

ISSN 1815-5235

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Обзорно-аналитический и
научно-технический журнал

№ 6
декабрь



**STRUCTURAL MECHANICS OF
ENGINEERING CONSTRUCTIONS
AND BUILDINGS**

2014

Сведения о журнале

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал «*Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*» знакомит читателей с достижениями отечественных и зарубежных ученых в области геометрии пространственных конструкций, сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и расчета строительных и машиностроительных конструкций, освещает вопросы научно-технического прогресса в строительстве и машиностроении, публикует аналитические обзоры по теме журнала.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19706 от 13 апреля 2005 г. Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 20479.

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

АНДРЕЕВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (МГСУ, Москва),
БАЖЕНОВ В.А., акад. Национальной Академии педагогических наук Украины, д.т.н., профессор (КНУСА, Киев, Украина),
БОНДАРЕНКО В.М., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
ВАНИН В.В., д.т.н., профессор (Киевский политехнический университет, Украина),
ИВАНОВ С.П., д.т.н., профессор (ПГТУ – ВОЛГАТЕХ, Йошкар-Ола),
КАРПЕНКО Н.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
КОЛЧУНОВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (Госуниверситет-УНПК, Орел),
КРИВОШАПКО С.Н., д.т.н., профессор (РУДН, Москва),
ЛЯХОВИЧ Л.С., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ТГАСА, Томск),
ГРУДЕВ И.Д., д.т.н., профессор, почетный член РААСН (ЦНИИПСК, Москва),
ПОТАПОВ В.Д., д.т.н., профессор (МГУПС РФ (МИИТ), Москва),
САНЖАРОВСКИЙ Р.С., д.т.н., проф. (Евразийский Нац. У-т им. Гумилева, Казахстан),
ТРАВУШ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЭНПИ, Москва),
ЯКУПОВ Н.М., чл. корр. РИА, д.т.н., профессор (ИММ КазНЦ РАН, Казань)

РЕДАКЦИЯ:

д.т.н., профессор С.Н. Кривошاپко – *главный редактор*,
д.т.н., профессор В.Н. Иванов – *зам. главного редактора*,
д.т.н., профессор Д.К. Гришин; д.т.н., профессор Е.М. Зверьев;
д.т.н., профессор В.И. Обозов; д.т.н., профессор В.П. Агапов;
И.А. Мамиева – *исполнительный редактор*;
доцент В.А. Романова – *редактор русскоязычного Интернет-сайта журнала*,
Е.А. Гринько – *редактор англоязычного Интернет-сайта журнала*.

Русскоязычный интернет-сайт журнала <http://stroimech-journal.narod.ru>

Англоязычный интернет-сайт журнала <http://smjournal.narod.ru>

Технический секретарь *Е.М. Тутикова*

Компьютерная верстка *Т.И. Карелина*

Почтовый адрес журнала: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, РУДН,
каф. Прочности материалов и конструкций

Тел.: (495) 955-09-78; (495) 955-08-81; Факс: (495) 955-08-81; (495) 952-08-29

E.mail: sn_krivoshapko@mail.ru или i_mamieva@mail.ru

Тираж 400 экз.

Учредитель: Российский университет дружбы народов, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, РУДН

Типография ИПК РУДН, 117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

© Журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», 2014

© А.А. Савчук, фото на 1-ой странице обложки (Москва)

Содержание

№ 6, 2014 год

Наши юбиляры

80 лет профессору ЛЯХОВИЧУ Леониду Семеновичу..... 3

Обзорно-аналитическая информация

Кривошапко С.Н. Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX-го – первой половины XX-го веков..... 4

Леонов А.В. Анализ различий между исторической документацией и фактической конструкцией Шаболовской радиобашни с использованием 3D-модели..... 15

Теория упругости

Калантарлы Н.М. Трещинообразование в круговом диске под действием объемных сил..... 23

Дороган А.С. Применение метода граничных интегральных уравнений теории упругости для моделирования аэроупругости мостовых конструкций..... 30

