

П.Г. Еремеев

**СОВРЕМЕННЫЕ СТАЛЬНЫЕ
КОНСТРУКЦИИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ
ПОКРЫТИЙ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ**

P.G. YEREMEYEV

**MODERN LARGE-SPAN STEEL
STRUCTURES FOR
ONE OF A KIND BUILDINGS**



П.Г. Еремеев

СОВРЕМЕННЫЕ
СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ
УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ

P. G. Yeremeyev

MODERN LARGE-SPAN STEEL
STRUCTURES FOR
ONE OF A KIND BUILDINGS



Издательство Ассоциации строительных вузов
МОСКВА, 2009

Рецензенты:

заведующий лабораторией «Тонкостенные и пространственные конструкции» НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, доктор технических наук, профессор *В.В. Шугаев*;

главный специалист отдела промышленных и гражданских сооружений ЦНИИПСК им. Мельникова, доктор технических наук *В.А. Савельев*.

Еремеев П.Г.

Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: Монография. — М.: Изд-во АСВ, 2009. — 336 с., 161 ил.

ISBN 978-5-93093-651-3

Обобщены и изложены особенности проектирования, изготовления и монтажа современных стальных конструкций уникальных большепролетных сооружений, построенных в стране в последние 10 лет.

Приведены конструктивные решения покрытий, описаны методы и результаты численных расчетов на эксплуатационные и монтажные нагрузки. Отражены вопросы изготовления и монтажа, научно-технического сопровождения строительства, мониторинга сооружений, обеспечения их безопасности от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения.

Для инженеров-проектировщиков, научных работников, студентов строительных вузов.

Features of design, fabrication and assembly of modern steel structures for one of kind large-span structures assembled in the country for the last 10 years have been generalized.

Structural decisions of roofing's are presented; methods and results of numerical calculations on operational and assembly loads are described. Questions of fabrication and assembly, research and technical support of construction, buildings monitoring, and ensuring of their safety from progressive collapse are reflected.

ISBN 978-5-93093-651-3

© Еремеев П.Г., 2009

© Издательство АСВ, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Глава 1. Особенности проектирования большепролетных (в том числе уникальных) зданий и сооружений	13
§ 1.1. Основные положения	13
§ 1.2. Этапы проектирования	15
§ 1.3. Нагрузки и воздействия	18
§ 1.4. Требования к расчетам	25
§ 1.5. Научно-техническое сопровождение	28
§ 1.6. Опыт проектирования и строительства	29
Литература	32
Глава 2. Светопрозрачное покрытие Старого Гостиного Двора	35
§ 2.1. Общие сведения	35
§ 2.2. Конструктивное решение покрытия	40
2.2.1. Форма плана и поверхности покрытия	40
2.2.2. Общая компоновка конструктивной схемы	42
2.2.3. Разработка и анализ вариантов конструктивных схем комбинированной арочно-вантовой системы	47
2.2.4. Численные исследования устойчивости комбинированных арочных систем	53
§ 2.3. Научно-техническое сопровождение проектирования	62
2.3.1. Нагрузки и воздействия	62
2.3.2. Численные исследования работы арочно-вантовой системы	66
2.3.3. Исследования устойчивости арочно-вантовой системы	83
§ 2.4. Изготовление и монтаж конструкций. Научно-техническое сопровождение	93
2.4.1. Изготовление несущих металлоконструкций	93
2.4.2. Монтаж несущих металлоконструкций	94
2.4.3. Монтажная сварка	95
2.4.4. Научно-техническое сопровождение изготовления и монтажа конструкций	97
§ 2.5. Экспериментальное исследование крупномасштабной модели фрагмента покрытия	105
2.5.1. Конструкция модели покрытия	105
2.5.2. Методика проведения эксперимента	109
2.5.3. Результаты экспериментальных исследований	115
Литература	136
Глава 3. Покрытие над трибунами стадиона «Локомотив»	139
§ 3.1. Общие сведения	139
§ 3.2. Конструктивное решение покрытия над трибунами	143
3.2.1. Форма плана и поверхности покрытия над трибунами	143
3.2.2. Общая компоновка конструктивной схемы	145
3.2.3. Угловые пилоны с оттяжками	147
3.2.4. Вантовая система	149
§ 3.3. Научно-техническое сопровождение проектирования покрытия	151
3.3.1. Нагрузки и воздействия	152
3.3.2. Статическая схема работы комбинированной пространственной конструкции козырька над трибунами	157
3.3.3. Численные исследования работы конструкций покрытия	159
§ 3.4. Изготовление и монтаж конструкций	163

