

Нагибович Александр Игоревич

**СУПЕРЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ
КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ
«ОСНОВАНИЕ – ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ –
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ»**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: **Белостоцкий Александр Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Официальные оппоненты: **Гайджуров Петр Павлович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донской государственный
технических университет», профессор кафедры
«Техническая механика»

Дмитриева Татьяна Львовна
доктор технических наук, доцент, заведующая
кафедрой теоретической механики и сопротивления
материалов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский
центр «Строительство»

Защита состоится «19» июня 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.188.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.188.08, кандидат физико-
математических наук, доцент

А.И. Швейкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Ключевая особенность *математического моделирования* (здесь и далее везде подразумевается, что математическое моделирование осуществляется с использованием численных методов, реализуемых в программных комплексах) статического и динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) уникальных объектов строительства: разработку и расчетную оптимизацию связанных большеразмерных основных подсистем «основание», «железобетонные конструкции», «металлические конструкции покрытия» ведут независимо различные проектно-конструкторские организации. Размерность комбинированных строительных систем может достигать сотен тысяч различных типов конструктивных элементов и, соответственно, десятков миллионов степеней свободы их конечноэлементных моделей. Построить адекватную расчетную модель полной системы, например, современных футбольных стадионов, таким организациям не представляется возможным. Препятствиями к этому служат различные факторы: от несовместимости форматов файлов расчетных моделей в различных программных комплексах и большой вычислительной размерности таких моделей до коммерческих тайн.

Для решения этой проблемы необходимо разработать методику математического моделирования, позволяющую обосновать возможность перехода к проведению расчетов в рамках отдельных моделей подсистем («организационный» аспект) и снизить вычислительную размерность задачи.

Степень разработанности темы исследования. Суперэлементные подходы широко применяются в аэрокосмической отрасли и машиностроении, но не представлены в должной степени в строительстве. Методика математического моделирования комбинированных большеразмерных систем, реализующая упомянутые суперэлементные подходы, является эффективным способом преодоления проблемы обоснования возможности перехода к расчетам НДС и динамических характеристик (значимых собственных частот и форм колебаний) в рамках моделей подсистем и снижения вычислительной размерности. В связи с этим настоящее диссертационное исследование необходимо рассматривать с позиций развития современных методик определения НДС и динамических характеристик комбинированных большеразмерных систем с надлежащей верификацией и апробацией.

Целью диссертационной работы является разработка, верификация и апробация эффективной методики суперэлементного моделирования динамических характеристик большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия», например, современных футбольных стадионов (далее – Методики).

Задачи, решенные для достижения поставленной цели:

1. Аналитический обзор современных математических моделей, численных методов и программных средств, в том числе и суперэлементных, статических и динамических расчетов комбинированных большеразмерных систем строительных конструкций и сооружений.

2. Разработка суперэлементной Методики, позволяющей обоснованно разделить исходную систему на связанные подсистемы «основание», «железобетонные конструкции», «металлические конструкции», а также снизить вычислительную размерность задач.

3. Программная реализация разработанной Методики в базовом программном комплексе.

4. Верификация разработанной Методики на модельных и тестовых задачах, имеющих альтернативное численное подтверждение, прежде всего, на полных конечноэлементных моделях.

5. Апробация и подтверждение «организационной» и вычислительной эффективности Методики на реальных большеразмерных комбинированных системах футбольных стадионов, возведенных к Чемпионату мира по футболу 2018 года в России.

Объект исследования. Комбинированные большеразмерные системы «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» и их динамические характеристики.

Предмет исследования. Высокоточное определение динамических характеристик систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия».

Научная новизна работы:

1. Разработана Методика, позволяющая обоснованно разделить исходную систему на связанные подсистемы «основание», «железобетонные конструкции», «металлические конструкции» уникальных объектов строительства, также снизить вычислительную размерность задач.

2. На программном комплексе, реализующем Методику, показана эффективность разработанного подхода к исследованию динамических характеристик комбинированных большеразмерных систем схожего типа.

3. С применением разработанной Методики впервые решены наукоемкие задачи высокого уровня ответственности, сложности и вычислительной размерности – проведены расчетные исследования динамических характеристик футбольных стадионов в Санкт-Петербурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге.

4. Для рассмотренных стадионов исследована специфика использования разработанной Методики и реализована на практике возможность «параллельной» работы групп разработчиков основных подсистем большеразмерных задач.

Теоретическая значимость работы. Разработана, верифицирована и апробирована методика суперэлементного моделирования динамических характеристик комбинированных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» уникальных объектов строительства.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная, верифицированная и апробированная методика суперэлементного моделирования использовалась при расчетном обосновании НДС и прочности футбольных стадионов в Санкт-Петербурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге. Она обеспечивает новый, востребованный современной

практикой уровень расчетных исследований статики и динамики пространственных большеразмерных комбинированных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия».

