УДК 69.04:624.91

НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е.В. Сысоева

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Аннотация. В статье представлены четыре этапа создания и развития теории пластин и оболочек, которые привели к разработке механизма расчета пространственных конструкций покрытий большепролетных зданий и сооружений на современном уровне. Приведены основные достижения специалистов в области строительной механики и проектирования зданий и сооружений в пределах каждого этапа. Отмечены наиболее важные научные результаты, которые повлияли на создание современных методов расчета и проектирования большепролетных конструкций покрытий. Даны примеры реализованных проектов большепролетных зданий и сооружений.

Ключевые слова: большепролетные конструкции, теория пластин и оболочек, строительная механика, здания и сооружения, метод конечных элементов, вычислительный комплекс, расчет, проектирование

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.131-141

SCIENTIFIC APPROACHES TO CALCULATION AND DESIGN OF LARGE-SPAN STRUCTURES

E.V. Sysoeva

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract. The article presents the four stages of creation and development of the theory of plates and shells which led to the development of a mechanism of calculation of spatial structures of large span buildings and constructions on an advanced level. Each of the stages of the unique buildings calculation method development includes a description of the main achievements in the sphere of structural mechanics, the theory of elasticity and resistance of materials which became the basis for the modern theory of calculation of plates and shells.

In the first stage the fundamentals of solid mechanics were developed; this is presented in works of such outstanding scientists as G. Galilei, J.-L. Lagrange, R. Hooke, L. Euler, Kirchhoff, A. Law etc. Development of the theory of plate and shell would be impossible without these works. But absence of such construction material as reinforced concrete did not enable engineers and architects to create a thin roof. Thickness of coverings was intuitively overstated to ensure durability of buildings.

The second stage is interesting by formulation of the general theory of calculation of plate and shell and by transition from the working state analysis of structures to the limit state analysis. Beginning of use of reinforced concrete resulted in decrease of a roof thickness to the diameter of its base, compared to buildings made of stone and brick.

The third stage is characterized by development of computational systems for calculation of strength, stability and oscillations of core and thin-walled spatial structures based on the finite element method (FEM). During this period a design of buildings and constructions with spans over 200 m with the use of metal was begun.

Currently, or during the fourth stage, structures with the use of metal and synthetic materials for spans up to 300 meters are designed. Calculations of long-span buildings and structures are performed using FEM and taking into account different types of nonlinearity.

Each stage selected from the history of construction is exemplified by completed projects, hereat characteristics of roofs indicating the applied construction material are given. Transition from natural stone to concrete, metal and synthetic materials in construction of large-span buildings is illustrated in the table. At the end of each stage the scientists' and designers' main achievements in the sphere of science, construction and engineering education are shown.

Key words: large-span structures, theory of plate and shell, structural mechanics, buildings and structures, finite element method, computer system, calculation, design

Создание математической теории упругих пластин и оболочек, которая легла в основу их расчета и проектирования, с одной стороны, а с другой — начало самого строительства оболочечных конструкций в виде покрытий, а в дальнейшем и перекрытий больших безопорных пространств, растянулись в истории человечества почти на два тысячелетия.

Архитекторы и строители древних сооружений интуитивно завышали толщину стен, покрытий и перекрытий, чтобы гарантировать прочность зданий. Как писал в своем историческом обзоре Д.Н. Зворыкин, «...отсутствие ясных представлений в области теории обедняло архитектурные возможности и ограничивало замыслы строителей» [1].

Примером большепролетного сооружения в древнеримской архитектуре является полусферический купол Пантеона, материалами для которого послужили натуральный камень (гранит), кирпич и бетон. Пролет Пантеона составляет 43,2 м, толщина стен у опор 6,3 м, в вершине — 1,5 м.

Активное строительство зданий с использованием конструкций оболочечного типа, перекрывающих большие безопорные пространства, началось в Средние века, т.е. в период зарождения теоретической основы проектирования оболочек покрытий, когда инженеры еще не имели достаточно знаний для доведения расчетов до числа и строили, в основном, полагаясь на свою интуицию, опыт, а часто и ошибки предыдущих поколений.

В XII–XIII вв. впервые появляются университеты в Болонье, Париже, Салерно, Монпелье, Оксфорде, в которых начинает зарождаться наука.

Примерно в этот же исторический период возникает необходимость строительства гражданских зданий типа храмов, соборов, рынков, бирж и других сооружений, т.е. зданий с большим количеством одновременно находящихся в них людей и большими пространствами свободными от опор.

В 1564–1642 гг. Галилео Галилеем была разработана теория сопротивления твердых тел деформированию и подробно описана в его последнем трактате «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки» (1638) [2]. Галилей впервые дал определения таким понятиям, как скорость, ускорение, сила, став основоположником динамики. Именно Галилей связал теорию с расчетом строительных конструкций в момент разрушения и тем самым заложил основу расчета строитель-

ных конструкций по предельным состояниям, без которого не может обойтись в наше время проектирование зданий и сооружений. Но прошло более двух столетий после этих открытий, прежде чем такие отрасли науки, как динамика и теория прочности стали руководством к проектированию зданий для инженеров-строителей.

В 1788 г. Жозеф-Луи Лагранж (1736–1813) в своем труде «Аналитическая механика» [3] сформулировал принцип возможных перемещений, им же впервые было выведено уравнение равновесия мембраны.