3.4.1. Изготовление несущих металлоконструкций на Белгородском ЗМК.....	163
3.4.2. Вантовая система	165
3.4.3. Монтаж несущих конструкций	168
3.4.4. Светопрозрачные ограждающие конструкции	178
§ 3.5. Научно-техническое сопровождение изготовления и монтажа конструкций	181
3.5.1. Применение сталей повышенной и высокой прочности	181
3.5.2. Проведение технического контроля качества и приемка металлоконструкций на стадии изготовления и монтажа	182
3.5.3. Научно-техническое сопровождение и численные исследования работы покрытия на стадии монтажа	190
§ 3.6. Натурные исследования основных несущих конструкций на стадии монтажа и эксплуатации.....	193
3.6.1. Геодезическое обеспечение монтажа металлоконструкций.....	193
3.6.2. Мониторинг несущих конструкций при эксплуатации сооружения.....	197
Литература	200
Глава 4. Крытый конькобежный центр в Крылатском	202
§ 4.1. Общие сведения.....	202
§ 4.2. Конструктивное решение. Численные исследования работы покрытия	208
4.2.1. Варианты конструктивного решения и элементы покрытия.....	208
4.2.2. Статическая схема работы конструкций.....	223
4.2.3. Численное моделирование работы системы на эксплуатационные нагрузки	224
4.2.4. Численное моделирование монтажа конструкций покрытия.....	226
§ 4.3. Изготовление и монтаж конструкций.....	227
4.3.1. Изготовление конструкций	227
4.3.2. Монтаж конструкций.....	231
§ 4.4. Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления и монтажа несущих конструкций	243
4.4.1. Научно-техническое сопровождение проектирования	243
4.4.2. Разработка рекомендаций по климатическим нагрузкам	245
4.4.3. Научно-техническое сопровождение изготовления и монтажа несущих металлических конструкций	249
4.4.4. Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления и монтажа металлодеревянных ферм покрытия	251
4.4.5. Экспериментальные исследования крупномасштабной модели.....	252
4.4.6. Мониторинг несущих конструкций на этапах монтажа и эксплуатации сооружения	254
§ 4.5. Анализ результатов расследования причин предаварийного состояния крытого конькобежного центра	255
Литература	259
Глава 5. Примеры проектирования и возведения ряда современных большепролетных сооружений.....	262
§ 5.1. Покрытие тренировочного футбольно-легкоатлетического манежа Центрального стадиона в г. Казани	262
5.1.1. Конструктивная схема покрытия.....	262
5.1.2. Нагрузки и воздействия. Основные положения расчета	264
5.1.3. Порядок монтажа несущих конструкций.....	266
§ 5.2. Покрытие Ледового дворца спорта на Ходынке.....	268
5.2.1. Архитектурно-планировочные решения	268
5.2.2. Конструктивная схема покрытия.....	268
5.2.3. Нагрузки и воздействия. Основные положения расчета	271

§ 5.3. Покрытие над трибунами стадиона «Труд» в г. Подольске Моск. обл.	273
5.3.1. Конструктивное решение	273
5.3.2. Методика и результаты статических расчетов	275
5.3.3. Принципиальная схема монтажа покрытия	275
§ 5.4. Купол и навесы входной группы аэровокзального комплекса Шереметьево-3	277
5.4.1. Купол над вестибюлем центральной части аэровокзального комплекса	277
5.4.2. Входная группа терминала аэровокзального комплекса Шереметьево-3	280
5.4.3. Методика и результаты расчетов	283
§ 5.5. Универсальный спортивный модуль	284
5.5.1. Основные конструктивные решения	284
5.5.2. Методика и результаты статических расчетов	285
§ 5.6. Проекты покрытий с применением конструкций фирмы «МЕРО»	287
5.6.1. Центральное ядро ММДЦ «Москва-сити»	288
5.6.2. Аквапарк ММДЦ «Москва-сити»	289
5.6.3. Здание входа в Московский зоопарк	289
5.6.4. Здание ледового Дворца спорта в г. Тольятти	291
Литература	292
Глава 6. Мониторинг несущих конструкций на стадии монтажа и эксплуатации сооружения	293
§ 6.1. Основные положения	293
§ 6.2. Программа работ по проведению инструментального мониторинга	298
6.2.1. Разработка системы критериев контроля напряженно- деформированного состояния несущих конструкций	298
6.2.2. Обоснование величин предельно допустимых перемещений основных несущих конструкций сооружения в наблюдаемых точках	299
6.2.3. Обоснование схемы расположения и количества наблюдаемых точек на несущих конструкциях	300
§ 6.3. Основные этапы проведения инструментального мониторинга	301
6.3.1. Особенности проведения мониторинга на стадии монтажа	301
6.3.2. Разработка автоматизированной системы мониторинга при эксплуатации сооружения	302
6.3.3. Методика замеров снеговых нагрузок	303
§ 6.4. Основные требования по организации надлежащей эксплуатации сооружения	304
Литература	307
Глава 7. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях	308
§ 7.1. Основные положения	308
§ 7.2. Требования к проектированию большепролетных сооружений по обеспечению их безопасности от лавинообразного обрушения	311
7.2.1. Аварийные расчетные ситуации и воздействия	311
7.2.2. Мероприятия по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения при аварийных воздействиях	312
§ 7.3. Учет опасности лавинообразного обрушения конструкций, обусловленной ошибками проектирования, изготовления, монтажа или неправильной эксплуатацией сооружения	313

§ 7.4. Исключение или предупреждение опасности аварийных воздействий, которым может подвергаться конструкция или объект.....	315
§ 7.5. Выбор оптимальных (рациональных) конструктивных решений и материалов.....	315
§ 7.6. Проектирование «ключевых» элементов, способных воспринимать аварийные воздействия в дополнение к стандартным проектным нагрузкам и воздействиям.....	317
Литература.....	319
Глава 8. Аварийные ситуации в строительстве	321
§ 8.1. Общие сведения.....	321
§ 8.2. Причины аварийных ситуаций.....	324
§ 8.3. Некоторые рекомендации по снижению риска аварийных ситуаций.....	325
§ 8.4. Основные требования к проведению расследований аварийных ситуаций.....	331
Литература.....	334