Методология и методы исследования. При подготовке диссертации были использованы современные достижения прикладной математики и строительной механики в области численных методов определения динамических характеристик пространственных комбинированных большеразмерных систем. В частности, в качестве расчетных моделей объектов рассматривались пространственные динамические конечноэлементные модели комбинированных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия». Для нахождения собственных частот и форм колебаний в энергетически значимом диапазоне указанных систем применяется блочный метод Ланцоша. Для определения динамических характеристик подсистем с суперэлементами применялись методы динамического синтеза подконструкций. Проведена реализация разработанной методики и алгоритмов на параметрическом языке программирования APDL. Верификация и апробация методики проведены с использованием универсального, верифицированного программного комплекса ANSYS Mechanical, реализующего метод конечных элементов (МКЭ) и численные методы решения динамических задач.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты аналитического обзора современных постановок, численных методов и программных комплексов, применяемых для расчетов комбинированных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» при различных воздействиях;

– разработанная методика суперэлементного моделирования динамических характеристик пространственных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» уникальных объектов строительства, программно реализующая современные подходы математического моделирования;

– результаты численного решения верификационных задач, показавших возможности, ограничения, «организационную» и вычислительную эффективность разработанной методики и ее программно-алгоритмических составляющих;

– результаты расчета динамических характеристик реальных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия» стадионов в Нижнем Новгороде и Ростове-на-Дону к Чемпионату мира по футболу 2018 года.

Личный вклад автора диссертации заключается в обоснованной конкретизации задач исследования, обобщении, систематизации и развитии теоретических составляющих исследуемых вопросов, также разработке, верификации и апробации суперэлементной методики. Соискателем самостоятельно разработаны расчетные конечноэлементные и суперэлементные модели, получены, интерпретированы и апробированы основные результаты исследования.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается удовлетворительным соответствием полученных результатов результатам контрольных расчетов, выполненных с привлечением верифицированного в системе

Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) комплекса программ промышленного типа. Также – практическим опытом использования разработанной суперэлементной методики для реальных уникальных объектов строительства с достаточной степенью сходства результатов с альтернативными, независимо полученными.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XXV Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» ВЕМ&FEM, г. Санкт-Петербург, 23-26 сентября 2013 г. V Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Иркутск, 1-6 июля 2014 г. XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (ВЕМ&FEM), г. Санкт-Петербург, 28-30 сентября 2015 г. VI Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Владивосток, 15-20 августа 2016 г. V Международный форум высотного и уникального строительства 100+ Forum Russia, г. Екатеринбург, 4-6 октября 2017 г. VII Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), г. Москва, 14 февраля 2018 г., VII Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Новосибирск, 1-8 июля 2018 г., на регулярных научных семинарах кафедры прикладной математики Научно-исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) и Научно-исследовательского центра СтаДиО (под руководством члена-корреспондента РААСН А.М. Белостоцкого).

Внедрение результатов исследования. Разработанная суперэлементная методика применялась автором при расчетном обосновании статического и динамического НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов в Санкт-Петербурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге при различных воздействиях. Результаты расчетов были сопоставлены с альтернативными, независимо полученными другими командами расчетчиков, и показали достаточную степень сходства. Эти расчетные обоснования в составе проектов футбольных стадионов получили положительное заключение в Главгосэкспертизе России.

Публикации. Основные положения диссертационной работы представлены в 8 публикациях в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, в том числе во входящем в Перечень ВАК РФ по специальности 05.13.18 и в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (129 наименований, в том числе – 60 на иностранных языках), 161 страницы основного текста, 31 рисунка и 42 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, охарактеризована степень ее разработки, приведены цели и задачи работы, указаны объект и предмет исследования, описаны методология и методы исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад соискателя, достоверность и обоснованность научных положений, представлены сведения об апробации работы, внедрении результатов исследования и публикациях автора, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен краткий обзор современного состояния проблемы моделирования несущих конструкций уникальных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия». Приведен ряд особенностей математического моделирования НДС конструкций футбольных стадионов, как ярких примеров таких систем. Далее представлен аналитический обзор современных постановок, численных методов и программных комплексов для расчетов динамических характеристик комбинированных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия». Акцент сделан на суперэлементных подходах для динамических задач. На основе выполненного аналитического обзора состояния заявленной проблемы конкретизированы задачи диссертационного исследования

Вторая глава посвящена описанию разработанной методики суперэлементного моделирования динамических характеристик пространственных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» (рисунок 2.1). Представлены лежащие в основе разработанной суперэлементной методики формулировки наиболее эффективных современных подходов математического моделирования, а также описание её программной реализации.

При проектировании таких сложных комбинированных систем, разработкой проектной документации и расчетным обоснованием механической безопасности связанных подсистем «основание – железобетонные конструкции» и «металлические конструкции» занимаются различные организации и необходимо реализовать возможность расчета подсистем в рамках отдельных моделей. Сделать это можно двумя способами. В первом случае сопоставляя динамические характеристики полной системы и подсистем, оценить их взаимное влияние и тем самым обосновать возможность перехода к отдельным моделям (блоки 1-5). Во втором, универсальном, случае воспользоваться суперэлементными технологиями. При суперэлементном подходе (блоки 6-14), каждая из организаций разрабатывает КЭ-модель «своей» подсистемы (блок 6), формирует суперэлемент (СЭ) (блоки 8-11), который представляет собой набор матриц влияния. Далее коллективы расчетчиков обмениваются этими суперэлементами и стыкуют «свою» КЭ-модель с суперэлементом, разработанным и сформированным коллегами (блоки 12). Тем самым обеспечивается переход от исследования полной системы к отдельным подсистемам с корректным учетом динамических характеристик подсистем, разрабатываемых смежниками.