С 1660-х гг. происходили события, без которых было бы невозможно развитие теории пластин и оболочек:

- 1660 г. — открытие закона упругости Робертом Гуком;
- 1767 г. — вывод уравнения колебания мембран Леонардом Эйлером;
- 1789 г. — получение упрощенного уравнения изгиба пластин Бернулли Якоба-младшего;
- 1821 г. — построение общих уравнений Анри Навье, которые ученый смог с успехом применить для практических потребностей;
- 1828 г. — разработка основ математической теории упругости Огюстеном Луи Коши, а годом позже издание мемуаров по теории упругости;
- 1870-е гг. — издание лекций по механике Густавом Кирхгофом [4], где выдвинуты гипотезы, на которых основано сведение трехмерной задачи теории упругости к двумерной задаче теории пластин, создана теория малых поперечных колебаний тонких упругих пластин, построены нелинейные соотношения между деформациями и перемещениями в квадратичном приближении;
- 1888 г. — разработка основ теории оболочек Огастесом Лявом [5].

Период в три столетия между серединами XVI и XIX вв. можно назвать подготовительным *первым этапом формирования и развития теории пластин и оболочек*, который в дальнейшем послужил отправной точкой в возможности проектирования и расчета конструкций для покрытий и перекрытий большепролетных зданий. В этот период ученые решали лишь отдельно поставленные задачи теоретического характера. Но именно они стали основой для более быстрого развития общей теории тонкостенных пространственных конструкций. Здания, построенные на основе интуиции, опыта предыдущих столетий, простейших математических расчетов служили людям камертоном в различные века и приближали сознание специалистов к необходимости

точных расчетов и созданию аппарата, который позволит рассчитывать практически любое даже самое сложное здание. Методики расчета большепролетных сооружений и их частей основаны в первую очередь на строительной механике и сопротивлении материалов.

В 1809–1840 гг., когда в Петербурге были открыты российские технические учебные заведения: Институт инженеров путей сообщения (1809) и Технологический институт (1828), русские инженеры стали занимать одно из ведущих положений. Здесь готовились специалисты — инженеры, — которые начали проектирование железных дорог, реконструкцию и строительство новых сложных большепролетных промышленных объектов. С этого момента профессии архитектора и инженера полностью дифференцировались для более целенаправленной подготовки инженера в области расчета и конструирования сооружений.

Однако в начале XIX в. отсутствовала нормативная база и при проектировании часто использовались лишь простейшие расчеты и экспериментальные исследования, которые давали лишь приближенные прочностные характеристики [1].

В 1911 г. на основе серии испытаний под руководством проф. Н.А. Белелюбского впервые были созданы нормативные документы для расчета железобетонных конструкций.

Итогом первого этапа можно назвать следующие достижения:

- сделана попытка создания теории о прочности тела в момент его разрушения (или в предельном состоянии);
- заложена основа расчета строительных конструкций по предельным состояниям;
- разработана теория сопротивления твердых тел деформированию;
- введены такие понятия механики, как скорость, ускорение, сила;

- сформулирован принцип возможных перемещений и выведено уравнение равновесия мембраны;

- сформулирован закон Гука;

- получены уравнения колебания мембран Л. Эйлера и упрощенное уравнение изгиба пластин Бернулли Якоба-младшего, формулы Коши, общие уравнения равновесия Навье, дифференциальное уравнение теории малого изгиба пластинки С. Жермен, построена теория изгиба тонких пластин в квадратичном приближении Г. Кирхгофом, В. Ритцем предложен прямой метод нахождения приближенного решения краевых задач вариационного исчисления, который с успехом использовался в дальнейшем для расчета пластин и оболочек;

- заложены основы математической теории упругости, введены понятия напряжения;

- разработаны основы теории оболочек;

- созданы основы теории расчета железобетонных конструкций;

- отношение толщины покрытий большепролетного здания к диаметру его основания уменьшилось примерно в 10 раз (табл. 1).

За длительный первый этап развития строительной науки проектирования большепролетных зданий были построены: римский Пантеон (рис. 1), собор Святой Софии в Константинополе (рис. 2), собор Санта-Мария дель Фьоре во Флоренции (рис. 3), собор Святого Петра в Риме (рис. 4), Зимний дворец, Михайловский (инженерный) замок и Исаакиевский собор в Санкт-Петербурге и мн. др.

Строительная механика и сопротивление материалов как науки стали активно развиваться и давать свои плоды в период следующего, *второго этапа* становления теории и расчета проектирования пространственных конструкций, который начался примерно в конце XIX – начале XX в. (1912–1914 гг.) и продлился немногим более полувека [15].

Рис. 1. Пантеон, г. Рим, Италия [11]
Fig. 1. Pantheon, Rome, Italy [11]

Рис. 2. Собор Святой Софии, г. Константинополь (ныне г. Стамбул), Турция [12]
Fig. 2. St. Sophia Cathedral, Konstantinopol (currently Istanbul), Turkey [12]

Рис. 3. Собор Санта-Мария дель Фьоре, г. Флоренция, Италия [13]
Fig. 3. Santa Maria del Fiore Cathedral, Florence, Italy [13]

Рис. 4. Собор Святого Петра, г. Рим, Италия [14]
Fig. 4. St. Peter's Basilica, Rome, Italy [14]

Табл. 1. Характеристики покрытий сооружений больших пролетов в различные периоды истории строительства
Table 1. Characteristics of coverings of large-span structures in different periods of the history of construction