Ерохин С.В. Модели ползучести и релаксации материалов с использованием производных дробного порядка..... 35

Расчет строительных конструкций

Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма $\sigma - \epsilon$ бетона..... 40

Саламахин П.М., Решетников И.В. Влияние отрицательной температуры среды на напряженное состояние и размеры поперечных сечений дерево-железобетонных балок пролетных строений автодорожных мостов..... 44

Александров А.В., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б. Расчетное обоснование и технические решения по усилению железобетонных конструкций ГЭС (ГАЭС), имеющих трещины различного направления, при действии комплекса нагрузок..... 50

Устойчивость стержней и стержневых систем

Сукач А. А. Влияние различных видов нагрузжений и условий закрепления концов изгибаемого двутавра на местную потерю устойчивости сжатой полки..... 55

Численные методы расчета конструкций

Киселёв А.П., Киселёва Р.З., Николаев А.П. Учет смещения как жесткого целого осесимметрично нагруженной оболочки вращения на основе МКЭ.. 59

Экспериментальные исследования

Харисламова Л.У., Якупов С.Н. Методы оценки прочности биологических мембран..... 65

<i>Румянцева И.А.</i> Экспериментальные исследования работы выштамповок на изгиб.....	71
<i>Гришин Д.К., Жиль-улбе Матье, Гринько Е.А.</i> 55 лет кафедре прочности материалов и конструкций Российского университета дружбы народов..	76

Contents

Our person celebrating his jubilee

<i>80 years of Professor Lyakhovich Leonid Semyonovitch</i>	3
---	---

Review-and-analytical information

<i>Krivoshapko S.N.</i> Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIX th until the first half of the XX th centuries.....	4
<i>Leonov A.V.</i> The analysis of differences between historical design documents and the real structure of the Shabolovka radio tower based on using 3D model...	15

Theory of elasticity

<i>Kalantarly N.M.</i> Cracking in circular disk under the influence of volume forces..	23
<i>Dorogan A.S.</i> The application of a method of boundary integral equations of a theory of elasticity for modeling of aeroelasticity of bridge structures....	30
<i>Erokhin S.V.</i> Models of creep and relaxation with using of fractional derivatives..	35

Analysis of building structures

<i>Bondarenko V.M. and Rimshin V.I.</i> Quasi-linear equations of force resistance and diagram " $\sigma - \varepsilon$ " of concrete.....	40
<i>Salamakhin P.M., Reshetnikov I.V.</i> The influence of negative atmospheric temperatures on the stress state and the size of the cross-sections of composite beams made of wood-and-reinforced concrete in auto road bridges.....	44
<i>Aleksandrov A.V., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B.</i> Estimated rationale and technical solutions for strengthening concrete structures of HPP (PSPP) having cracks of different directions, under the influence of complex loads.....	50

Stability of bars and bar systems

<i>Sukach A.A.</i> Effect of different types of external loads and securing the ends of bend I-beam on the local buckling.....	55
--	----

Numerical methods of analysis of structures

<i>Kiselev A.P., Kiseleva R.Z., Nikolaev A.P.</i> Account of the shift as rigid body of shell of revolution axially symmetric loaded on the base of FEM.....	59
--	----

Experimental researches

<i>Harislamova L.U., Yakupov S.N.</i> Methods for assessing strength of biological membranes.....	65
<i>Rumyanceva I.A.</i> Experimental researches of work of embossments subjected to the bending.....	71
<i>Grishin D.K., Gill-oulbe Mathie, Grin'ko E.A.</i> 55 years of the Department of Strength of Materials and Structures of Peoples' Friendship University of Russia.	76

At old ages, iron was used as reinforced elements in stone laying. But it became as building materials only after appearance of modern metallurgy. Cardinal changing in the development of metal structures appeared at the beginning of the XIXth century when they began to apply cast iron pillars instead stone and brick pillars. In the paper, rigid metal structures are described beginning from the dome of the Isaac Cathedral in St. Petersburg and ending by the most important objects erected before 1967.