CONTENT

Preface.....	9
Chapter 1. Peculiarities of the large-span buildings design	13
§ 1.1. General principles.....	13
§ 1.2. Design phases.....	15
§ 1.3. Loads and actions.....	18
§ 1.4. Requirements to the design procedures.....	25
§ 1.5. Advanced research and design support.....	28
§ 1.6. Experience in design and construction.....	29
References.....	32
Chapter 2. Transparent roofing for the «Gostiny Dvor»	35
§ 2.1. General information.....	35
§ 2.2. Structural solution.....	40
2.2.1. Plan's and roofing's shape.....	40
2.2.2. General arranging of the structural scheme.....	42
2.2.3. Analysis of the different versions for combined arch-cable systems.....	47
2.2.4. Numerical buckling research of the combined arch systems.....	53
§ 2.3. Advanced research and technical support in the design.....	62
2.3.1. Loads and actions.....	62
2.3.2. Numerical research of the combined arch-cable system.....	66
2.3.3. Buckling problem in the combined arch-cable systems.....	83
§ 2.4. Fabrication and assembly of the structures. Research and technical support.....	93
2.4.1. Fabrication of the bearing steel structures.....	93
2.4.2. Assembly of the bearing steel structures.....	94
2.4.3. Welding.....	96
2.4.4. Advanced research and technical support of the fabrication and the assembly.....	98
§ 2.5. Experimental research of the large-scale fragment model of the roofing.....	106
2.5.1. Model structure of the roofing.....	106
2.5.2. Testing technique.....	110
2.5.3. Results of the experimental research.....	116
References.....	137

Chapter 3. Roofing over the «Lokomotiv» stadium stands	140
§ 3.1. The general data	140
§ 3.2. The structural solution of roofing over the stadium stands.....	144
3.2.1. Shape of plan and roofing over the stadium stands	144
3.2.2. General layout of structural scheme	146
3.2.3. Angular pier towers with guy lines	148
3.2.4. Cable system	150
§ 3.3. Research and technical support to the roofing design	152
3.3.1. Loads and actions.....	153
3.3.2. The static scheme to the roofing combined spatial structure over the stadium stands	158
3.3.3. Numerical researches of the roofing structure.....	160
§ 3.4. Fabrication and assembly of the considered structures	164
3.4.1. Fabrication of the bearing steel structures at factory (Belgorod ZMK).....	164
3.4.2. Cable system	166
3.4.3. Assembly of the bearing structures	169
3.4.4. Transparent enclosure structures	179
§ 3.5. Research and technical support for fabrication and assembly of structures	182
3.5.1. Using of the heavy-duty and high-tensile steels.....	182
3.5.2. Technical quality administration and acceptance at a stage of fabrication and assembly for steel structures	183
3.5.3. Research and technical support including numerical calculations of roofing at a assembly stage	191
§ 3.6. Field observation of the basic bearing structures at a stage of assembly and operation	195
3.6.1. Geodetic ensuring of the steel structures assembly	195
3.6.2. Monitoring of the bearing structures in time of building use	198
References.....	201
Chapter 4. Sheltered skating centre «Krylatskoe»	203
§ 4.1. The general data	203
§ 4.2. The structural solution. Numerical researches of roofing.....	209
4.2.1. Versions of the structural solution and elements of the roofing	209
4.2.2. The static scheme of structures	224
4.2.3. Numerical modeling of the system on loads of use.....	225
4.2.4. Numerical modeling of the roof structures erection	227
§ 4.3. Fabrication and assembly of structures	228
4.3.1. Fabrication of structures.....	228
4.3.2. Assembly of structures.....	232
§ 4.4. Research and technical support for design, fabrication and assembly of bearing structures.....	244
4.4.1. Research and technical support design.....	244
4.4.2. Making up recommendations on climatic actions	246
4.4.3. Research and technical support for fabrication and assembly of the bearing metal structures	250
4.4.4. Research and technical support for design, fabrication and assembly of the combined steel- wooden roof trusses	252
4.4.5. Experimental research of the large-scale model.....	253
4.4.6. Monitoring of the bearing structures at the stages of their fabrication and use in building	255
§ 4.5. Investigation analysis of the accidental condition of the skating centre roofing	256
References.....	260