Объект, годы строительства / Project, years of construction	Авторы — архитекторы и инженеры / Authors — architects and engineers	Материал покрытия, диаметр D , толщина δ , высота H , длина L / Material of covering, diameter D , thickness δ , height H , length L	δ/D
Этап I / Stage I			
Пантеон, Италия, г. Рим, 126 г. / Pantheon, Italy, Rome, year of 126	Руководитель работ Аполлодор Дамасский [6] / Construction manager — Apollodorus of Damascus [6]	Бетон с туфом, $D = 43,2$ м; $\delta = 6$ м у опорного кольца и $\delta = 1,5$ м на вершине / Concrete with tuff, $D = 43.2$ m, $\delta = 6$ m at the base ring and $\delta = 1.5$ m	1/30
Собор Санта-Мария дель Фьоре, Италия, г. Флоренция, 1295–1367 гг. / Santa Maria del Fiore Cathedral, Italy, Florence, 1295–1367	Архитекторы Арнольфо ди Камбио, Джотто ди Бондоне, Андреа Пизано, Франческо Таленти; инженер Ф. Брунеллески / Architects: Arnolfo di Cambio, Giotto di Bondone, Andrea Pisano, Francesco Talenti, engineer: F. Brunelleschi	Бетон, кирпич (купол), $D = 44$ м; $\delta = 1,2 \dots 1,4$ м / Concrete, brick (the dome), $D = 44$ m; $\delta = 1.2 \dots 1.4$ m	1/37
Исаакиевский собор, Россия, г. Санкт-Петербург, 1858 г. / St. Isaac Cathedral, Saint Petersburg, 1858	Архитектор О. Монферран; расчеты купола выполнил инженер П.К. Ломновский / Architect: Auguste de Montferrand, calculations of the dome by P.K. Lomnovsky, engineer	Кирпич, наружный диаметр купола — 25,8 м; $H = 101,5$ м; $\delta = 1,1 \dots 1,25$ м / Brick, external diameter of the dome — 25.8 m; $H = 101.5$ m; $\delta = 1.1 \dots 1.25$ m	1/260
Этап II / Stage II			
Планетарий, Россия, г. Москва, 1927–1929 гг. [7] / Planetarium, Russia, Moscow, 1927–1929 [7]	Архитекторы М.О. Барщ, М.И. Синявский; инженеры А.К. Говве, П.Я. Смирнов / Architects: M.O. Barshch, M.I. Sinyavsky; engineers A.K. Govve, P.Ya. Smirnov	Железобетон, $D = 28$ м; $\delta = 12$ см внизу и $\delta = 6$ см наверху / Reinforced concrete, $D = 28$ m; $\delta = 12$ cm at the foot and $\delta = 6$ cm at the top	1/140
Новосибирский театр оперы и балета; Россия, г. Москва, 1931–1945 гг. / Novosibirsky Opera and Ballet Theatre, Russia, Novosibirsk, 1931–1945 [7]	Авторы проекта А.З. Гринберг, М.И. Курилко, Т.Я. Бардт, М.Т. Смуров; проект купола выполнили проф. П.Л. Пастернак и инженер Б.Ф. Матери / Project designers: A.Z. Grinberg, M.I. Kurilko, T.Ya. Bardt, M.T. Smurov, design of the dome by P.L. Pasternak, prof., and B.F. Materi, engineer	Железобетон, $D = 55,5$ м; $\delta = 7$ см / Reinforced concrete, $D = 55.5$ m; $\delta = 7$ cm	1/790
Этап III / Stage III			
Дворец спорта «Юбилейный», Россия, г. Санкт-Петербург, 1967 г. [8] / “Yubileyny” Palace of Sports, Russia, Saint Petersburg, 1967 [8]	Архитектор Г.П. Морозов; инженер А.П. Морозов / Architect: G.P. Morozov, engineer: A.P. Morozov	Металл, $D = 94$ м; $\delta = 5$ мм / Metal, $D = 94$ m; $\delta = 5$ mm	1/18800
Крытый стадион «Олимпийский», Россия, г. Москва, 1980 г. [9] / “Olimpiyskiy” roofed stadium, Russia, Moscow, 1980 [9]	Архитекторы М.В. Посохин, Б.И. Тхор, Л.С. Аранаускас; инженеры Ю.П. Львовский, Л.И. Чертков, П.Г. Еремеев, В.И. Трофимов / Architects: M.V. Posokhin, B.I. Tkhor, L.S. Aranauskas, engineers: Lvovsky Yu. P., Chertkov L.I., Eremeev P.G., Trofimov V.I.	Металл, 224×183 м; $\delta = 5$ мм / Metal, 224×183 m; $\delta = 5$ mm	1/44800

Табл. 1. Характеристики покрытий сооружений больших пролетов в различные периоды истории строительства (окончание)**Table 1.** Characteristics of coverings of large-span structures in different periods of the history of construction (end)