KEY WORDS: metal ribbed-and-circular domes, lattice shells, steel reservoir.



АНАЛИЗ РАЗЛИЧИЙ МЕЖДУ ИСТОРИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ И ФАКТИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ШАБОЛОВСКОЙ РАДИОБАШНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛИ

А.В. ЛЕОНОВ, кандидат физико-математических наук

Центр виртуальной истории науки и техники Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук

117861, Москва, Старопанский пер., д. 1/5; E-mail: a.leonov@ihst.ru

Выполненный анализ показал, что фактическая конструкция Шуховской башни на Шаболовке имеет существенные отличия от сохранившихся проектных и рабочих чертежей, а также расчётов в рабочей тетради В.Г. Шухова. В 2011-2013 гг. в Институте истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН был выполнен проект по лазерному сканированию и 3D- моделированию башни. Целью проекта было сохранение информации о геометрии и конструкции башни в цифровой форме, обеспечение доступа к этой информации специалистам и широкой общественности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиобашня на Шаболовке, историческая документация, фактические размеры, трехмерное моделирование башни, лазерное сканирование.

Радиобашня на Шаболовке – символ советского радио- и телевидения, всемирно известный памятник архитектуры русского авангарда [1]. Её также называют Шуховской башней, по имени её создателя – выдающегося русского инженера, члена-корреспондента и почётного члена Академии наук СССР Владимира Григорьевича Шухова (1853-1939). Башня была построена в 1919-1922 годах, трансляция радиопередач началась 19 марта 1922 года. В 1937-1967 годах башня использовалась также для телевидения.

Башня состоит из шести гиперболоидных секций, которые в данной статье нумеруются снизу вверх арабскими цифрами (1-6), и надстройки. Оригинальная надстройка 1922 г. была реконструирована в 1937 г., а в 1991 г. демонтирована и заменена на современную. Общая высота шести гиперболоидных секций согласно обмеру 1947 г. составляла 144,16 м, при замене надстройки в 1991 г. верхняя секция была укорочена на 0,36 м.

Каждая гиперболоидная секция состоит из прямолинейных ног, которые расположены по образующим гиперболоида, и горизонтальных кольцевых ферм, расположенных на стыках секций. Каждая ферма состоит из двух колец (внешнего и внутреннего) и обрешетки между ними. Ноги смежных секций пропущены между кольцами фермы и крепятся к ним и друг к другу через фасонки. Конструкция соединительных узлов различается для разных секций. Кроме того, в каждой секции есть промежуточные кольца жесткости, которые крепятся к ногам изнутри. В четырех нижних секциях по 48 ног, в двух верхних секциях – по 24 ноги. В двух нижних секциях каждая нога составлена из двух швеллеров, расположенных стенками друг к другу, в четырех верхних секциях – из уголков различного профиля.

Капитальный ремонт башни не проводился ни разу за время её существования. В 1937, 1947, 1971-1973, 1991 гг. выполнялись реконструкции башни, в результате которых на ней был установлен ряд дополнительных элементов: технологические платформы на разных уровнях, дополнительные промежуточные кольца жёсткости, грузопассажирский электрический лифт, антенны сотовой связи и др.

Лазерное сканирование и 3D-моделирование башни

В 2011-2013 гг. в Институте истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН был выполнен проект по лазерному сканированию и 3D-моделированию башни [2, 3]. Целью проекта было сохранение информации о геометрии и конструкции башни в цифровой форме, обеспечение доступа к этой информации специалистам и широкой публике.