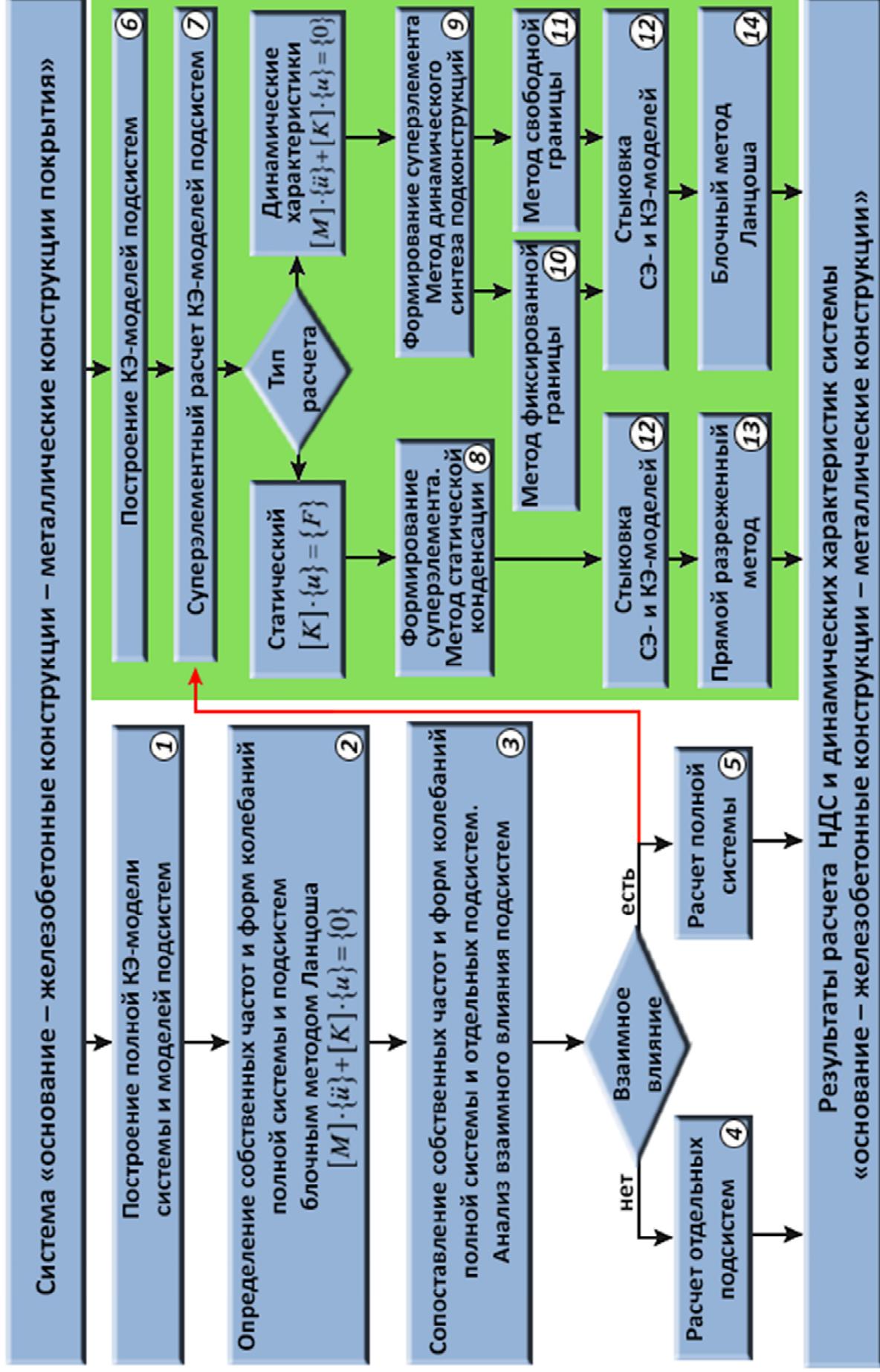


Рисунок.2.1. Общая структурная схема разработанной методики суперэлементного моделирования динамических характеристик систем «основание – железобетонные конструкции – металлические конструкции»

Для расчета динамических характеристик в настоящем исследовании *используется метод динамического синтеза подконструкций* (блок 9). Суть метода динамического синтеза подконструкций состоит в переходе от полного набора физических степеней свободы к редуцированному набору обобщенных координат, т.е. для представления перемещений подконструкции используется процедура Релея-Ритца, в которой перемещение представляется в виде суперпозиции базисных векторов (форм колебаний). Рассматривается два варианта метода динамического синтеза, отличающихся способом ограничения стыковочных степеней свободы – метод фиксированной границы и метод свободной границы. Стыковочными или внешними степенями свободы называют те, по которым производится стыковка суперэлемента с КЭ-моделью подсистемы или другими суперэлементами.

