

УДК 624.04

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИНАМИКИ И ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ БАШЕН ГРАДИРЕН

Шейн Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Мальков Артем Игоревич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

аспирант кафедры «Механика».

Аннотация

Дан краткий обзор научных исследований в области сейсмических колебаний и аэродинамики башенных градирен, а также работ в области гашения колебаний этих конструкций. Приведены исследования советских, российских и зарубежных ученых в рассматриваемой области. Описываются способы гашения динамических колебаний высотных сооружений.

Ключевые слова: градирня, динамический расчет, гашение колебаний.

REVIEW OF RESEARCH IN THE FIELD OF DYNAMICS AND DAMPING OF COOLING TOWER VIBRATIONS

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department “Mechanics”.

Malkov Artem Igorevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

postgraduate student of the department “Mechanics”.

Abstract

A brief review of scientific research in the field of seismic vibrations and aerodynamics of tower cooling towers, as well as work in the field of vibration damping of these structures, is given. The research of Soviet, Russian and foreign scientists in this field is presented. Methods of damping dynamic vibrations of high-rise structures are described.

Keywords: cooling tower, dynamic calculation, vibration damping.

В статье анализируются научные работы в области динамики и гашения колебаний башен и башенных градирен гиперболического и пирамидального видов.

Градирня – это башенная конструкция, предназначенная для охлаждения воды в системах обратного водоснабжения энергетических объектов, а также крупных предприятий промышленности. Вода применяется в замкнутом цикле при охлаждении оборудования в целях предохранения его от быстрого разрушения под влиянием высоких температур. От устойчивой работы градирен зависит безопасность системы охлаждения технологического цикла, а, следовательно, и безопасность всего энергетического комплекса.

Конструктивно, в преобладающем количестве проектных решений, градирни представляют собой высокую башню со стальным каркасом гиперболического, конического или пирамидального очертания. Для таких башен характерно наличие циклической симметрии стального каркаса. В башенных градирнях тяга воздуха создается высокой вытяжной башней (трубой). Поэтому эти сооружения относятся к градирням открытого, или атмосферного типа, в которых для охлаждения воды используются атмосферные токи воздуха – ветер, т.е. естественная конвекция, а также искусственная вентиляция.

Башни градирен могут быть подвергнуты циклическим воздействиям сейсмического или ветрового характера. Кроме того, возможны биения каркаса

от дебаланса роторов вентиляторов. При этих воздействиях вероятно развитие колебаний значительных амплитуд. [28]

Развитие колебаний башен градирен могут предотвратить или существенно уменьшить специальные устройства - гасители колебаний и, тем самым, обеспечить безаварийную работу предприятия.

Обзор научных работ в данной статье выполняется по следующим направлениям:

- конструктивные особенности башен градирен и их расчетов;
- нагрузки на высотные сооружения;
- совершенствование алгоритмов динамических расчетов строительных конструкций башен;
- гасители колебаний башен.

Краткий обзор работ.

1. Конструктивные особенности градирен и их расчетов.

История становления научных исследований в области расчета, проектирования и обеспечения долговечности несущих металлоконструкций высотных сооружений со стальным каркасом хорошо представлена в статье Губанова В.В., в ней изложены основные выполненные научно-исследовательские и экспериментальные работы. Практические разработки решений для вытяжных башен, оболочек дымовых труб, башенных градирен, мачтовых опор сотовой связи, а также, конструкций стальных укосных шахтных копров представлены в работах д.т.н., проф. Е.В. Горохова [21].

Значительный вклад в изучение башенных градирен был внесен в 2003 году Ларичкиным В.В. В его работах научной решалась комплексная задача по обеспечению прочности, надежности и усталостной долговечности высотных сооружений аэродинамически неустойчивой формы. Для предотвращения развития колебательных процессов предложены динамические гасители колебаний, а также разработаны расчетно-экспериментальные методики по определению деформативности высотных сооружений при заданной

обеспеченности по времени и предельных сроков эксплуатации сооружений по накоплению усталостных повреждений [1].

Большой вклад в развитие современного проектирования высотных сооружений типа башен, градирен, цилиндрических тел внесли ученые института «Проектстальконструкции» [2,3].

Действующая конструкция вентиляторной градирни на крупнейшей геотермальной электростанции России - Мутновской ГЕОЭС, представлена в работе Николаева О.С., Свердлина Б.Л., Пилипенко К.В. [22].