Объект, годы строительства / Project, years of construction	Авторы — архитекторы и инженеры / Authors – architects and engineers	Материал покрытия, диаметр D , толщина δ , высота H , длина L / Material of covering, diameter D , thickness δ , height H , length L	δ/D
Олимпийский стадион ФЛК ЦСКА, Россия, г. Москва, Ленинградский проспект, 1979 г. / Olympic stadium FLK TsSKA, Russia, Moscow, Leningradskiy prospekt, 1979	Архитектор Ю.А. Регентов; главный инженер И.Л. Ружанский / Architect: Yu.A. Regentov, chief engineer: I.L. Ruzhansky	Металл $L = 90$ м; $\delta = 1,5$ мм / Metal $L = 90$ m; $\delta = 1.5$ mm	1/89000
Олимпийский крытый велотрек, Россия, г. Москва 1977–1978 гг. [10] / Olympic roofed cycle track, Russia, Moscow, 1977–1978 [10]	Архитекторы Н.И. Воронина, А.Г. Оспенников; инженеры В.В. Ханджи, Ю.С. Родниченко, В.А. Бородин, И. Лисицин, В.И. Трофимов, Л.И. Гольденберг, П.Г. Еремеев и др. / Architects: N.I. Voronina, A.G. Ospennikov; engineers: V.V. Khandzhi. Yu.S. Rodnichenko. V.A. Borodin, I. Lisitsyn. V.I. Trofimov, L.I. Goldenberg, P.G. Eremeev, et al.	Металл, $L = 168$ м; $\delta = 4$ мм / Metal, $L = 168$ m; $\delta = 4$ mm	1/42000
Этап IV / Stage IV			
Спортивно-концертный комплекс Nagoya Dome, г. Нагоя, Япония, 1997 г. / “Nagoya Dome” Sports and Concert Complex, Japan, Nagoya, 1997	Совместная разработка Takenaka Corporation и Mitsubishi / Codevelopment of Takenaka Corporation and Mitsubishi	Синтетическая ткань (покрытие), металл (несущая часть покрытия), $D = 188$ м; $\delta \leq 2$ мм / Synthetic fabric (covering), metal (load-bearing part of the covering), $D = 188$ m; $\delta \leq 2$ mm	1/94000
Пекинский национальный плавательный комплекс, г. Пекин, Китай, 2008 г. / Peking National Swimming Complex, China, Peking, 2008	Архитекторы: Д. Билман, М. Батлер; инженеры: К. Босс, М. Арксистон / Architects: D. Bilman, M. Batler, engineers: K. Boss, M. Arksistone	Синтетическая ткань (покрытие), металл (несущая часть покрытия), $D = 178$ м; $H = 32$ м; $\delta = 0,2$ мм / Synthetic fabric (covering), metal (load-bearing part of the covering) $D = 178$ m; $H = 32$ m; $\delta = 0.2$ mm	1/89000

Последние годы XIX столетия были ознаменованы разработкой теории устойчивости строительных конструкций. Инженер Ф.С. Ясинский смог довести эту теорию до практического применения при расчете сооружений. На примере анализа причин разрушения мостов и других сооружений Ф.С. Ясинский установил пределы применимости формулы Эйлера и предложил новые решения конструкций большепролетных промышленных зданий. Примером могут служить перекрытия Александровских мастерских бывшей Николаевской железной дороги. Здесь в 1898 г. на месте старых деревянных строений были построены большепролетные, перекрытые металлическими фермами, мастерские и кирпичные корпуса. Ему же принадлежит идея вве-

дения коэффициента снижения допускаемого напряжения при продольном изгибе, что стало толчком к проектированию перекрытий и покрытий меньшей толщины.

Конец XIX в. известен также работами В.Г. Шухова, которым были разработаны легкие экономичные перекрытия различного типа: арочные покрытия (например, дебаркадер Киевского вокзала в Москве); оболочки двоякой кривизны для перекрытий Выксунского завода; светопрозрачное покрытие ГУМа в Москве (архитектор Александр Померанцев, 1893 г.) из арочных металлических конструкций.

Во второй период ученым кораблестроителем И.Г. Бубновым была разработана теория гибких прямоугольных пластин удлиненной

формы, изложенная им в курсе «Строительная механика корабля». Он является автором известного метода интегрирования дифференциальных уравнений (метод Бубнова-Галеркина), имеющего широкое применение в теории упругости и строительной механике. Метод Бубнова-Галеркина давно применяется как для решения дифференциальных уравнений с частными производными, так и для формирования основы метода конечных элементов (МКЭ).

Изучение гибких пластин в 1907 г. было продолжено А. Фепплем и С.П. Тимошенко (1915). Работы С.П. Тимошенко по теории гибких пластин были в то время связаны с развивающимися кораблестроением и самолетостроением.

Одним из направлений развития строительной механики в первую треть XX в. был переход от методов расчета по рабочему состоянию к методу расчета сооружений по предельному состоянию с учетом пластических деформаций.

В 1932 г. В.З. Власовым были решены отдельные задачи по расчету оболочек средней длины, приведенные в работе [16]. В 1949 г. были опубликованы его монография «Строительная механика тонкостенных пространственных систем» [17] и книга «Общая теория оболочек и ее приложение в технике» [18].

К концу второго периода отношение толщины покрытия к диаметру его основания (δ/D) изменилось от 1/30 до 1/790. Это видно на примере бетонного покрытия Пантеона с толщиной 1,5 м в верхней точке, и диаметром 43,2 м и, например, Новосибирского театра (1945) с железобетонным покрытием купола толщиной 7 см вверху и диаметром 55,5 м (см. табл. 1).

Результатом второго периода развития теории оболочек и проектирования большепролетных зданий и сооружений стали следующие достижения:

- сформулирована общая теория расчета пластин и оболочек, в т.ч. в нелинейной постановке;

- разработаны вариационные методы (метод Ритца, метод Бубнова-Галеркина, метод Власова-Канторовича) для расчета пластин и оболочек при различных видах нагрузок;

- установлены пределы применимости формулы Эйлера и предложены новые решения конструкций большепролетных промышленных зданий;

- введен коэффициент снижения допускаемого напряжения при продольном изгибе;

- созданы легкие экономичные перекрытия различного типа;

- разработана теория гибких прямоугольных пластин удлиненной формы;

- создана основа строительной науки в индустриальном капитальном строительстве;

- произошел переход от методов расчета по рабочему состоянию к методу расчета сооружений по предельному состоянию с учетом пластических деформаций;

- разработаны основы МКЭ.