Каждая подконструкция в методе динамического синтеза определяется матрицами жесткости и масс. Матричное уравнение движения для недемпфированной системы имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}. \quad (1)$$

Разделим эти уравнения в соответствии с внешними и внутренними степенями свободы:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \end{Bmatrix}, [M] = \begin{bmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix}, \{F\} = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_s \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

В данной записи степени свободы внешних узлов подконструкции (СЭ) обозначаются индексом “m”, для остальных, внутренних узлов, входящих в состав суперэлемента – “s”. Вектор физических перемещений может быть покомпонентно представлен в обобщенных координатах:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} u_m \\ y_\delta \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где y_δ – усеченный набор обобщенных модальных координат, $[T]$ – матрица преобразования.

Для *метода фиксированной границы* (блок 10) матрица преобразования определяется как:

$$[T] = \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ [G_{sm}] & [\Phi_s] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $[G_{sm}] = -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]$ – избыточные статические граничные формы, $[\Phi_s]$ – нормальные собственные формы колебаний подконструкции с фиксированными границами.

Для *метода свободной границы* (блок 11), матрица преобразования имеет вид:

$$[T] = \begin{bmatrix} [I] & 0 & 0 \\ [G_{sm}] & [\Phi_{sr}] & [\hat{\Phi}_s] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $[\hat{\Phi}_s] = [[\Phi_s] - [G_{sm}][\Phi_m]]$, $[\Phi_m]$ – матрица набора внешних степеней свобод нормальных форм колебаний при свободной границе (собственные вектора получены при незакрепленных внешних узлах), $[\Phi_s]$ – матрица набора внутренних степеней

свобод нормальных форм колебаний при свободной границе, $[\Phi_{sr}]$ – матрица форм колебаний компенсации инерции, $[\Phi_{sr}]$ включена только в том случае, если присутствуют колебания жесткого тела. Любые присутствующие формы колебаний жесткого тела не включены в $[\hat{\Phi}_s]$, $[\Phi_{sr}] = [K_{ss}]^{-1} [[M_{sm}] + [M_{ss}][G_{sm}]] [\Psi_{mr}]$, где $[\Psi_{mr}]$ – матрица набора внешних степеней свобод форм колебания жесткого тела.

Подставляя преобразование (3) в матричное уравнение движения (1), получим уравнение движения в редуцированном пространстве.

Верификационные и апробационные исследования проводились на базе Научно-исследовательского центра СтаДиО (ЗАО НИЦ СтаДиО). В качестве основного выбран лицензионный универсальный программный комплекс (ПК) ANSYS Mechanical, реализующий суперэлементные алгоритмы, широко применяемые в разработанной методике. ANSYS Mechanical верифицирован в системе и согласно требованиям Российской академии архитектуры (РААСН), автор диссертации является одним из членов коллектива верификационного отчета. Автором разработана программа для ЭВМ «Расчет параметров НДС и динамических характеристик комбинированной большеразмерной системы несущих конструкций футбольного стадиона с применением суперэлементного подхода Stadium_CMS.msc», позволяющая оптимизировать процесс создания расчетных КЭ-моделей, задание параметров расчета и обработку полученных результатов. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Третья глава посвящена описанию результатов верификации разработанной суперэлементной методики на тестовых задачах.

В качестве первого верификационного примера выбрана задача из оригинального верификационного отчета ПК ANSYS Mechanical. В этом тестовом примере определяются и сравниваются динамические характеристики камертона, полученные с помощью единой КЭ-модели и суперэлементных моделей с использованием различных методов учета внутренних форм колебания подконструкций.

Этот пример демонстрирует работоспособность метода динамического синтеза подконструкций. Сравнительный анализ вычисленных собственных частот и форм колебаний камертона по упомянутым моделям показал близкие результаты для всех проведенных вариантов расчетов. Максимальная разница вычисленных собственных частот колебаний составила 0,014 %. Наиболее эффективными и удобными, с точки зрения практического использования и реализации в применяемом ПК, показали себя методы фиксированной и свободной границы.

В качестве второго примера рассмотрен реальный объект – входной блок ТЦ «Волгамолл» в г. Волжский, имеющий конструкцию, схожую с исследуемым типом большеразмерных систем. На этом примере проводится анализ:

- влияния подробности КЭ-модели (сетки конечных элементов) на точность вычисленных динамических характеристик сооружения, а также на «машинное» время, затраченное на вычисления.

- возможности перехода к расчету динамических характеристик подсистем в рамках отдельных моделей «основание – железобетонные конструкции каркаса» и «металлоконструкции покрытия»;

- возможности и особенности применения метода динамического синтеза

подконструкций к расчетам такого рода комбинированных систем. Анализируется влияние выбора метода учета внутренних форм колебаний подконструкции и количество учитываемых внутренних собственных частот и форм колебаний подконструкции.

– «организационной» и вычислительной эффективности предложенных вариантов разработанной суперэлементной методики.

Построены и верифицированы следующие пространственные оболочечно-стержневые КЭ-модели несущих конструкций входного блока:

1. полной системы «железобетонные конструкции каркаса – металлические конструкции покрытия»;
2. подсистемы «железобетонные конструкции каркаса»;
3. подсистемы «металлические конструкции покрытия»;
4. подсистемы «железобетонные конструкции каркаса» с учетом металлических конструкций покрытия как суперэлемента;
5. подсистемы «металлические конструкции покрытия» с учетом железобетонных конструкций каркаса как суперэлемента.