В научной работе Волкова А.С., Прокопенко Д.Р., Мозгового Д.О., Жуль Д.А. представлены результаты анализа сопоставительных расчетов оболочки железобетонной башенной градирни $H = 150$ м Зуевской ТЭС с учетом действительных режимов эксплуатации при совместном воздействии силовых и температурных воздействий. Выявлено влияние солнечной радиации и других воздействий на напряжения в вертикальных и горизонтальных сечениях по высоте сооружения. Дана оценка степени влияния различных факторов на прочность и надежность оболочки башенной градирни [53].

Мелихов Р.В. и Леонова А.Н. рассмотрели особенности проектирования вытяжных башен. Сделан анализ конструкций и конфигураций вытяжных башен, видов несущих схем, схем решеток, схем диафрагм. Описаны основные конструктивные решения несущей башни, схемы опирания газоотводящего ствола, заводские монтажные типы соединений поясов несущей башни, опорные узлы и узлы крепления решеток к поясам башни. Представлены технико-экономическая оценка и вопросы типизации [67].

Таким образом, в приведенных статьях рассмотрены приведены виды башенных сооружений градирен, с учетом особенности их конструкций и протекающих технологических процессов.

2. Нагрузки на высотные сооружения.

Большой вклад в определение аэродинамических нагрузок на башни внес Чернышев Д.Д. В частности, он разработал методику определения нагрузки и вычисления реакции сооружений на пульсационное ветровое воздействие с

учетом взаимного влияния собственных форм колебания башни, как суммы реакции сооружения по кратным формам собственных колебаний. Разработаны расчетные модели для анализа аэродинамического сопротивления труб в пакете на основе метода контрольных объемов (МКО). На основе МКО исследуется аэродинамическое сопротивление цилиндров пакетов из двух, трех и четырех труб и трех труб с учетом влияния труб поясов обстройки при разных углах атаки и расстоянии между центрами цилиндров.

Разработан алгоритм для программы автоматизированного расчета, позволяющей рассчитывать реакции и определять нагрузки на башенные сооружения от пульсационного ветрового воздействия. Разработаны расчетные модели пакетов труб на основе метода контрольных объемов (МКО) с применением ПК STAR CD. Про моделировано турбулентное течение ветрового потока, что отвечает реальному режиму течения массы атмосферного воздуха [5].

В работе Атаманчука А.В. впервые установлен характер влияния угла атаки ветрового потока на вытяжную башню, разработана новая теоретическая модель на основе метода конечных разностей (конечно-разностная схема Мак-Кормака), для определения аэродинамических коэффициентов. На основе этой модели определены параметры ветрового потока для последующего расчета на ЭВМ. Учтена взаимная корреляционная взаимосвязь собственных форм колебаний и уточнены аэродинамические коэффициенты цилиндров и обстройки башни, проанализированы качественные характеристики напряженно-деформированного состояния элементов вытяжной башни при действии ветровой нагрузки. Как результат получены данные, оценивающие ранее не учитываемые факторы, влияющие на работу башенных сооружений [4].

Никитин П.Н. разработал прикладные аналитические методы отдельного определения вклада в общую реакцию сооружений на порывы ветра квазистатической и резонансной составляющих реакции, предложил сравнительно простую измерительную аппаратуру, которая способна измерять

с большой точностью перемещения колебаний сооружений в области низких частот от 25 до 0,001Гц, а также осуществил измерения колебаний натурального сооружения, которые сравнил с теоретически полученными результатами [6].

Сахаров О.А. предложил метод задания расчетного уровня сейсмической нагрузки с учетом повторяемости землетрясений на площадке строительства, срока службы и ответственности сооружения, метод оценки коэффициентов сочетаний сейсмической и других нагрузок на сооружения и группы сооружений, эксплуатируемых в особых условиях. Провел статическую оценку параметров сейсмического риска. Установил связь между методами теории надежности и методами теории сейсмического риска, а также условия эквивалентности применения указанных методов [7].

В статье Холопова И.С. и Чернышева Д.Д. изложена методика расчета высотных башен на пульсационную составляющую ветровой нагрузки. В статье задача решена с применением метода разложения динамической реакции по формам собственных колебаний. В отличие от принятой нормативной методики расчета, предложенная методика позволяет учитывать не только вклад по собственным формам, но и корреляционную взаимосвязь между собственными формами. Дополнительно рассмотрен вопрос суммирования реакции по собственным формам. Приводятся результаты расчета вытяжной башни на пульсационную ветровую нагрузку по нормативной методике и методике авторов статьи [8].