На втором этапе развития метода расчета пространственных конструкций были спроектированы такие уникальные здания, как Московский планетарий (1927–1929 гг.) (рис. 5), театр оперы и балета, г. Новосибирск (1931–1945 гг.) (рис. 6) и др. Основным материалом для строительства тонкостенных покрытий XX столетия служил железобетон (см. табл. 1).

Отправной точкой *третьего этапа* можно считать 1950-е гг., ознаменовавшиеся началом общей компьютеризации и появлением персональных компьютеров. Этот период характеризуется в первую очередь применением различных вычислительных комплексов, реализующих МКЭ. МКЭ имеет очень широкое распространение в практике расчетов на прочность, устойчивость и колебания строительных конструкций. С помощью МКЭ можно успешно выполнить анализ широкого класса стержневых систем (фермы, рамы и т.д.), тонкостенных пространственных конструкций (плиты перекрытий, обо-

Рис. 5. Планетарий, Россия, г. Москва, ул. Садовая-Кудринская 1929 г. [19]

Fig. 5. Planetarium, Russia, Moscow, Sadovaya-Kudrinskaya Street, 1929 [19]

Рис. 6. Новосибирский театр оперы и балета, Россия, г. Новосибирск, 1931–1945 гг. [20]

Fig. 6. Novosibirsky Opera and Ballet Theatre, Novosibirsk, Russia, 1931–1945 [20]

лочки покрытий и т.д.), массивных трехмерных тел, а также комбинированных систем, состоящих из одномерных, двумерных и трехмерных элементов.

Во второй трети XX в. такими учеными, как В.П. Абовский, Н.П. Абовский, Н.В. Ахвледиа-ни, В.С. Бартенев, Б.С. Васильков, В.З. Власов, А.С. Вольмир, А.А. Гвоздев, А.Б. Гольденвейзер, Б.В. Горенштейн, Э.И. Григолюк, Л.Г. Доннелл, А.М. Дубинский, К.С. Завриев, П.Г. Еремеев [21, 22], В.Н. Иванов, В.В. Карпов, Н.В. Колкунов, В.И. Колчунов, М.С. Корнишин, С.Б. Косицын, С.Н. Кривошапко, Х.Х. Лауль, М.Е. Липницкий, П.А. Лукаш, А.И. Лурье, И.Г. Людковский, Р.Н. Мацелинский, И.Е. Милейковский, Б.А. Миронков, Д.Х. Муштари, Х.М. Муштари, В.В. Новожилов, А.М. Овечкин, О.Д. Ониашвили, А.И. Рабинович, Ю.Н. Работнов, В.Д. Райзер, А.В. Погорелов, В.А. Постнов, А.М. Проценко, Г.И. Пшеничных, В.Г. Рекач, А.Р. Ржаницын, С.П. Тимошенко, В.И. Трофимов, С.Б. Турковский [23], А.П. Филин, Г.К. Хайдуков, Я.Ф. Хлебной, А.А. Цейтлин, В.В. Шугаев и другими исследователями, были проведены глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области железобетонных, стальных и деревянных клееных конструкций.

Весь период развития строительной науки в области проектирования и строительства большепролетных зданий с конца 1940-х гг. был отмечен быстрым развитием компьютерных методов расчета. С 1965 г. расчет в СССР производился на электронных вычислительных машинах БЭСМ-4, БЭСМ-6, М-220 и М-222, Минск-32, а с 1971 по 1998 г. — на машинах серии ЕС ЭВМ. Широко использовался и продолжал развиваться МКЭ, для решения отдельных задач применялись различные аналитические методы. К концу XX столетия расчет и проектирование были полностью переведены на персональные компьютеры. На смену машинам, занимавшим десятки квадратных метров площади, пришли

кластеры, состоящие из группы компьютеров, объединенных высокоскоростными каналами связи и представляющие с точки зрения пользователя единый аппаратный ресурс.

В конце третьего этапа ученые достигли следующих результатов:

- началась общая компьютеризация процессов расчета и проектирования зданий и сооружений;
- разработаны вычислительные комплексы для расчета на прочность, устойчивость и колебания стержневых и тонкостенных пространственных конструкций на основе МКЭ в помещениях;
- для расчета оснований зданий и сооружений успешно применялись вычислительные алгоритмы и программное обеспечение на основе метода граничных элементов;
- продолжались модельные исследования железобетонных, металлических и клееных деревянных конструкций, перекрывающих большие пролеты;
- созданы первые нормативные документы для проектирования зданий и сооружений;
- началось активное строительство пневматических и тентовых покрытий;
- отношение толщины покрытия к диаметру его основания уменьшилось по сравнению с предыдущим периодом примерно в 120 раз, чему способствовало начало применения тонколистовых покрытий.

К концу XX столетия были построены десятки большепролетных железобетонных и металлических покрытий зданий пролетом 60...250 м в разных странах. Яркими примерами зданий, спроектированных и рассчитанных в этот период, стали: Дворец спорта «Юбилейный», г. Санкт-Петербург (1967) (рис. 7); олимпийский ледовый дворец спорта, г. Гренобль, Франция (1967) с тонкостенным железобетонным покрытием, опирающимся всего на четыре точки; большой Московский государственный цирк

Рис. 7. Дворец спорта «Юбилейный», г. Санкт-Петербург, Россия, 1967 г. [24]
Fig. 7. “Yubileyny” Palace of Sports, Saint Petersburg, Russia, 1967 [24]

Рис. 8. Велотрек в Крылатском, г. Москва, Россия, 1979 г. [25]
Fig. 8. Cycle track in Krylatskoye, Moscow, Russia, 1979 [25]