Chapter 5. Examples of the design and assembly of some modern large-span buildings	262
§ 5.1. The roofing of a training football and field athletics arena at the central stadium of Kazan city	262
§ 5.2. The roofing of the «Ice Palace of Sports» at Khodyinka.....	268
§ 5.3. The roof canopies above tribunes of the stadium «Trud» in the Moscow Area.....	273
§ 5.4. The dome and canopies at the entrance group of the airport terminals in «Sheremetyevo-3»	277
§ 5.5. The universal sport module	284
§ 5.6. The roofing projects with company «MERO» structures	287
References.....	292
Chapter 6. Monitoring of the bearing structures at the stage of building assembly and use	293
§ 6.1. General principles	293
§ 6.2. Program on realization of tool monitoring	298
6.2.1. Elaboration of the set's criteria for the control of the stress-deformation state for the bearing structures.....	298
6.2.2. Proof of the maximum values of the permissible limit displacement of the main bearing structures in observable points	299
6.2.3. Proof of the scheme layout and number of the observable points on the bearing structures	300
§ 6.3. The basic stages of tool monitoring.....	301
6.3.1. Peculiarities of the monitoring at a stage of assembly	301
6.3.2. Development of the automated system of monitoring in time of building use.....	302
6.3.3. Measuring methods of the snow loads	303
§ 6.4. Basic requirements on the organization of the appropriate use of the building	304
References.....	307
Chapter 7. Safety of the large-span buildings from progressive collapse at accidental actions	308
§ 7.1. General principles	308
§ 7.2. Requirements to design of the large-span structures on maintenance of their safety from progressive collapse.....	311
7.2.1. Accidental design situations and actions.....	311
7.2.2. Procedures for the safety of the large-span structures from progressive collapse at accidental actions.....	312
§ 7.3. Considering the danger of the progressive collapse of the structures, caused by mistakes of design, manufacturing and assembly or irregular building use.....	313
§ 7.4. Exclusion or prevention of the danger of accidental actions to which the structures or building can be exposed	315
§ 7.5. Selection of optimal (rational) structural decisions and structural materials.....	315
§ 7.6. Design of the «key» elements, capable to perceive accidental actions in addition to regular design loads and actions	317
References.....	319
Chapter 8. Accidental situations in building industry	321
§ 8.1. The general data	321
§ 8.2. The reasons for the accidental situations.....	324
§ 8.3. Some recommendations for the reduction of the risk of accidental situations	325
§ 8.4. The general requirements for the investigations of accidental situations	331
References.....	334

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пространственные системы, получившие развитие при создании большепролетных сооружений, отличаются конструктивной и статической схемами, применяемыми материалами, очертанием плана, формой поверхности, пролетами, методами изготовления и монтажа.

Среди них особое место занимают комбинированные системы, включающие структурно объединенные растянутые элементы (ванты, тонколистовые металлические мембраны, тенты) и элементы, работающие на сжатие и изгиб. Они относятся к наиболее динамично развивающимся в последнее время у нас в стране и за рубежом прогрессивным конструктивным формам. В комбинированных системах удастся существенно уменьшить расчетную длину сжато-изогнутых элементов за счет рационального использования предварительно растянутых элементов из высокопрочного металла, улучшить работу системы на неравномерные нагрузки, существенно уменьшить стрелу подъема конструкции. Их использование открывает широкие возможности создания большепролетных покрытий, отличающихся легкостью, высокими технико-экономическими показателями, архитектурной выразительностью.

Область применения таких конструкций — навесы над трибунами стадионов, покрытия спортивных залов, универсальных спортивно-концертных комплексов, магазинов, рынков, выставочных павильонов и т. п.

Существует множество видов комбинированных систем, даже простейшие из них отличаются большой свободой выбора конструктивной схемы, применяемых материалов, очертания плана, пролетов, методов изготовления и монтажа. Элементарные схемы разнообразными способами объединяются в сложные пространственные структуры.

В работе обобщен опыт проектирования, изготовления и монтажа стальных конструкций покрытий большепролетных зданий и сооружений, возведенных при участии ЦНИИСК им. Кучеренко в последние 10 лет. Это объекты, построенные в Москве: светопрозрачное покрытие Старого Гостиного Двора, покрытие над трибунами стадиона «Локомотив», крытый конькобежный центр (ККЦ) в Крылатском, Ледовый дворец спорта на Ходынке, а также футбольно-легкоатлетический манеж в г. Казани, навесы над трибунами стадиона «Труд» в Подмоскowie и т. д.

Отметим возрастающий объем подобного строительства у нас в стране и за рубежом. Это стадионы, крытые спортивные и зрелищные залы, выставочные павильоны и т. п. В Москве проектируются и строятся футбольные стадионы «ЦСКА», «Спартак», «Москвич» и «Динамо», хоккейный комплекс «Спартак», выставочный павильон на ВВЦ, здания аэровокзалов в Шереметьево и Внуково, светопрозрачное покрытие Центрального ядра ММДЦ «Москва-сити», новый футбольный стадион в западной части Крестовского острова в Санкт-Петербурге, Ледовый дво-

рец спорта в г. Тольятти, спортивно-зрелищные залы в Астрахани и Омске и т. д.

Приведены особенности проектирования большепролетных сооружений на различных этапах, рекомендации по нагрузкам и воздействиям, требования к расчетам. Даны общие сведения о проектах, конструктивное решение различных покрытий (результаты разработки и анализ вариантов конструктивных схем), численное моделирование работы системы на эксплуатационные и монтажные нагрузки, исследования устойчивости различных систем. Большое внимание уделено вопросам изготовления и монтажа конструкций, содержанию и результатам работ по научно-техническому сопровождению строительства, включая экспериментальные исследования моделей, натурные исследования основных несущих конструкций. Подробно отражены задачи мониторинга сооружений на стадии монтажа и последующей эксплуатации, обеспечения их безопасности от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. Рассмотрены аварийные ситуации в строительстве.

Проведенные численные и экспериментальные исследования позволили по-новому осветить вопросы, связанные с действительной работой таких покрытий, выявить дополнительные резервы повышения их эффективности.