Губанов В.В., Удод Ю.Н. и Чебурей Д.В. проанализировали состояние вопроса и выполнен расчет трубчатых стержней башен на аэродинамическую неустойчивость в соответствии с предложенной методикой в Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, а также предложили практический способ определения динамической силы, воздействующей на шарнирно-закрепленный и жестко-закрепленный элемент по номограмме [9].

В работах Малых К.А. Кравчук В.А. и Хайбулиной Р.З. приведены различные подходы определения ветровой нагрузки на стальную решетчатую

башню из прокатных профилей по нормативным документам Российской Федерации и Еврокодам. Выполнены сравнительные анализы полученных результатов расчета [16,17].

Мондрус В.Л. и Каракозова А.И. рассмотрели особенности расчета стальных решетчатых конструкций на воздействие ветровой нагрузки. Показано, что с одной стороны, необходимо оценить давление ветра, с другой, крайне важно учесть аэродинамику конструкции, то есть преобразовать ветровое давление в ветровую нагрузку при помощи аэродинамической передаточной функции [27].

Вывод. В зданиях и сооружениях высотой, превышающей 30 метров, приоритетно стоит вопрос в точности и полноте определении динамических воздействий. Среди множества научных работ, выполненных в этом направлении, приведенные статьи представляют информационную ценность для расчета башенных градирен на ветровое пульсационное и сейсмическое воздействие.

3) Совершенствование алгоритмов динамических расчетов строительных конструкций башен.

Козлова В.Л., Столицына М.В., Отлева Т.И., Амелин А.А. рассмотрели вопрос совершенствования алгоритмизации расчета и проектирования высотных сооружений типа стальных башен, мачт, труб. Подняты проблемы автоматизированного проектирования этих сооружений в САПР [11].

В работах Ивановой Ю.В. Шакова А.С. Карпушина Н.Н. [12], Ситникова И.Р., Голикова А.В. [13] и Щуцкого С.В., Черныша А.В., Болдырева А.С. [58] представлены конструктивные особенности схем решетчатых башенных конструкций, даны примеры расчета и определения напряженно-деформированного состояния, приводится методика посекционного расчета подобных сооружений.

В статье Макеева С.А. и Ковтуна А.С. представлен сравнительный анализ расчета металлической башни на ветровую нагрузку, согласно методике действующих строительных норм и в ПК «Лира» [15].

Губанова В.В. анализирует методические подходы к решению задач расчета и проектирования высотных сооружений с несущим металлическим каркасом. Приведены рекомендации по конкретизации методов и направлений исследования для высотных сооружений с учетом их действительной работы и процессов обслуживания в процессе эксплуатации [18].

В работе Краснощёкова Ю.В. и Капитановой А.М. решена задача по оценке влияния горизонтальной податливости башенных опор на перераспределения усилий в элементах башни и деформации башни при отсутствии распорок в уровне верха фундаментов. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета башни с разными расчетными схемами [19].

В работах Шеина А.И., Кузнецова А.Н., Чуманова А.В. и Земцовой О.Г., Шеина А.И., Бочкарева Р.В. для расчетов высотных сооружений с учетом воздействия пульсационной составляющей ветровой нагрузки предложены методы (способы) моделирования ветровых воздействий. Эти способы представлены математическими выкладками в виде формул [23,25].

Травуш В.И., Белостоцкий А.М., Вершинин В.В., Островский К.И., Петряшева Н.О., Петряшева С.О. разработали методику численного моделирования динамической реакции физически нелинейной пространственной системы «основание - высотное здание» на особое сочетание нагрузок, включающее интенсивное сейсмическое воздействие уровня максимально возможного землетрясения (МРЗ), заданное акселерограммой землетрясения. Методика, реализованная с помощью верифицированного программного комплекса Abaqus, применена для конечноэлементного анализа проектного варианта 400-метрового небоскреба с несущими железобетонными конструкциями при 9,5 балльном сейсмическом воздействии. При этом основной акцент сделан на моделировании железобетонных конструкций в условиях локальных разрушений - образования трещин и крошения [48].

Бестужев А.С., Нгуен Ф. Л. сравнивают между собой сейсмические силы, полученные динамическим и спектральным методами. Анализируется влияние на величину сейсмической силы различных расчетных факторов [51].

Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г., Шпакова В.А рассмотрели вопросы, связанные с влиянием расчётной схемы на перераспределение внутренних усилий в пространственных решётчатых конструкциях [52].

Значительный вклад в развитие математического моделирования строительных конструкций, и, в частности, башен, внес Белостоцкий А.М. [60,62,65].