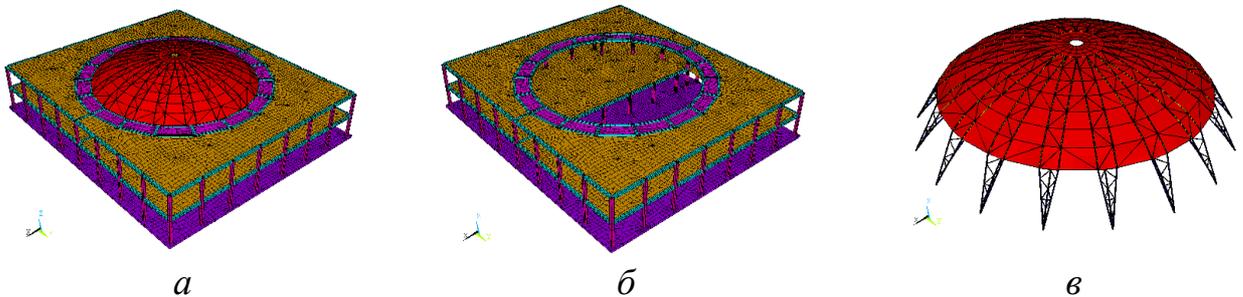


Рисунок 3.1. Разработанные расчетные КЭ-модели несущих конструкций входного блока гипермаркета «ВолгаМолл» в г. Волжский. а) «железобетонные конструкции каркаса – металлические конструкции покрытия»; б) «железобетонные конструкции каркаса»; в) «металлические конструкции покрытия»

Для моделирования плит фундамента и перекрытий использовались КЭ оболочки средней толщины типа SHELL181, реализующие теорию Миндлина-Рейснера. Балки и колонны выполнены стержневыми КЭ типа BEAM188, реализующими теорию Тимошенко. При суперэлементном расчете использовался MATRIX50 (суперэлемент) – группа конечных элементов, рассматриваемая в качестве отдельного элемента и представленная редуцированными матрицами (жесткости, масс, нагрузок).

Сопоставление вычисленных собственных частот и форм колебаний входного блока на КЭ-моделях различной подробности показало, что оптимальным по точности результатам и вычислительной размерности соответствует разбиение модели по 3-4 конечных элемента на один конструктивный элемент сооружения (пролет плиты, балка, колонна, элемент фермы покрытия).

Сравнительный анализ вычисленных динамических характеристик полной системы «основание – железобетонные конструкции каркаса – металлоконструкции покрытия» и подсистем показал значимое влияние податливости опорной подсистемы на поведение подсистемы конструкций покрытия. Это свидетельствует о

невозможности проведения независимых расчетов подсистем «основание – железобетонные конструкции каркаса» и «металлические конструкции покрытия».

Сопоставление собственных частот и форм колебаний полной системы, моделируемой «в лоб» конечными элементами, и подсистем с суперэлементами (здесь и далее подсистемой с суперэлементом для краткости обозначена полная система, в которой одна из подсистем моделируется конечными элементами, а вторая – динамическим суперэлементом) показывает практически идентичные результаты. Различие по собственным частотам при учете достаточного количества внутренних форм колебаний подконструкций для метода фиксированной границы составило, в основном, не более 0,007 %, а для отдельных форм – до 0,295 %. Для метода свободной границы – в основном, не более 0,005 %, а для отдельных форм колебаний – до 0,038 %.

Количество внутренних форм колебаний подконструкций, которое необходимо учесть для получения адекватного результата, существенно зависит от жесткостных и инерционных характеристик самой конструкции. Для сооружений рассматриваемого типа необходим учет внутренних форм колебаний подконструкции в частотном диапазоне в 1,5 - 2 раза превышающем исследуемый частотный диапазон всей системы.

Для рассмотренной задачи «малой» размерности (имея в виду реальные уникальные сооружения) фактор вычислительной эффективности, как показал сравнительный анализ с полными КЭ-моделями, ожидаемо не является сильной стороной разработанной суперэлементной методики.

На основе представленных и проанализированных результатов верификационных расчетных исследований обоснована применимость суперэлементных подходов моделирования динамических характеристик исследуемых комбинированных большеразмерных систем.

В четвертой главе представлены результаты апробации разработанной суперэлементной методики на большеразмерных задачах. Объектами исследования выбраны спроектированные и построенные к Чемпионату мира по футболу 2018 года стадионы большой вместимости (45 000 зрителей): в Нижнем Новгороде и Ростове-на-Дону, как показательные примеры применения всех ветвей методики.

Построены и верифицированы пространственные оболочечно-стержневые конечноэлементные и суперэлементные модели несущих конструкций стадионов (таблицы 4.1 и 4.2). Для фундаментных плит, стен, перекрытий, лестничных и лифтовых шахт, гребенки трибун, балок под гребенкой трибун использовались КЭ оболочки типа SHELL181. Балки и колонны моделируются стержневыми КЭ типа BEAM188. MPC184 – элемент кинематических ограничений, использовался в местах соединения колонн и плит перекрытий. LINK180 – пространственный стержневой элемент, работающий на растяжение или сжатие. Сваи моделируются специальными КЭ типа COMBIN14. Элемент SURF154 используется для назначения различных нагрузочных эффектов. MATRIX50 – суперэлемент.