Предлагаемое издание является результатом разработок и исследований, выполненных при непосредственном участии автора и под его руководством в ЦНИИСК им. Кучеренко.

В проведении исследований, разработке новых технических решений, проектировании принимали участие сотрудники ЦНИИСК им. Кучеренко В.М. Барышев, Е.Ф. Бородина, И.И. Ведяков, М.И. Егоров, Д.Б. Киселев, И.В. Лебедева, Ю.П. Назаров, П.Д. Одесский, В.А. Отставнов, Н.А. Попов, М.Р. Урицкий и др.

Проектирование, внедрение результатов исследований осуществлялось в творческом содружестве со специалистами ряда организаций: ОАО «ГК-Техстрой» (М.И. Кельман, А.В. Титов), «Курортпроект» (Н.В. Канчели), ГУП МНИИП Моспроект-4 (Е.Е. Бекмухамедов, Д.В. Буш, М.Я. Лившин), ЗАО «Сталькон» (В.Ю. Кулик, В.М. Салашенко), ОАО «Стальмонтаж» МСМУ-1 (А.Н. Выговский, Ю.А. Виноградов), ОАО «Стальмонтаж-ОПТИМ» (В.А. Истомин, В.Л. Старков, И.Г. Останин), ОАО МУ-25 «Спецстальконструкция» (В.И. Федоров), ООО «Монтажспецстройпроект», г. Днепропетровск (И.Н. Рогов), ЗАО «БСК» (Г.К. Ковалев, В.И. Хоменко), ГУП «Татинвестгражданпроект» (И.Э. Файзулин, В.Е. Портянкин), ЗАО «ИнтерТрансСтрой» (А.М. Винер, В.П. Кричановский), фирма «Брайдон Лтд» (Л.Н. Васильева, С.А. Сквирская, Б. Мордью), фирма «БТС ГмбХ» (Ф. Рентмайстер), фирма «Фрейссине» (Б.Л. Артюхов, С. Турнер) и др.

Автор выражает свою глубокую признательность участникам работы и лицам, оказавшим содействие в ее выполнении.

PREFACE

The spatial systems which were developed under the creation of the large-span structures vary in their structural and static schemes, applied materials, outline of plane, with form of a surface, spans, methods of manufacturing and installation.

The combined systems take up a special place among them. They include structurally compound tension elements (cables, thin sheet membranes, tents) and some structural compressed and bending elements also. They belong to the most dynamically developing progressive structural forms at in the country and abroad.

It becomes possible for these systems to reduce essentially effective length of the compressed — bending elements due to the rational use of the preliminary tension members made from the high-strength metal, to improve the work of the system to non-uniform loads, essentially reduce also rise of a structure. Their use opens wide opportunities to create large-span structures distinguished by lightness, high technical and economic parameters and architectural expressiveness.

Field of such designs application - canopies above the tribunes of stadiums, roofing of sports hall, universal sports-concert complexes, shops, markets, exhibition halls etc.

There are a great number of the combined systems types. Even elementary of them are remarkable for their big freedom of a choice of the constructive scheme, used materials, outlines of the plan, spans, methods of manufacturing and installation. Elementary schemes by various ways are united in the complex spatial structures.

This is summarize the experience of design, manufacturing and installation of the roofing to large-span buildings from steel structures assembled for the last 10 years with the participation of the Central Research Institute for Building Structures (TsNIISK). These are the objects constructed in Moscow: transparent roof for «Gostiny Dvor», a covering above tribunes of the «Locomotive» stadium, roof skating centre «Krylatskoe», «The Ice Palace of Sports» at Khodynka, and also a football-athletic arena in Kazan, canopies above tribunes of the «Trud» stadium in the Moscow Area etc.

Necessary to note the grows of the volume of the similar constructions at us in the country and abroad. These are the stadiums, covered sports and entertainment halls, exhibition halls etc. In Moscow football stadiums «CSKA», «Spartak», «Moskvich» and «Dynamo», hockey complex «Spartak», an exhibition hall at the Exhibition Centre, buildings of air terminals in «Sheremetyevo» and «Vnukovo», transparent shell of the Central place «Moscow - City», new football stadium in the western part of «Krestovskiy» island in Saint Petersburg, «The Ice palace of sports» in Tolyatti, sports - entertainment halls in Astrakhan and Omsk etc are projected or are under construction.

Particularities of designing of the large-span constructions at various stages, the recommendations for loadings and actions, requirements to calculations are presented, as well as the general data on projects, the structural solution of various coverings (results of development and the analysis of versions of design schemes), numerical modeling of system behavior on operational and assembly loads, researches of the various systems buckling. Big attention is given to the questions of manufacturing and installation of structures, the maintenance and research and technical support of constructions, including experimental researches of the models, field observation of the basic bearing structures. Objectives of constructions monitoring at a stage of installation and the building use, maintenance of their safety from progressive collapse at accidental actions are reflected in detail. Accidental conditions in building industry are considered.

Carried out numerical and experimental researches have allowed to take up the questions connected to the valid work of such coverings in a new fashion and to reveal additional reserves of increase of their efficiency.

The offered edition grows out from the developments and the researches executed by the author or under his management.