Белостоцкий А.М. и Дубинский С.И. рассматривают вопросы трехмерного численного моделирования ветровых режимов Имеретинской низменности, г. Сочи и п. Адлер с использованием разработанного программного модуля для пакета программ ANSYS/CFD. Разработанная методика расчета ветровых воздействий на высотные здания и большепролетные сооружения продемонстрирована на примере определения нагрузок на фасадные конструкции строящегося железнодорожного вокзала в Адлере [61].

Акимов П.А., Белостоцкий А.М., Негрозов О.А. Дмитриев Д.С. рассмотрели (с анализом преимуществ и недостатков каждого) следующие подходы: метод редуцирования по Гайяну, IRS (Improved Reduced System) метод редуцирования и метод динамического редуцирования. Кроме того, описывается, основанный на теории метода подконструкций, так называемый статический метод конечных элементов для сейсмического расчета [63,64].

Случанинов Н.Н., Масько В.И., Балашов Е.В., Коршунов Е.Г. проводили расчет градирен методом конечных элементов. Сделан анализ адекватности конечноэлементной математической модели. Приведены результаты исследования на трёхмерных моделях зависимостей распределения температур, давлений, скоростей от конструктивных особенностей градирни. Это позволило найти простые варианты борьбы с обледенением градирни [54].

В работе Ситникова И.Р. и Голикова А.В. была рассмотрена задача совершенствование конструктивной формы несущих опор башенных конструкций. Для решения поставленной задачи в расчете применялся метод конечных элементов для математического моделирования с использованием

программно-вычислительных комплексов, а при создании линейки моделей для численных экспериментов - метод математического планирования экспериментов [49].

Кулябко В.В. рассматривает особенности исследования линейных и нелинейных колебаний, нагруженности и демпфирования сооружений со стальными конструкциями. Описаны известные концепции исследований, предложены новые подходы к формообразованию строительных объектов, их уточненным динамическим расчетам без применения МКЭ. Дан список ряда объектов, на которых применялись эти динамические расчеты [50].

Веремеенко О.Ю. привел подробный отчет о проведении обследования несущей способности башни и произвел проверку прочности и несущей способности элементов и конструкций башни с учетом расчетной сейсмичности. Для определения основных параметров несущей способности использовал общепринятые методы статических и прочностных расчетов с учетом рекомендаций по определению сейсмических нагрузок. Выполнены расчеты рабочих площадок башни и всей башни в целом. Выполнен анализ состояния конструкций башни с учетом дополнительных нагрузок - сейсмических воздействий [14].

В работе Ефрюшина С.В., Бурлакова А.В. и Шаранина А.И. приводятся результаты динамического расчета на вынужденные колебания существующей телевизионной мачты на оттяжках высотой 331,5 метров. Расчеты даются в программном комплексе «MIDAS CIVIL» при ударе легкомоторного самолета в 3-й ярус: график зависимости амплитуд колебаний 3-го яруса вант мачты от времени, амплитудный спектр колебательного процесса (спектральная плотность), участие собственных форм колебаний. Кроме того, приводятся результаты динамического расчета при пульсационном воздействии ветра: графики переходного процесса (зависимость амплитуды колебаний от времени) при четырех разных вариантах преднапряжения, на основе которых определялись коэффициенты динамичности (отношение максимальных перемещений к перемещениям от статического ветра), с последующим их

сравнением с нормативными коэффициентами. Также рассматривается один из способов линеаризации расчетной схемы мачты, обладающей геометрической нелинейностью для последующего динамического расчета на вынужденные колебания. Осуществляется исследование динамической реакции конструкции мачты при ударе в 3-й ярус легкомоторного самолета и динамической реакции конструкции мачты при пульсационном воздействии ветра [55].

Таким образом, имеется целый ряд работ по динамическим расчетам стальных башен с анализом полученных результатов, приведена важная информация о несущей способности элементов башен, а также приведены сравнительные расчеты в программных комплексах с классическими и нормативными методами расчета.

4) Гасители колебаний башенных сооружений.

Каракозова А.И. [2] и Остроумов Б.В. [3]. рассматривали задачи по обеспечению прочности, надежности и усталостной долговечности высотных сооружений путем оснащения их динамическими гасителями колебаний, а также разработали методику расчета деформативности высотных сооружений.

Шейн А.И. и Шмелёв Д.А. рассмотрели активный жидкостный гаситель как средство для гашения колебаний конструкций в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий. Приведено его сравнение с пассивным трехмассовым динамическим гасителем колебаний [24].

Ими же разработана полезная модель жидкостного гасителя колебаний зданий и сооружений, выполненная в виде емкости высокого давления, оборудованная двумя взаимно противоположными клапанами для выхода жидкости (воды) и создания реактивного эффекта [37].