Рис. 9. Олимпийский бассейн, г. Москва, Россия, 1980 г. [26]
Fig. 9. Olympic swimming pool, Moscow, Russia, 1980 [26]

Рис. 10. Спортивно-концертный комплекс «Nagoya Dome», Япония, 1997 г. [27]
Fig. 10. “Nagoya Dome” Sports and Concert Complex, Nagoya, Japan, 1997 [27]

на проспекте Вернадского (1958–1971); олимпийский стадион, г. Монреаль, Канада (1976); Олимпийский стадион ФЛК ЦСКА, г. Москва (1979); Велотрек в Крылатском, г. Москва (1979) (рис. 8); Олимпийский бассейн на проспекте Мира, г. Москва (1980) (рис. 9); универсальный спортивный зал «Дружба», г. Москва (1980), спортивно-концертный комплекс Nagoya Dome, Япония (1997) (рис. 10); другие сооружения. Основным строительным материалом для большепролетных конструкций покрытий становится металл.

Началом *четвертого, продолжающегося и сейчас этапа* развития теории расчета, проектирования и строительства большепролетных зданий и сооружений можно условно считать начало XXI в.

В этот период наряду с медленным развитием и уточнением математического прикладного аппарата в проектировании конструкций, происходит некоторое движение в развитии новых вычислительных программ для персональных ЭВМ на основе МКЭ, появляются новые типы конструкций для покрытия зданий больших пролетов с различными комбинациями материалов. Создаются железобетонные конструкции со стальными элементами и светопрозрачным покрытием [28]. В качестве примера можно назвать создание новых конструкций многогранных сборных железобетонных оболочек и сводчатых покрытий различных типоразмеров в лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева.

На основе МКЭ [29] в XXI в. успешно используются вычислительные комплексы ЛИРА, SCAD, STARK, MicroFE, СТАДИО, ABAQUS, ADINA, ANSYS, LS-DYNA, COSMOS, MSC/NASTRAN, Robot Millennium, SOFISTIC и др. Все они способны работать совместно со средой AutoCAD для создания расчетной модели. В последние 15 лет интенсивно применяется и продолжает модифицироваться программный комплекс REVIT, интерфейс которого согласуется со всеми отечественными и зарубежными расчетными программами, используемыми в нашей стране. Для проверки точности результатов расчета железобетонных большепролетных зданий и сооружений с конструктивными особенностями на названных выше вычислительных комплексах часто появляется необходимость сравнения их с результатами натурных или модельных экспериментов.

К настоящему времени процесс проектирования строительных конструкций (в т.ч. боль-

шепролетных) характеризуется следующими моментами:

- созданы эффективные программные комплексы для расчета и проектирования любых уникальных зданий и сооружений вплоть до выпуска рабочих чертежей [30];
- расчеты уникальных зданий и сооружений проводят обычно по двум программным комплексам для получения идентичных результатов с малым разбросом;
- расчеты зданий и сооружений в ряде случаев проводятся с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности;
- постоянно меняется состав бетонной смеси для различных погодных условий и различных типов технологии строительства;
- применяются новые технологии в строительстве большепролетных зданий, например, торкретирование, позволяющее создавать тонкостенные железобетонные конструкции для покрытий размером более 100 м;
- пересматриваются нормативные документы во всех областях строительства в связи с применением новых технологий, сочетаний материалов, уточнением отдельных требований в расчете;
- для определения ветровых и снеговых нагрузок на здания и сооружения выполняется продувка моделей в аэродинамической трубе;
- положено начало нового направления BIM технологий в проектировании.

К 2016 г. построены сотни большепролетных зданий и сооружений: Philippines Arena (220 × 170 м в плане) (рис. 11); Пекинский национальный стадион (разработана новая марка стали) (2008) (рис. 12); Национальный стадион, г. Варшава, Польша (2011); Friends Arena, г. Стокгольм, Швеция (2012); AT&T Stadium, г. Арлингтон, США (2009) (рис. 13), десятки пневматических и тентовых покрытий зданий и сооружений пролетом более 100 м. Причем, при достигнутой минимальной толщине покрытия постоянно увеличивается величина самого пролета. Основным строительным материалом остается металл и используется прочное синтетическое покрытие.

По прогнозам специалистов дальнейшее развитие проектирования пространственных конструкций будет направлено на создание новых типов и комбинаций строительных материалов, развитие и совершенствование новых программных комплексов по расчету на ЭВМ с помощью МКЭ, создание новых типов пространственных конструкций, приводящих к изменению и развитию технологии строительства.

Рис. 11. Спортивная арена, г. Манила, Филиппины [31]

Fig. 11. Sports Arena, Manila, the Philippines [31]

Рис. 12. Пекинский национальный стадион, г. Пекин, Китай [32]

Fig. 12. Peking National Stadium, Peking, China [32]

Рис. 13. AT&T Stadium, г. Арлингтон, США [33]

Fig. 13. AT&T Stadium, Arlington, USA [33]