Для вычисления значимой части спектра собственных частот и форм колебаний использовался прямой блочный метод Ланцоша. Расчеты проводились с учетом масс только от собственного веса несущих конструкций. Для каждой системы

и подсистемы были вычислены частоты и формы собственных колебаний в диапазоне от 0 до 6 Гц. В расчетах с использованием суперэлементов учет внутренних форм колебаний подконструкции производился методами фиксированной границы и свободной границы. Количество внутренних форм колебаний подконструкции варьировалось. Учитывались внутренние частоты колебаний, попадающие в интервалы: до 3 Гц, 6 Гц, 9 Гц, 12 Гц.

Таблица 4.1. Разработанные КЭ-модели стадиона в Нижнем Новгороде

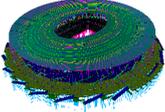
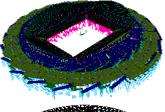
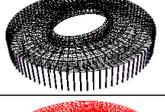
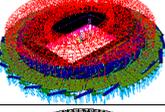
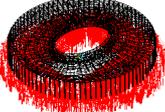
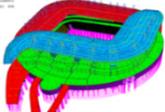
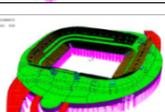
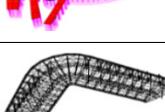
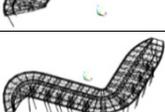
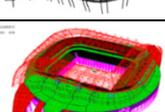
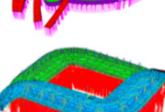
№	КЭ-модели системы/подсистемы	Изображение	Кол-во узлов	Кол-во эл-тов	Типы КЭ
1.1	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия”		633 461	699 383	SHELL181, BEAM188, MPC184, SURF154, LINK180, COMBIN14
1.2	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун”		624 127	684 500	SHELL181, BEAM188, MPC184, SURF154, COMBIN14
1.3	“металлические конструкции покрытия”		9 728	15 102	BEAM188, MPC184, SURF154, LINK180
1.4	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун” + суперэлемент покрытие		624 127	684 501	SHELL181, BEAM188, MPC184, SURF154, COMBIN14, MATRIX50
1.5	“металлические конструкции покрытия” + суперэлемент фундаменты и трибуны		9 728	15 103	BEAM188, MPC184, SURF154, LINK180, MATRIX50

Таблица 4.2. Разработанные КЭ-модели стадиона в Ростове-на-Дону

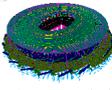
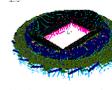
№	КЭ-модели системы/подсистемы	Изображение	Кол-во узлов	Кол-во эл-тов	Типы КЭ
2.1	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия”		621 048	604 358	SHELL181, MPC184, BEAM188, SURF154, LINK180, COMBIN14
2.2	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун”		599 417	589 387	SHELL181, BEAM188, MPC184, SURF154, COMBIN14
2.3	“металлические конструкции северо-восточного крыла покрытия”		9 185	6 304	BEAM188, LINK180, SURF154
2.4	“металлические конструкции юго-западного крыла покрытия”		12 446	8 667	BEAM188, LINK180, SURF154
2.5	“основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун” + суперэлемент покрытия		599 417	589 388	SHELL181, MPC184, BEAM188, SURF154, COMBIN14, MATRIX50
2.6	“металлические конструкции покрытия” + суперэлемент фундаменты и трибуны		21 651	14 972	BEAM188, LINK180, SURF154, MATRIX50

Сравнительный анализ собственных частот и форм колебаний полной системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия» и подсистем стадиона в Нижнем Новгороде выявил слабое влияние податливости опорной подсистемы на динамические характеристики подсистемы конструкций покрытия, что позволяет обосновать исследование последней в рамках отдельной модели. В свою очередь, подсистема «металлические конструкции покрытия» не оказывает существенного влияния на поведение опорной подсистемы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун», что также дает основание выполнять исследования изолированной подсистемы.

Аналогичное сравнение собственных частот и форм колебаний полной системы и подсистем стадиона в Ростове-на-Дону показало значительное взаимное влияние опорной подсистемы и подсистемы конструкций покрытия на динамические характеристики. Это свидетельствует о невозможности проведения независимых расчетов подсистем, без учета жесткостных и массовых характеристик всех элементов полной системы.

В таблицах 4.3 и 4.4 зеленым фоном отмечены собственные частоты колебаний полной системы и подсистем, на которых формы колебаний совпадают. Красным фоном отмечены те частоты колебаний подсистем, на которых формы колебаний не соответствуют формам полной системы, либо отсутствуют.