Махвиладзе Л.С. представил динамический гаситель колебаний сооружений, предназначенный для гашения колебаний высотных сооружений [30].

Каледа В.Н., Каледа И.А. и Звижинский А.И. предложили активный гаситель колебаний, создающий эффект гироскопа, для гашения колебаний высотных сооружений башенного типа [31].

Шейн А.И. и Чуманов А.В. исследовали колебания закрытых куполов под сейсмическим воздействием. Проведен динамический анализ собственных колебаний куполов в зависимости от стрелы подъема. Проведены численные эксперименты с различными расположениями ленточного гасителя колебаний и выявлением наиболее рационального варианта расположения для различных конфигураций куполов [34].

Оригинальную систему гашения колебаний предложил Акимов-Перетц И.Д., разработав устройство, включающее сплошностенчатый круглый в поперечном сечении ствол и установленных на нем по высоте отдельных цилиндрических оболочек. С целью повышения надежности и снижения материалоемкости соседние оболочки установлены на стволе с возможностью вращения в противоположных направлениях и снабжены электродвигателями, системой управления скоростью их вращения и связанными с ними датчиками скорости ветра [29].

В своей работе Воронцов Г.В. рассматривает задачу математического моделирования адаптивных систем гашения колебаний для высотных башенных сооружений прямоугольного и круглого (по периметру) переменного поперечного сечения. Принято, что сооружения жестко связаны с основанием типа упругого полупространства и подвержены ветровым или (и) сейсмическим воздействиям [35].

Циков П.А., Плугарев В.С., Тройнин В.Е., Зайцев И.М. представили устройство для гашения колебаний высотных сооружений, включающее кронштейны с маятниками, в полостях которых установлены балластные сердечники, характерное тем, что, с целью снижения трудоемкости настройки гасителя, балластные сердечники, установленные с возможностью вертикального перемещения, причем гаситель снабжен приводом перемещения сердечников [66].

В монографии Баландина Д.В. и Коган М.М. приводятся примеры решения задач оптимальных гашений внешних возмущений в управлении различными механическими системами [32].

Шейн А.И. и Земцова О.Г. представили схемы и теорию пространственных гасителей для гашения линейных (в разных направлениях) и вращательных колебаний высотных сооружений. Для приведенных нелинейных моделей в работе показаны разрешающие уравнения движения в матричном виде. В статье разработанные математические и физические модели предназначены для проведения всесторонних исследований возможностей управления пространственной динамикой сооружений в системах «основание - сооружение - гаситель» [41].

Систему пассивного гашения колебаний высотных сооружений предложили Чипко С.А. и Бурцева О.А. Авторами предложена катковая система компенсации колебаний высотных сооружений, подверженных сейсмическому воздействию и описан принцип ее работы [38].

В статье Смирновой Л.Н., Долгой А.А., Уздина А.М., Нестеровой О.П. исследовали подбор параметров и оценка эффективности динамических гасителей колебаний (ДГК) для гашения сейсмических колебаний сильно демпфированных систем, в частности для снижения перемещений сейсмоизолированных зданий и сооружений. Исследование проводилось традиционным методом, путем анализа параметров амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В работе проанализировано влияние затухания в сооружении на параметры ДГК. Показано, что традиционно применяемый для подбора ДГК метод инвариантных точек не приемлем для расчета ДГК сильно демпфированных систем. Проанализирована эффективность ДГК при сейсмических воздействиях в зависимости от параметров демпфирования защищаемого сооружения. Исследованы особенности поведения сооружения с ДГК, масса которого превосходит критическую. Показано, что настройка падает, а демпфирование возрастает с ростом коэффициента неупругого сопротивления защищаемого здания или сооружения. Результаты исследования необходимы для проектирования сейсмозащитных устройств зданий и сооружений [39].

Нестерова О.П., Уздин А.М. в своей работе исследовали основные особенности настройки динамических гасителей колебаний (ДГК) демпфированных систем при силовом и кинематическом возмущении. В ней показано, что наличие демпфирования в сооружении и кинематический характер воздействия приводят к исчезновению инвариантных точек, используемых в классической теории ДГК. Показано, что критическая масса гасителя существует только при кинематическом возмущении. Выведена зависимость критической массы от демпфирования в сооружении, а также приведены зависимости настройки и демпфирования гасителя от его массы для различных типов демпфирования в сооружении [59].