The author expresses deep gratitude to the participants of this work (employees of TsNIISK and other companies), persons who have rendered assistance in its performance.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ (В ТОМ ЧИСЛЕ УНИКАЛЬНЫХ) ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

§ 1.1. Основные положения

В работе обобщен опыт проектирования, изготовления и монтажа стальных конструкций покрытий большепролетных зданий и сооружений (далее сооружений), возведенных за последние 10 лет при участии ЦНИИСК им. Кучеренко [1.1, 1.2]. Это объекты, построенные в Москве: светопрозрачное покрытие Старого Гостиного Двора, покрытие над трибунами стадиона «Локомотив», крытый конькобежный центр (ККЦ) в Крылатском, Ледовый дворец спорта на Ходынке, а также футбольно-легкоатлетический манеж в г. Казани, навесы над трибунами стадиона «Труд» в Подмосковье и т. д. Отметим возрастающий объем подобного строительства у нас в стране и за рубежом. Это стадионы, крытые спортивные и зрелищные залы, выставочные павильоны. В Москве проектируются и строятся футбольные стадионы «ЦСКА», «Спартак» и «Москвич», хоккейный комплекс «Спартак», выставочный павильон на ВВЦ, здания аэровокзалов в Шереметьево и Внуково, светопрозрачное покрытие Центрального ядра ММДЦ «Москва-сити», новый футбольный стадион в западной части Крестовского острова в Санкт-Петербурге, Ледовый дворец спорта в г. Тольятти, спортивно-зрелищные залы в Астрахани и Омске и т. д.

К большепролетным сооружениям относятся покрытия пролетом свыше 36 м. Это пространственные конструкции — сплошные и стержневые оболочки; купола; висячие вантовые, тонколистовые (мембранные) и тентовые покрытия; стержневые пространственные конструкции (структуры); перекрестные системы; а также традиционные конструкции больших пролетов — фермы, рамы, арки и т. п. Большепролетные конструкции могут быть выполнены из разнообразных материалов: сталь, железобетон, дерево, специальные ткани и пленки, в отдельных элементах могут применяться тросы, углепластик и др.

К уникальным большепролетным сооружениям относятся объекты, характеризующиеся по критерию технической сложности следующими параметрами:

- пролеты свыше 100 м, при конструктивных решениях, прошедших успешную апробацию в практике проектирования, строительства и эксплуатации;
- пролеты свыше 60 м, при принципиально новых конструктивных решениях, требующих разработки специальных методов расчета, экспериментального исследования на физических моделях и т. п.

Уникальные, общественно значимые большепролетные сооружения имеют повышенный уровень ответственности по назначению [1.24], отказы которых могут привести к тяжелым экономическим и социальным последст-

виям. В этой связи возникают дополнительные требования к номенклатуре и объемам изысканий и проектных работ, изготовлению и монтажу конструкций, правилам их приемки и эксплуатации. При проектировании уникальных сооружений возникают проблемы, выходящие за рамки существующих нормативных документов. Новизна технических решений требует от инженера-конструктора глубоких специальных знаний, нужен опыт проектирования сооружений подобного рода. В то же время инженеры не должны быть задавлены возрастающими объемами и деталями современных норм, они должны четко понимать факторы, лежащие в их основе. Безопасность и эффективность строительства лучше обеспечивается специалистами, которые могут видеть «общую картину» и не теряются в деталях. Большое количество информации потенциально означает большие возможности для ошибок.

Для повышения качества проектов требуется система строгого контроля на всех этапах проектирования, согласования, экспертизы и утверждения проекта, а также улучшение образования инженеров-строителей. Возможно, необходимо персональное лицензирование инженеров на право проектирования уникальных сооружений. Аналогичные положения включены в ряд национальных строительных норм. Например, в [1.38] отмечено: «...важно, что уникальные проекты должны выполняться специалистами, имеющими соответствующую квалификацию и практический опыт». Требования документа [1.36] предназначены для гарантирования уровня безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности, выполнения необходимых этапов проектирования (строгой регламентации формальной его части), минимизации человеческих ошибок.

Наиболее важной особенностью проектирования уникальных большепролетных сооружений является генерирование идей, основанных на творческом потенциале инженера, который должен объединить свои профессиональные знания и опыт со способностью неограниченного созидания. Этот процесс не может быть компьютеризирован, так как созидательные возможности — привилегия человеческого ума, и они абсолютно необходимы для решения задач будущего проекта, тем более уникального. Компьютеру (во всяком случае, в настоящее время) следует отвести правильную роль — роль технического инструмента. При выборе расчетной модели, чтобы представить поведение конструкции, очень важны предыдущий опыт и интуиция. Это необходимо и при анализе параметров расчетной модели и идеализированной реальной системы. Нельзя исключать использование различных альтернативных подходов, результаты которых могут быть сравнены и противопоставлены.

При проектировании уникальных большепролетных сооружений выдвигаемые идеи должны быть технически и экономически обоснованы. Необходим научный комплексный подход при решении задачи выбора приемлемых конструктивных решений, увязанных с функциональным назначением, архитектурными решениями, методами изготовления и монтажа, условиями эксплуатации. В полном объеме должны выполняться тре-

бования надежности, технологичности и экономической эффективности, учитываться экологические и социальные факторы.