Таблица 4.3. Сопоставление собственных частот колебания полной системы и составляющих её подсистем стадиона в Нижнем Новгороде

 Модель 1.1		 Модель 1.2		 Модель 1.3		Δ , %	 Модель 1.4		Δ_1 , %	 Модель 1.5		Δ_2 , %
№	Частота, Гц	№	Частота, Гц	№	Частота, Гц		№	Частота, Гц		№	Частота, Гц	
1	0,4116			1	6,049	6,049	1	0,4116	0,000	1	0,4116	0,000
2	0,4177			2	6,072	6,072	2	0,4177	0,000	2	0,4177	0,000
3	0,4701			3	4,179	4,179	3	0,4701	0,000	3	0,4701	0,000
...
7	0,9120			7	2,554	2,554	7	0,9120	0,000	7	0,9120	0,000
8	0,9256	1	0,9299			0,462	8	0,9256	0,000	8	0,9256	0,000
...
682	5,0317			369	5,0325	0,015	682	5,0343	0,052	682	5,0322	0,010
...
749	5,2537			415	5,2532	0,010	749	5,2545	0,015	749	5,2553	0,030
...
922	5,7199	287	5,7239			0,070	922	5,7199	0,000	922	5,7199	0,000
...
1021	5,9895			619	5,9929	0,057	1021	5,9897	0,003	1021	5,9897	0,003
...

Сопоставление собственных частот и форм колебаний полных систем и подсистем с учетом суперэлементов показывает, что расчеты динамических характеристик с применением метода динамического синтеза подконструкций дают результаты, близкие полученным при расчете полной системы. Расхождения величин вычисленных собственных частот колебания для большинства форм не превышает 0,050 %, а для отдельных форм колебаний, в исследуемом диапазоне, составляет до 0,900 % в зависимости от рассмотренного частотного диапазона, при достаточном количестве учтенных внутренних форм колебаний подконструкции.

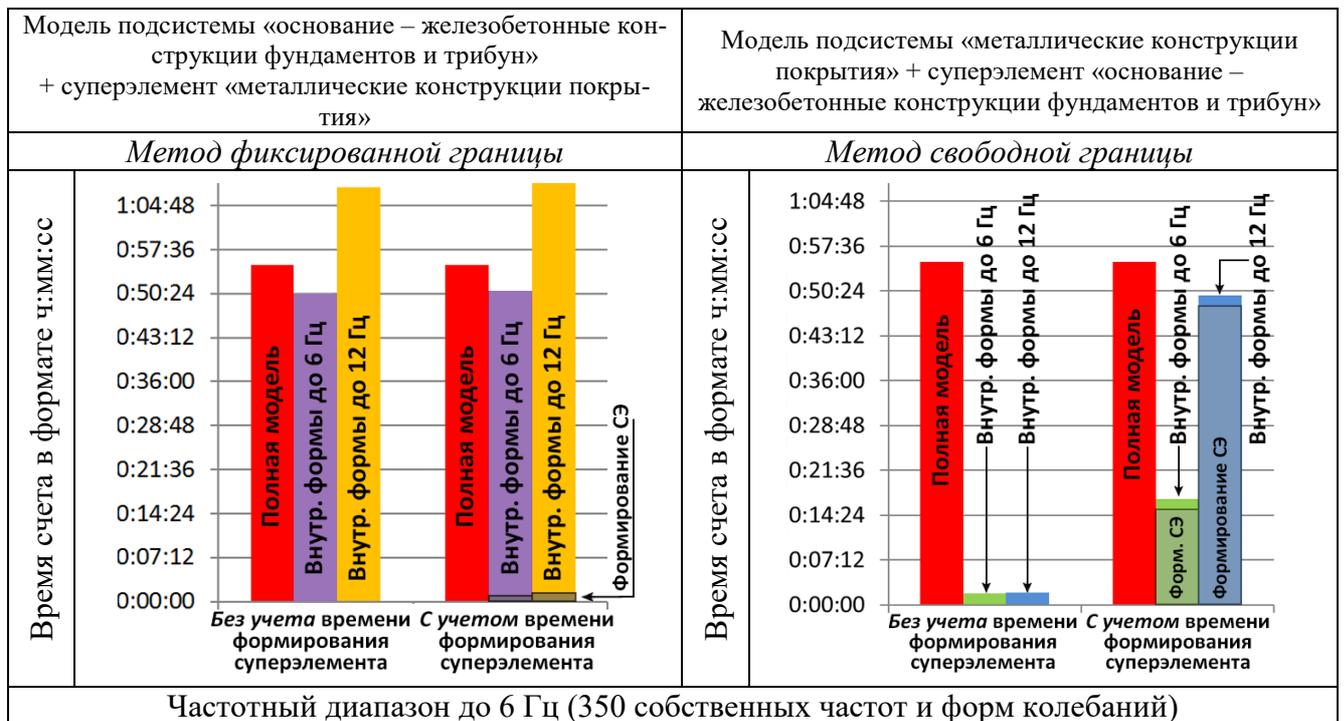


Рисунок 4.14. Сопоставление времени вычисления динамических характеристик полной системы и подсистем с суперэлементами стадиона в Ростове-на-Дону.