Вывод. Исследователями предложены различные активные и пассивные гасители колебаний башен. Для гашения колебаний градирен, т.е. гидросооружений, наибольший интерес представляет активный жидкостный гаситель колебаний высокого давления, создающий реактивную силу в определенном направлении [24,37].

Библиографический список:

1. Ларичкин В.В. Исследование аэродинамики цилиндрических тел и башенных градирен: дис. д-ра. техн. наук: 01.02.05. Новосибирск, 2003. 400 с.
2. Каракозова А.И. Расчет высотных сооружений с низким конструкционным демпфированием и учетом воздействия пульсаций скорости ветра: дис. канд. техн. наук: 05.23.17. М., 2013. 123 с.
3. Остроумов Б.В. Исследование, разработка и внедрение высотных сооружений с гасителями колебаний: дис. д-ра. техн. наук: 05.23.01. М., 2003. 425 с.
4. Атаманчук А.В. Ветровые нагрузки на элементы трехгранных башен и пакеты вытяжных труб: дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Самара, 2005. 296 с.
5. Чернышев Д.Д. Разработка методики определения аэродинамических ветровых нагрузок и расчета пространственных конструкций башен с вытяжными трубами : дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Самара, 2011. 277 с

6. Никитин П.Н. Разработка и внедрение методов расчета высотных металлических конструкций на воздействие порывов ветра с выделением квазистатической и резонансной составляющих их реакции: дис. канд. техн. наук: 05.23.01. М. , 2006. 173 с.

7. Сахаров О.А. Обоснование уровня расчетного сейсмического воздействия при оценке сейсмостойкости зданий и сооружений, эксплуатируемых в особых условиях: дис. канд. техн. наук: 05.23.17. Санкт Петербург , 2011. 208 с

8. Холопов И.С., Чернышев Д.Д. Определение пульсационной ветровой нагрузки при расчете вытяжных башен // Известия высших учебных заведений. Строительство, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. 2009. С. 105-112.

9. Губанов В. В., Удод Ю. Н., Чебурей Д. В. Расчет трубчатых стержней башен на аэродинамическую неустойчивость // Металлические конструкции, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. 2011. Т. 17. № 2. С. 135–142.

10. Горохов, Е. В. Оценка влияния конструктивных особенностей решетчатых башен на их динамическое поведение // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури: зб. наук. Праць, ДонНАБА. 2007. Вип. 6 (68): Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. С. 112–119.

11. Козлова В.Л., Столицына М.В., Отлева Т.И., Амелин А.А. Совершенствование формирования исходных данных в автоматизированной системе расчета высотных сооружений типа башен, мачт, вытяжных труб // Материалы II Брянского международного инновационного форума: Брянская государственная инженерно-технологическая академия. 2016. С. 252-258.

12. Иванов Ю.В., Шаков А.С., Карпушина Н.Н. Основы конструирования и расчета башен // Новые технологии в учебном процессе и производства. Материалы XVI межвузовской научно-технической конференции. Под ред. Платонова А.А., Бакулиной А.А.. 2018. С. 123-130.

13. Ситников И.Р., Голиков А.В. Рационализация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 182-192.

14. Веремеенко О.Ю. Расчет башни филиала АО "СО ЕЭС" оду средней волги с учетом расчетной сейсмичности // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. строительство. 2019. С. 66-70.

15. Макеев С.А., Ковтун А.С. Сравнительный динамический анализ поведения металлической башни при расчете на ветровое воздействие по строительным нормам и в ПК «ЛИРА» // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки. Материалы международной научно-практической конференции. 2014. С. 181-185.

16. Малых К.А., Кравчук В.А. Особенности определения расчётных параметров ветровой нагрузки на высотные здания // Материалы секционных заседаний 56-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ.: в 2-х томах. 2016. С. 405-410.

17. Хайбулина Р.З. Особенности определения ветровой нагрузки на металлические башенные сооружения связи по нормативным документам российской федерации и еврокодам // Шаг в науку. 2017. № 1. С. 134-141.

18. Губанов В.В. Развитие методов расчета стальных высотных сооружений // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 4. С. 217-224.

19. Краснощёков Ю.В., Капитанова А.М. Обоснование расчетных схем системы «башня – основание» // Архитектура, строительство, транспорт. Материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ"). 2015. С. 290-293.

20. Рещепкина С.А., Котельникова Т.О., Рещепкин С.В. Об оптимальном проектировании стальной башни // Вестник кыргызско-российского славянского университета. 2019. С. 157-162.

21. Губанов В.В. Исследования высотных сооружений в научной школе доннаса // Строитель Донбасса. 2019. № 2 (7). С. 26-32.