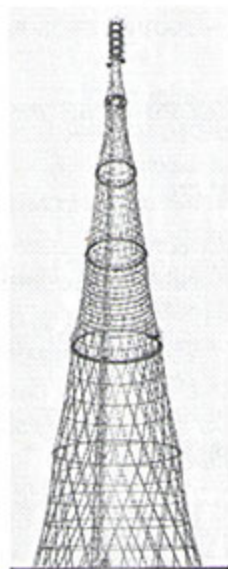


Рис. 1. 3D-модель башни, общий вид

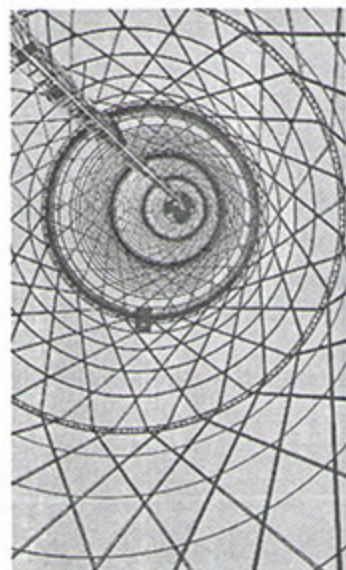


Рис. 2. 3D-модель башни, вид изнутри

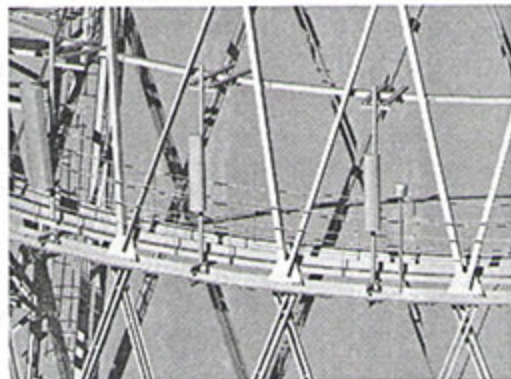


Рис. 3. 3D-модель башни, стык секций

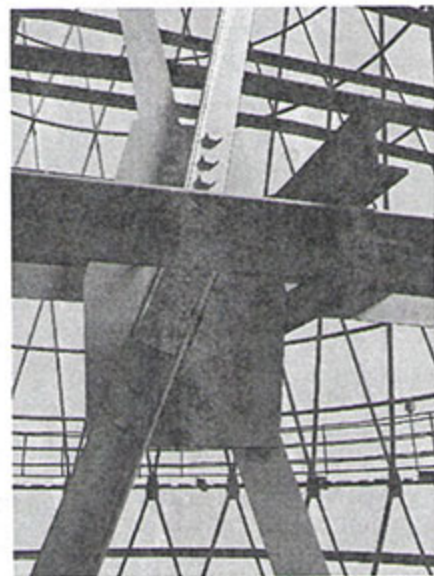


Рис. 4. 3D-модель башни, крупный план

Башня была смоделирована с высокой геометрической точностью и детальностью. Все ноги и кольца смоделированы с использованием профиля (уголка или швеллера) соответствующего поперечного сечения, с учётом индивидуальных деформаций. Точность моделирования ног и колец башни составила около 1 см в локальной системе координат, привязанной к опорной геодезической сети г. Москвы [2]. Также в модели показаны все соединительные узлы между ногами разных секций, ногами и промежуточными кольцами жёсткости, стыками частей ног разного профиля. Для моделирования соединительных узлов использовалась историческая документация 1947 г., любезно предоставленная ЦНИИПСК им. Мельникова [10]. Общий вид модели показан на рис. 1 и 2, степень детализации отражена на рис. 3 и 4.

Также было разработано программное обеспечение для интерактивной визуализации полученных данных, в том числе со свободным доступом через Интернет.

Автономное приложение разработано на основе OpenSceneGraph, рис. 5, и обеспечивает интерактивную визуализацию всего массива полученных данных, включая трёхмерную точечную модель (облако точек лазерного сканирования), рис. 6. Веб-приложение разработано на основе Unity3D и позволяет просматривать модель через веб-браузер, изучать конст-

рукцию башни в разные периоды, выполнять измерение расстояний между элементами модели, рис. 7.

