading Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids, continuum mechanics, design justification of pipeline systems. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Dmitriev Dmitry Sergeevich, born in 1988 (Moscow). Leading Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids, continuum mechanics, hydrotechnical construction. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Dyadchenko Yulia Nikolaevna (Moscow). Senior Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Nagibovich Alexander Igorevich, born in 1986. (Moscow). Leading Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Ostrovsky Konstantin Igorevich, born in 1988. (Moscow). Candidate of Technical Sciences. Leading Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Pavlov Andrey Sergeevich, born in 1984. (Moscow). Candidate of Technical Sciences. Leading Engineer-Calculationalist at the Department of Computational Research of the "Scientific and Research Center StaDyO" (25040, Moscow, 3-ya Yamskogo Polya St, 18, office 810. StaDyO). Scientific interests: mathematical modeling, numerical modeling, numerical methods, program complexes, construction mechanics, mechanics of deformable solids. Tel.: +7 (499) 706-88-10. E-mail: stadyo@stadyo.ru.