ЛИТЕРАТУРА

1. Зворыкин Д.Н. Развитие строительной науки в СССР. М. : Стройиздат, 1981. 293 с.
2. Галилей Г. Избранные труды в двух томах. М. : Наука, 1964. Т. 2. 575 с.
3. Лагранж Ж.-Л. Аналитическая механика / пер. с франц. В.С. Гохмана ; под ред. и с примеч. Л.Г. Лойцянского, А.И. Лурье. 2-е изд. М. ; Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. Т. 1. 594 с. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия)
4. Кирхгоф Г. Механика. Лекции по математической физике / пер. с 4-го нем. изд. ; под ред. А.Т. Григорьяна, Л.С. Полака. М. : Изд-во АН СССР, 1962. 402 с.
5. Ляв А. Математическая теория упругости / пер. с 4-го англ. изд. Б.В. Булгакова, В.Я. Натансона. М. ; Ленинград : ОНТИ. Глав. ред. общетехн. литера и номографии, 1935. 674 с.
6. Афонькин С.Ю. Все о чудесах архитектуры. СПб. : ООО СЗКЭО, 2009. 176 с.
7. Барц М.О., Синявский М.И. Планетарий: Научный театр для рабочих масс // Современная архитектура. 1927. № 3. С. 79–81.
8. Кривошапко С.Н. Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 7 (34). С. 51–70.
9. Мембранные конструкции зданий и сооружений : в 2 ч. / под общ. ред. В.И. Трофимова, П.Г. Еремеева. М. : Стройиздат, 1990. Ч. 1. 1990. 248 с.
10. Еремеев П.Г. Пространственные тонкостенные металлические конструкции покрытий. М. : Изд-во АСВ, 2006. 560 с.
11. Поездка сотрудников института по городам Австрии, Италии, Германии в мае 2008 года // ОАО «НИИ Стали». Режим доступа: <http://niistali.narod.ru/cities/Pantheon.htm>.
12. Википедия. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
13. Санта-Мария-дель-Фьоре // Википедия. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Санта-Мария-дель-Фьоре>.
14. Туристический интернет портал tour52.ru. Режим доступа: tour52.ru.
15. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М. : Гостехиздат, 1956. 419 с.
16. Власов В.З. Новый практический метод расчета складчатых покрытий и оболочек // Строительная промышленность. 1932. № 11. С. 2–8.
17. Власов В.З. Строительная механика тонкостенных пространственных систем. М. : Стройиздат, 1949. 435 с.
18. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. М. ; Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1949. 784 с.
19. Retromap. Режим доступа: retromap.ru.
20. Информационная группа «ТУРПРОМ». Режим доступа: tourprom.ru.
21. Еремеев П.Г. Современные конструкции покрытий над трибунами стадионов. М. : Изд-во АСВ, 2015. 235 с.
22. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. Т. 2. № 1. С. 5–15.
23. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клеевые деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) : иллюстрированные примеры применения в строительстве несущих клееных деревянных конструкций по материалам исследований и проектирования сотрудников лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК / под общ. ред. С.Б. Турковского, И.П. Преображенской. М. : Стройматериалы, 2013. 300 с.
24. Звездный лед. Фигурное катание. Режим доступа: zvyozdnyy-lyod.ru.
25. Марафонский клуб ГЕПАРД. Режим доступа: mcgopard.ru.
26. ayda.ru : отзывы туристов. Режим доступа: ayda.ru.
27. Крымский блог. Режим доступа: crimeanblog.blogspot.ru.
28. Пат. 109479 RU, МПК E04B 7/08. Сборное железобетонное сводчатое покрытие / Б.С. Соколов, Т.В. Щербина, В.В. Шугаев ; патентообл. ОАО «НИЦ «Строительство». № 2011120450/03 ; заявл. 24.05.2011 ; опубл. 20.10.2011. Бюл. № 29.

29. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. В.М. Каргвелишвили. М. : Мир, 1984. 428 с.
30. Трушин С.И. Строительная механика: метод конечных элементов. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2016. 305 с. (Высшее образование: Бакалавриат)
31. Zhelezyaka. Режим доступа: zele.ru.
32. ООО «Архи.ру» Режим доступа: archi.ru.
33. The Christian Post. Режим доступа: asepiqeziba.99on.com
34. Файбишенко В.К. Металлические конструкции. М. : Стройиздат, 1984. 336 с.
35. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood, UK : Multi Science Publishing Co Ltd., 2011. Pp. 485–490.

Поступила в редакцию в октябре 2016 г.

Об авторе: **Сысоева Елена Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, sev4279@yandex.ru.

Для цитирования: *Сысоева Е.В.* Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 2 (101). С. 131–141. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.131-141