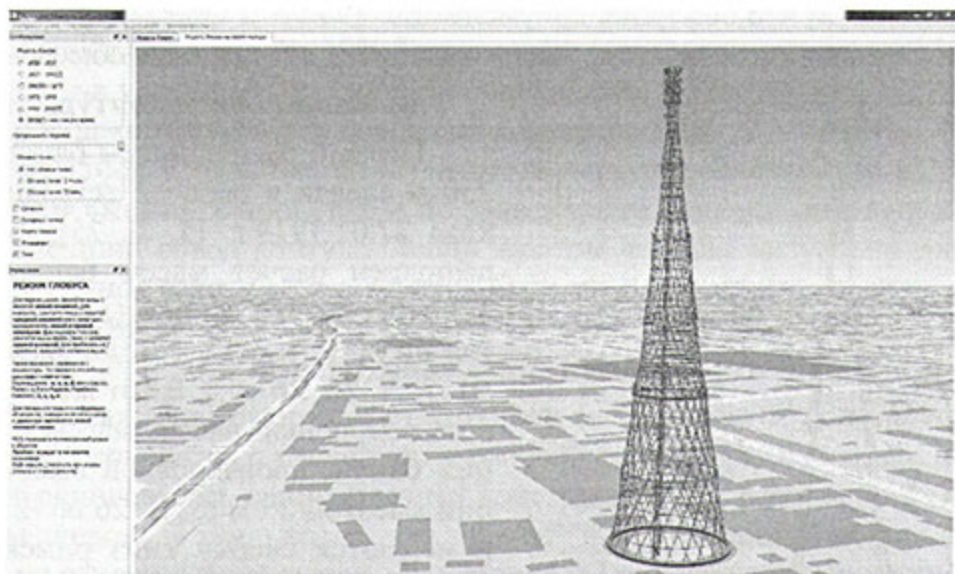


Рис. 5. Программное обеспечение для интерактивной визуализации 3D-моделей на основе OpenSceneGraph (автономное приложение)



Рис. 6. Одновременная визуализация точечной 3D-модели, сечений и полигональной 3D-модели

рабочей тетради В.Г. Шухова за январь-февраль 1919 г. [5, Л. 25-30] и двумя чертежами 1919 г. [6, 7], которые хранятся в Архиве РАН. Сохранившаяся рабочая документация представлена двумя чертежами 1921 г., которые хранятся в РГАНТД [8, 9]. Был выполнен анализ внешнего обвода контура башни, конструкции секций башни и конструкции соединительных узлов (по документации и фактически). Показано, что фактическая конструкция башни имеет существенные отличия от сохранившейся проектной и рабочей документации 1919-1921 гг.

В 1947 г. был проведён подробный обмер башни, его результаты хранятся в архиве ЦНИИПСК им. Мельникова

Анализ исторической документации

В ходе выполнения проекта по моделированию башни был проведён анализ доступной исторической документации по конструкции башни (к которой относится проектная, рабочая и обмерная документация); выявлены различия между исторической документацией и фактической конструкцией башни [3].

Первые результаты исследования этих различий были опубликованы в работе [4]. Сохранившаяся проектная документация представлена расчётами в

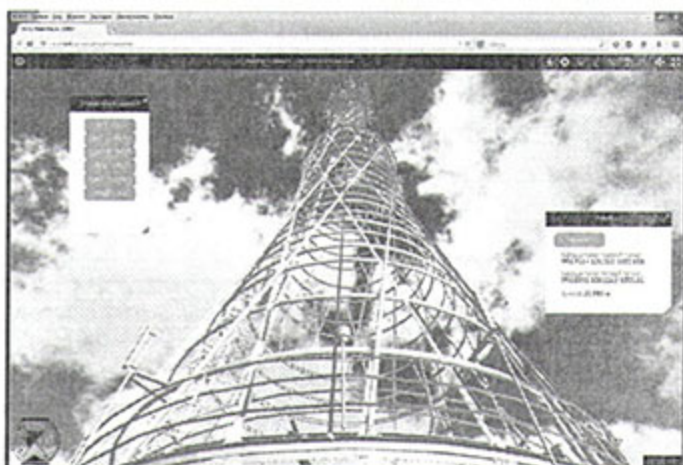


Рис. 7. Программное обеспечение для интерактивной визуализации 3D-моделей на основе Unity3D (веб-приложение)

[10]. В последующих проектах реконструкции башни 1969, 1971, 1991 гг. [11-13] и др. общие схемы башни и её отдельных узлов основаны на обмере 1947 г. Анализ показал, что обмерная документация 1947 г. и более поздняя соответствует фактической конструкции башни на момент выполнения обмеров.