§ 1.2. Этапы проектирования

При всей неповторимости уникальных большепролетных сооружений их проектирование должно обязательно включать следующие стадии [1.10]: постановка задачи, разработка и анализ вариантов технических решений, выбор окончательного варианта, разработка проектной документации с тщательной проверкой принятых решений. Необходимыми документами, предшествующими проектным разработкам, являются «*Техническое задание (ТЗ)*» и «*Специальные технические условия (СТУ)*» на проектирование [1.27]. Эти документы должны четко формулировать постановку задач проектирования, определять пути их решения и таким образом воздействовать на качество проекта.

В СНиП 11-01-95 достаточно подробно приведены требования к составу «*Технического задания на проектирование*», основными из которых являются: цели и задачи проекта, функциональное назначение, архитектурно-планировочные решения, особые условия строительства, исходные данные проектирования, требования по вариантной разработке и т. п.

«*Специальные технические условия*» являются техническими нормами, содержащими (применительно к конкретному объекту) дополнительные требования по надежности и безопасности к установленным (если их недостаточно) или отсутствующим нормативным документам, отражающим особенности проектирования, строительства и эксплуатации объекта. При проектировании объектов на площадках сейсмичностью более 9 баллов СТУ должны содержать требования по обеспечению их сейсмической безопасности.

СТУ разрабатываются научно-исследовательской или проектной организацией, обладающей опытом практической работы в соответствующей области. Разработке СТУ предшествует определение основных объемно-планировочных и конструктивных решений, применяемых материалов и изделий, а также анализ имеющейся нормативной базы в отношении конкретного объекта, который служит основой для разработки недостающих норм или более жестких требований по определенным направлениям. После согласования и утверждения инвестором (заказчиком) СТУ являются нормативно-техническим документом для подготовки проектной документации и ее составной частью.

СТУ должны содержать следующие разделы:

- основание для строительства, сведения об инвесторе (заказчике), генеральной проектной организации и разработчике СТУ;
- наименование и место расположения объекта и условия строительства; назначение и общая характеристика объекта с основными техническими решениями;
- данные об уровне ответственности и уникальности сооружения, расчетном сроке его эксплуатации, требования по применению и объемам опытно-конструкторских и исследовательских работ;

– перечень вынужденных отступлений от действующих нормативных документов, обоснование их необходимости и мероприятия, компенсирующие эти отступления; специальные технические требования, учитывающие архитектурно-планировочные и конструктивные решения, требования по организации строительства объекта и мониторингу.

В отдельных разделах определяются требования к пожарной безопасности, антитеррористической защищенности объекта и т. п.

Требования, установленные СТУ, должны основываться на передовом опыте и современных достижениях отечественной и зарубежной науки, техники и технологии. В состав СТУ могут быть включены отдельные положения, содержащиеся в нормативных документах зарубежных стран, при условии их соответствия законодательству РФ. Технические требования в составе СТУ должны быть конкретными и допускать возможность их контроля.

Наряду с обычными этапами двухстадийного проектирования («Проект» и «Рабочая документация») при разработке уникальных большепролетных сооружений обязателен этап эскизного (концептуального) проектирования, который начинается с накопления максимальной, разносторонней информации, связанной с постановкой задачи [1.1, 1.2]. На этом этапе конструктор разрабатывает и анализирует эскизные варианты технических решений совместно с другими специалистами (архитекторами, технологами, специалистами по изготовлению и монтажу конструкций).

Концепция проекта определяется опытом и комплексным подходом, основанными зачастую на подсознательной оценке надежности отобранных моделей, которая должна быть подтверждена на следующих этапах анализа. Концепция проекта — знание, базирующееся в основном на индивидуальности авторов. В то же время успешное решение задач этого этапа прямо зависит от способности работы участников проекта в команде. Их участие на ранних стадиях проекта эквивалентно интуитивной стратегии проверки и «фильтрации» решений, которые могут исключить существенную часть погрешностей.

Задача проектирования уникальных большепролетных сооружений настолько комплексна, что проект не может быть выполнен единолично. Обсуждения с опытными специалистами на ранних стадиях проектирования очень полезны для оценки вариантов проекта с различных точек зрения. Сравниваются и анализируются различные решения, наилучшие из которых, с учетом всевозможных, зачастую противоречивых, требований, откладываются для дальнейшего рассмотрения и разработки. Этот этап предполагает преодоление неопределенностей проектирования, вызванных тем, что выбор решения, как правило, происходит в условиях неполного знания проектируемой системы; большого количества изменчивых и противоречивых задач; субъективностью лиц, принимающих решения.

На стадии эскизного проектирования уникальных большепролетных сооружений необходимо максимально использовать современные достижения: новые типы конструкций, материалы, методы строительства. Этот этап включает изучение и обобщение отечественного и зарубежного опыта

строительства, инженерный анализ большого количества аналогичных объектов, разработку новых вариантов конструктивных предложений (исключающих неоправданные риски), выбор основных материалов, согласование противоречий между различными разделами проекта.

Отбор рациональных решений — конечный выбор лучшей идеи. Это может быть или спонтанное решение, или трудоемкая разработка и оценка накопленных идей, возможно, проверка первого вторым для оценки completeness. Когда найдена лучшая идея, начинается ее проверка, которая обычно делается в форме расчетов и чертежей.