22. Николаева О.С., Свердлин Б.Л., Пилипенко К.В. Гидравлический расчет напорной водораспределительной системы градирни (на примере вентиляторной градирни мутновской ГЕОЭС) // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2010. Т. 260. С. 78-85.

23. Шеин А.И., Кузнецов А.Н., Чуманов А.В. Моделирование ветровых воздействий на высотные сооружения [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №4. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/4.1/at_download/file

24. Шеин А.И., Шмелёв Д.А. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 96-103.

25. Земцова О.Г., Шеин А.И., Бочкарев Р.В. Ветровые нагрузки на сооружения в виде давления переменного ветрового потока // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 11-1 (43). С. 31-34.

26. Шеин А.И., Чуманов А.В. Особенности колебательных движений циклически-симметричных рамных систем [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2019. №9. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no-9-aprel-2019/stroitel'naya-mehanika/shein-a-i-chumanov-a-v-osobennosti-kolebatelnyh-dvizhenii-ciklicheski-simmetrichnyh-ramnyh-sistem/view>

27. Мондрус В.Л. Каракозова А.И. Об особенностях расчета башенных сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 6. С.56-60.

28. Шеин А.И., Мальков А.И. Построение динамической модели для расчета градирен гиперболического и пирамидального типов [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2020. №12. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera->

zhurnala/no12/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.3/at_download/file

29. Сооружение типа башни: авторское свидетельство СССР SU 1196460 A1: МПК E04B 1/98, E04H 12/00 / Акимов-Перетц И.Д.. № 3694909; заявл. 24.01.1984.; опубл. 07.12.1985, Бюл. № 45. 3 с.

30. Динамический гаситель колебаний сооружений: авторское свидетельство СССР SU 1700173 A1: МПК E04B 1/98 / Махвиладзе Л.С.. № 4686732, заяв. 03.05.1989; опубл. 23.12.1991, Бюл. № 47. 3 с.

31. Каледа В.Н., Каледа И.А., Звижинский А.И. Гаситель колебаний высотных сооружений // Вестник научных конференций. 2017. № 3-6 (19). С. 59-62.

32. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств // М.: Физматлит, 2007. 280 с.

33. Шеин А.И., Чуманов А.В. Конструктивные способы гашения колебаний зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №6. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.7/at_download/file

34. Шеин А.И., Чуманов А.В. Колебания закрытых куполов с ленточной системой гашения колебаний [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2020. №12. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.1/at_download/file

35. Воронцов Г.В. Адаптивные системы гашения колебаний высотных башенных сооружений в зонах природного риска // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 3. С. 40-43.

36. Шеин А.И., Раевский Л.А. Экономическая эффективность применения новых технологий для уменьшения колебаний высотных сооружений // Вестник евразийской науки. 2015г.

37. Жидкостный гаситель колебаний зданий и сооружений: патент на полезную модель RU 132463 U1: МПК E04B 1/98 / Шеин А.И., Шмелёв Д.А.. № 2013115953/03, заяв. 09.04.2013, опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26. 4 с.

38. Чипко С.А., Бурцева О.А. Система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне // Инженерный вестник Дона. 2014. № 1 (28). С. 41.

39. Смирнова Л.Н., Долгая А.А., Уздин А.М., Нестеровой О.П. Некоторые особенности подбора параметров динамических гасителей колебаний (ДГК) для сейсмозащиты зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 3. С.22-30.

40. Шеин А.И., Шмелёв Д.А. Построение и реализация математической модели гашения колебаний высотных зданий с помощью реактивных гасителей // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 96-103.

41. Шеин А.И., Земцова О.Г. Схемы и теория гасителей пространственных колебаний сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 1. С. 45-52.

42. Устройство для гашения колебаний: патент на полезную модель RU 166773 U1: МПК F16F 7/104 / Богданов А.С.. №2015137324/11, Заявка №2015137324/11, заяв. 01.09.2015, опубл. 10.12.2016. 4 с.

43. Устройство для гашения колебаний: патент на полезную модель RU 86685 U1: МПК F16F 15/02 / Богданов А.С., Дарибазарон С.Б.. № 2009117097/22, заяв. 04.05.2009, опубл. 10.09.2009. 4 с.

44. Устройство для гашения колебаний: патент на полезную модель RU 157168 U1: МПК F16F 15/02 / Богданов А.С., Дарибазарон С.Б.. № 2015129889/05, заяв. 20.07.2015, опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32. 5 с.