REFERENCES

1. Zvorykin D.N. *Razvitie stroitel'noy nauki v SSSR* [Development of the Construction Science in the USSR]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 293 p. (In Russian)
2. Galilei G. *Izbrannye trudy v dvukh tomakh* [Selected Works in Two Volumes]. Moscow, Nauka Publ., 1964, vol. 2, 575 p. (In Russian)
3. Lagrange J.-L. *Mecanique Analytique*. Cambridge University Press, 2009, vol. 1, 392 p.
4. Kirchhoff G.R. *Vorlesungen über mathematische Physik. Mechanik*. Leipzig, 1876, 489 p.
5. Love A.E.H. *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Courier Corporation, 1944, 643 p.
6. Afonkin S.Yu. *Vsyo o chudesakh arkitektury* [Everything About the Wonders of Architecture]. Saint Petersburg, SZKEO Publ., 2009, 174 p. (In Russian)
7. Barshch M.O., Sinyavskiy M.I. *Planetariy : nauchnyy teatr dlya rabochikh mass* [Planetarium: Scientific Theatre for Working Masses]. *Sovremennaya arkhitektura* [Modern architecture]. 1927, no. 3, pp. 79–81. (In Russian)
8. Krivoschapko S.N. *Visyachie trosovye konstruksii i pokrytiya sooruzheniy* [Suspended Cable Structures and Roofs of Buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings And Structures]. 2015, no. 7 (34), pp. 51–70. (In Russian)
9. Trofimov V.I. editor, *Membrannye konstruksii zdaniy i sooruzheniy : v 2 ch.* [Stressed-Skin Structures of Buildings and Installations : in 2 Parts]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, Part 1, 248 p. (In Russian)
10. Ereemeev P.G. *Prostranstvennye tonkolistovye metallicheskie konstruksii pokrytiy* [Spatial Sheet Metal Structures of Roofs]. Moscow, ASV Publ., 2006, 560 p. (In Russian)
11. Poezdka sotrudnikov instituta po gorodam Avstrii, Italii, Germanii v mae 2008 goda [Tour of Members of the Institute through Towns and Cities of Austria, Italy, Germany in May, 2008]. OAO «NII Stali» [JSC “Scientific Research Institute of Steel”]. Available at : <http://niiitali.narod.ru/cities/Pantheon.htm>. (In Russian)
12. Vikipediya [Wikipedia]. Available at : <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (In Russian)
13. Santa-Mariya-del'-F'ore [Santa Maria del Fiore]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Санта-Мария-дель-Фьоре> (In Russian)
14. Turisticheskiy internet portal tour52.ru [Tourist Internet Portal tour52.ru]. Available at: tour52.ru (In Russian)
15. Vol'mir A.S. *Gibkie plastinki i obolochki* [Flexible Plates and Shells]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1956, 419 p. (In Russian)
16. Vlasov V.Z. *Novyy prakticheskiy metod rascheta skladchatykh pokrytiy i obolochek* [New Practical Method of Analysis of Folded-Plate Roofs and Polyhedral Shells]. *Stroitel'naya promyshlennost'* [Construction Engineering]. 1932, no. 11, pp. 2–8. (In Russian)
17. Vlasov V.Z. *Stroitel'naya mekhanika tonkostennykh prostranstvennykh sistem* [Structural Mechanics of Thin-Walled Spatial Systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1949, 435 p. (In Russian)
18. Vlasov V.Z. *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike* [General Theory of Shells and its Application in Engineering]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1949, 784 p. (In Russian)
19. Retromap. Available at : retromap.ru (In Russian)
20. Informatsionnaya gruppа «TURPROM» [TURPROM Information Group]. Available at: www.tourprom.ru (In Russian)
21. Ereemeev P.G. *Sovremennye konstruksii pokrytiy nad tribunami stadionov* [Stadium Stand Roofs of Modern Designs]. Moscow, ASV Publ., 2015, 235 p. (In Russian)
22. Ereemeev P.G. *Osobennosti proektirovaniya unikal'nykh bol'sheproletnykh zdaniy i sooruzheniy* [Particularities of Design of Unique Large-Span Buildings and Structures]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. 2006, vol. 2, no. 1, pp. 5–15. (In Russian)
23. Turkovskiy S.B. editor. *Kleenye derevyannye konstruksii s uzlami na vkleennykh sterzhnyakh v sovremennoy stroitel'stve (sistema TsNIISK) : illyustrirovannye primery primeneniya v stroitel'stve nesushchikh kleennykh derevyannykh konstruksiy po materialam issledovaniy i proektirovaniya sotrudnikov laboratorii derevyannykh*

konstruktsiy TsNIISK [Glued Wooden Structures with Nodes on Glued-in Rods in Modern Construction (the TsNIISK System) : Illustrated Examples of Application of Load-Bearing Glued Wooden Structures in Construction, Using the Research and Designing Materials of the Staff of the TsNIISK Laboratory of Wooden Structures]. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2013, 300 p. (In Russian)

24. Zvezdnyy lyod. Figurnoe katanie [Stellar Ice. Figure Skating]. Available at: zvyozdnyy-lyod.ru. (In Russian)

25. Marafonskiy klub GEPARD [Marathonian Club GUEPARD]. Available at: mcgepard.ru. (In Russian)

26. ayda.ru : otzvyv turistov [ayda.ru : Tourists' Feedback]. Available at: ayda.ru. (In Russian)

27. Krymskiy blog [Crimean Blog]. Available at: crimeanblog.blogspot.ru. (In Russian)

28. Sokolov B.S. Patent No. 109479 RU, MPK E04B 7/08. *Sbornoe zhelezobetonnoe svodchatoe pokrytie* [Patent No. 109479 RU, MPK E04B 7/08. Prefabricated Reinforced Concrete Vaulted Roof]. Patent holder OAO NITs "Stroitel'stvo", No. 2011120450/03, appl. 24.05.2011, publ. 20.10.2011, bulletin no. 29. (In Russian)

29. Gallagher R.H. Finite Element Analysis : Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1975, 416 p.

30. Trushin S.I. *Stroitel'naya mekhanika : metod konechnykh elementov* [Structural Mechanics : Finite Element Method]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 305 p. (Vysshee obrazovanie: Bakalavriat [(Higher Education : Baccalaureate)]) (In Russian)

31. Zhelezyaka. Available at: zele.ru. (In Russian)

32. ООО «Архи.ру» [LLC "Архи.ру"]. Available at: archi.ru. (In Russian)

33. The Christian Post. Available at: asepiqeziba.99on.com.

34. Faybishenko V.K. *Metallicheskie konstrukt-sii* [Metal Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 336 p. (In Russian)

35. John F. Abel. The Future of Spatial Structures. Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood, UK, MultiScience Publishing Co Ltd., 2011, pp. 485–490.

Received in October, 2016.

About the author: **Sysoeva Elena Vladimirovna** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Buildings and Constructions Design, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sev4279@yandex.ru.

For citation: Sysoeva E.V. Nauchnye podkhody k raschetu i proektirovaniyu bol'sheproletnykh konstruktsiy [Scientific Approaches to Calculation and Design of Large-Span Structures]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 2 (101), pp. 131–141. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.131-141