Суммарное «машинное» время на формирование суперэлемента и расчет динамических характеристик подсистемы с его применением, при учете достаточного количества внутренних форм колебаний подконструкции, сопоставимо со временем, затраченным на КЭ-расчет полной системы. Время при расчете подсистемы «металлические конструкции покрытия» с учетом суперэлемента «основание – железобетонные конструкции» (не принимая в расчет затраченное «машинное» время на формирование суперэлемента) в 15-30 раз (для Ростова-на-Дону) и в 40-75 раз (для Нижнего Новгорода) меньше, чем затрачиваемое на расчет полной системы. Это дает существенный выигрыш в вычислительной эффективности при проведении многовариантных расчетных исследований подсистемы «металлические конструкции покрытия» с целью её оптимизации, так как повторно формировать суперэлемент не требуется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. По результатам аналитического обзора современных математических моделей, численных методов и программных комплексов, применяемых для статических и динамических расчетов комбинированных большеразмерных систем уникальных сооружений, выполнена конкретизация задач диссертационного исследования.
2. Разработана и программно реализована эффективная суперэлементная методика математического моделирования динамических характеристик большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия», позволяющая перейти к исследованию подсистем «основание», «железобетонные конструкции» и «металлические конструкции покрытия» в рамках отдельных моделей.

3. Верификационные примеры (включая входной блок ТЦ «Волгамолл» в г. Волжский) продемонстрировали эффективность и особенности использования разработанной суперэлементной методики для исследования динамических характеристик комбинированных систем схожего типа.

4. С использованием разработанной методики впервые решены в такой востребованной практикой постановке задачи высокого уровня ответственности, сложности и размерности – проведены расчетные исследования динамических характеристик комбинированных систем футбольных стадионов большой вместительности (от 35 000 до 68 000 зрителей) в Санкт-Петербурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге.

5. В результате сравнительного анализа собственных частот и форм колебаний полной системы и подсистем стадиона в Нижнем Новгороде выявлено слабое влияние податливости опорной подсистемы на динамические характеристики конструкций покрытия, что позволяет обосновать исследование последних в рамках отдельной модели. В свою очередь, подсистема конструкций покрытия не оказывает существенного влияния на поведение опорной подсистемы, что также дает основание выполнять ее исследования изолированно.

6. Напротив, сравнение собственных частот и форм колебаний полной системы и подсистем конструкций стадиона в Ростове-на-Дону показало значительное взаимное влияние подсистем на динамические характеристики. Это свидетельствует о невозможности проведения расчетов подсистем по отдельным моделям без использования суперэлементов.

7. Анализ собственных частот и форм колебаний полных систем и подсистем с суперэлементами стадионов в гг. Нижний Новгород и Ростов-на-Дону показывает, что динамические характеристики практически идентичны при учете достаточного числа внутренних собственных частот и форм колебаний подконструкций.

8. Продемонстрирована наиболее ценная, «организационная» эффективность разработанной Методики для двух реальных комбинированных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия» с применением суперэлементных подходов. Подтверждена вычислительная конкурентоспособность разработанных моделей с суперэлементами (по сравнению с полными КЭ-моделями).

9. Представленные результаты диссертационного исследования позволяют рекомендовать разработанную суперэлементную методику к применению для широкого класса расчетных исследований комбинированных большеразмерных систем уникальных зданий и сооружений.

10. Перспективой дальнейшей разработки данной темы представляется развитие и применение предложенной суперэлементной методики математического моделирования комбинированных большеразмерных систем для решения задач в физически, геометрически, структурно и генетически нелинейных постановках.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Белостоцкий А.М., Нагибович А.И. Обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года в России. Постановка задач расчетных исследований // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2018. Vol. 14. – №1.– С. 26-42. **(ВАК)**

2. Нагибович А.И. Методика суперэлементного моделирования динамики систем «основание – конструкции фундаментов и трибун – конструкции покрытия» стадионов чемпионата мира по футболу 2018 года в России. Описание и верификация // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2018. Vol. 14. – №2.– С. 117-132. **(ВАК)**

3. Nagibovich A.I. Approbation of the developed technique of superelement simulation of dynamics for system “Basis–Foundations structures and stands – Structures of the roof” for stadiums for the 2018 FIFA World Cup in Russia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.– 2018.– Vol. 456.– 012121. **(SCOPUS)**

4. Nagibovich A.I., Belostosky A.M., Dmitriev D.S., Pavlov A.S., Aul A.A., Ostrovsky K.I., Dyadchenco Y.N. and Scherbina S.V. Features of the structural safety analysis (strain-stress state, dynamics, strength and stability) of stadiums for the 2018 FIFA World Cup in Russia. 2018 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.– 2018.– Vol. 456.– 012080. **(SCOPUS)**

5. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Нагибович А.И., Дмитриев Д.С. Особенности расчетов напряженно-деформированного состояния, динамики, прочности и устойчивости конструкций футбольных стадионов к Чемпионату мира 2018 года // *Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов*. – М.: АСВ. – 2016.–Т.2.– С. 358-375.

6. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С. Обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года в России. Часть 1: Особенности разработки расчетных моделей и результаты исследований при основных сочетаниях нагрузок. // *Научные труды РААСН*. – 2018.– Т. 2. – С. 95-102.

7. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С. Обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года в России. Часть 2: Особенности и результаты расчетных исследований при особых сочетаниях нагрузок. Научное сопровождение при прохождении экспертизы. // *Научные труды РААСН*. – 2018.– Т. 2. – С. 103-109.

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.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

9. Нагибович А.И. Расчет параметров НДС и динамических характеристик комбинированной большепролетной системы несущих конструкций футбольного стадиона с применением суперэлементного подхода Stadium\CMS.masc – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018665246 от 03.12.2018.