45. Устройство для гашения колебаний: патент на полезную модель RU 111596 U1: МПК F16F 7/104 / Богданов А.С., Дарибазарон С.Б., Баргуев С.Г.. № 2011126667/11, заяв. 29.06.2011, опубл. 20.12.2011. Бюл. № 35. 7 с.

46. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен. Казань: КГЭУ, 2004. 180 с.

47. Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Оценка сейсмостойкости высотных зданий и сооружений при воздействиях уровня «максимальное расчетное землетрясение» нелинейным статическим методом // Строительство и реконструкция. 2020. №3. С. 63-71.

48. Травуш В.И., Белостоцкий А.М., Вершинин В.В., Островский К.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. Численное моделирование физически нелинейной динамической реакции высотных зданий при сейсмических воздействиях уровня МРЗ // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2016. Т. 12. № 1. С. 117-139.

49. Ситников И.Р., Голиков А.В. Рационализация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 182-192.

50. Кулябко В.В. Динамика металлических конструкций и проблемы строительства, науки и образования (к десяти юбилеям "резонанса") // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2008. № 10 (129). С. 12-19.

51. Бестужева А.С., Нгуен Ф. Л. Динамический и спектральный методы определения сейсмической нагрузки, действующей на сооружение при землетрясении // ВЕСТНИК МГСУ. 2010. № 1. С.155-168.

52. Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г., Шпакова В.А. Исследование расчётной схемы пространственной решётчатой конструкции на примере пожарной вышки высотой $h = 45$ м // Современное строительство и архитектура. 2017. № 3 (07). С. 35-39.

53. Волков А.С., Прокопенко Д.Р., Мозговой Д.О., Жуль Д.А. Исследование НДС конструкций башенной градирни высотой $h = 150$ м с учетом действительного режима работы // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4 (138). С. 72-79.

54. Случанинов Н.Н., Масько В.И., Балашов Е.В., Коршунов Е.Г. Математическое моделирование процессов теплообмена в градирне // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 6 (64). С. 31-32.

55. Хвостиков А.С., Богданов К.С. Модернизация башенных градирен эксплуатируемых в сложных климатических условиях // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 5 (121). С. 22-26.

56. Ефрюшин С.В., Бурлаков А.В., Шаранин А.И. Вынужденные колебания мачты. исследование динамической реакции конструкции мачты при внешнем воздействии // Строительная механика и конструкции. 2018. № 3 (18). С. 61-72.

57. Щуцкий С.В., Черныш А.В., Болдырев А.С. Особенности расчета башен в форме сетчатого гиперблоида // ИВД. 2019. №2 (53).

58. Нестерова О.П., Уздин А.М. Особенности работы динамических гасителей колебаний при силовом и кинематическом (сейсмическом) возмущении демпфированных сооружений // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 2 (92). С. 84-89.

59. Остроумов Б.В. Особенности "работы" высотных сооружений с установленными на них динамическими гасителями колебаний // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 4 (249). С. 56-57.

60. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математическое моделирование как основа мониторинга зданий и сооружений // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2010. Т. 6. № 1-2. С. 78-79.

61. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Прогноз ветровых воздействий в зоне большого сочи на основе численного моделирования задач аэродинамики // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2011. Т. 7. № 2. С. 27-38.

62. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н. Введение в прогнозное математическое моделирование состояния и техногенной безопасности строительных объектов // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сборник трудов № 20. Москва, 2017. С. 308-363.

63. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Дмитриев Д.С. О современных методах редуцирования вычислительной размерности задач расчета

конструкций, зданий и сооружений в рамках метода конечных элементов // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017. Т. 13. № 3. С. 19-33.

64. Акимов П.А., Белостоцкий А.М., Негрозов О.А. О совместном использовании метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов для решения двумерных задач расчета конструкций // В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2015 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2016. С. 387-394.

65. Белостоцкий А.М., Афанасьева И.Н. Численное моделирование задач аэрогидроупругости в строительстве // В книге: Модели и методы аэродинамики. Материалы Пятнадцатой Международной школы-семинара. 2015. С. 27-28.

66. Устройство для гашения колебаний высотных сооружений, включающее кронштейны с маятниками: авторское свидетельство. СССР SU 1184913 A1: МПК E04B 1/98 / Циков П.А., Плугарев В.С., Тройнин В.Е., Зайцев И.М.. № 3614262, заяв. 04.07.1983, опубл. 15.10.1985. Бюл. № 38. 2 с.

67. Мелихов Р.В., Леонова А.Н. Вытяжные башни – особенности проектирования, технико-экономическая оценка, вопросы типизации // Бюллетень науки и практики. Т.5. №3. 2019. С. 194-197.