Разработка проекта требует специальных сведений о нагрузочных факторах, статической и динамической реакции сооружения на различные сочетания нагрузок и воздействий, устойчивости системы в целом и отдельных структурных элементов, учете геометрической, физической и конструктивной нелинейности, надежности и запаса прочности материалов, параметрической чувствительности конструктивной системы в зависимости от типа и степени статической неопределимости и т. п. Необходимы опыт и четкая организация процесса проектирования, научно-техническое обоснование разработки и реализации проекта, решение финансовых и организационных вопросов.

Стадия «Проект» включает разработку основных конструктивных решений, монтажных схем, узлов и деталей, предварительных технических спецификаций. На этой стадии рекомендуется разработка нескольких вариантов для выбора наиболее рационального по технико-экономическим и другим показателям. Технические решения должны быть обоснованы достаточно подробными расчетами, в том числе компьютерными, на основные сочетания нагрузок.

Состав, порядок разработки, согласования и утверждения «Рабочей документации» установлены требованиями СНиП 11-01-95 [1.27] и включают подробную разработку чертежей. В них входят: общие данные, сведения о нагрузках и воздействиях, нагрузки на фундаменты, схемы расположения элементов конструкций, чертежи элементов и узлов конструкций, спецификации материалов и изделий. Принятые проектные решения должны удовлетворять ряду ограничений, обеспечивающих выполнение условий прочности, устойчивости и деформативности отдельных элементов и системы в целом; требованиям нормативных документов, сортаментов, технологических регламентов на изготовление, транспортировку и монтаж конструкций.

Отметим, что для стандартных объектов государственная экспертиза выполняется только на стадии «Проект». Для уникальных большепролетных сооружений справедливо предложение [1.22] проведения независимой экспертизы (включая выполнение полноценного поверочного расчета) законченной рабочей документации перед сдачей ее в производство. Ее цель — повысить качество проекта, исключить возможные ошибки, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Здесь свою роль могло бы сыграть обязательное страхование строительных рисков.

§ 1.3. Нагрузки и воздействия

Уникальные большепролетные сооружения должны воспринимать любые виды нагрузок, определенные «Техническим заданием на проектирование», включая неравномерно распределенные временные нагрузки, статические и динамические нагрузки в виде грузов — сосредоточенных, полосовых, распределенных на небольшой площади, в случае необходимости и динамические воздействия, в том числе сейсмические.

Частую большепролетные покрытия находятся под действием только собственного веса, нагрузок от снега и ветра. К ним могут добавляться: предварительное натяжение, монтажные нагрузки, вызывающие дополнительные усилия, суммирующиеся с эксплуатационными нагрузками, гололедные и температурные воздействия, технологические нагрузки (от оборудования, подвесных потолков и т. п.), для которых необходимо учитывать возможное их увеличение в процессе длительной эксплуатации, реконструкции или модернизации сооружения. Некоторые большепролетные покрытия (например, висячие) имеют относительно небольшую собственную массу и незначительную изгибную жесткость. В этом случае неравномерные снеговые и ветровые нагрузки могут вызвать достаточно большие локальные, в том числе кинематические, деформации покрытия, привести к потере его устойчивости или к расстройству кровли. Это требует достаточно точного учета распределения и величин климатических нагрузок.

Разработка рекомендаций по определению климатических (снег, ветер) нагрузок на основании продувок модели сооружения в аэродинамической трубе. Для большепролетных покрытий с пространственной формой поверхности в нормативных документах в большинстве случаев отсутствуют данные по климатическим нагрузкам. В то же время этому вопросу посвящено достаточно много специальной литературы [1.4, 1.9, 1.11, 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.19, 1.20, 1.21, 1.28, 1.29], где представлен значительный опыт теоретических, экспериментальных и натурных исследований нагрузок на пространственные покрытия разнообразной формы.

Для таких сооружений в большинстве случаев необходима разработка рекомендаций по определению снеговых и ветровых нагрузок на основании продувок модели сооружения в специализированной аэродинамической трубе. Анализ современных данных по этому вопросу показывает, что величина и распределение аэродинамических характеристик сооружения существенно зависят от характера и структуры набегающего потока (пограничного слоя атмосферы). Поэтому испытания следует проводить в аэродинамических установках, позволяющих моделировать действительные ветровые воздействия. Это требование отражено в современных нормах большинства стран [1.31, 1.33, 1.35, 1.40].

Подобные аэродинамические трубы должны обладать длинной горизонтальной рабочей частью [1.19]. Например, труба АТ-17,5/3 фирмы УНИКОН (г. Новосибирск) имеет длину рабочей части 17,5 м, а выходное

Монография

Павел Георгиевич Еремеев

**СОВРЕМЕННЫЕ СТАЛЬНЫЕ
КОНСТРУКЦИИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ
ПОКРЫТИЙ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ**

Редактор: *В. Ш. Мерзлякова*
Компьютерная верстка: *В. Ю. Алексеев*
Компьют. дизайн обложки: *Н. С. Романова*

Диапозитивы предоставлены издательством

Подписано в печать 18.05.2009. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Бум. офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Усл. 21 печ.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации: оф. 348 (КМК)
тел., факс: (495) 183-56-83
http://www.iasv.ru, e-mail: iasv@mgsu.ru