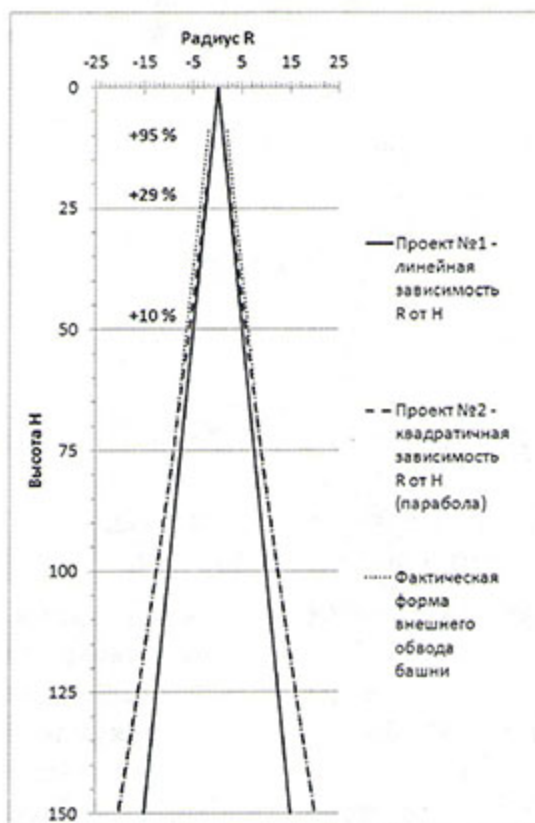


Рис. 8. Внешний обвод башни: по проектам и фактический

башен высотой 75 м, 100 м, 150 м [5, Л. 29 об.].

28.02.1919 г. в тетради выполнен расчёт башни высотой 150 м из шести секций по 25 м. Для каждой секции указан радиус опорного кольца, количество и конструкция ног [5, Л. 30].

На отдельной странице поясняется способ расчёта радиуса опорных колец, включающий линейную и квадратичную компоненты зависимости от номера секции: «Внешний обвод контура башни. Основной размер. Конус с переменным r набегающим постоянное приращение; в нашем случае $r, 2r, 3r, 4r...$ или вообще $r, r+f, r+2f, r+3f$ и т.д. и переменное приращение с непрерывным увеличением уклона от вертикали α . т.е. приращение уклона выражается формулой $\alpha \cdot n \cdot (n-1)/2$, где n номер этажа башни считая его от верха. Таким образом получается следующий ряд: 1) f , 2) $2f+\alpha$, 3) $3f+3\alpha$, 4) $4f+6\alpha$, 5) $5f+10\alpha$, 6) $6f+15\alpha$, 7) $7f+21\alpha$, 8) $8f+28\alpha$ и т.д. причём задаются размеры r, f и α . В данном случае $r = 2,75$ м, $f = 2,75$ м = r , $\alpha = 0,25$ м и потому радиусы получаются 2.75, 5.75, 9, 12.5, 16.25, 20.25 (уклоны $3 \rightarrow 3.25 \rightarrow 3.5 \rightarrow 3,75 \rightarrow 4$)». [5, Л. 30 об.].

При высоте секции 25 м расстояние от верха башни до опорного кольца n -й секции выражается формулой $H = 25 \cdot n$. Радиус опорного кольца n -й секции, согласно предложенному выше способу расчёта, выражается формулой $R = 2,75 \cdot n + 0,25 \cdot n \cdot (n - 1)/2$. Выразив n через H в первой формуле и подставив во вторую, получаем зависимость R от H : $R = H \cdot H/5000 + H \cdot 21/200$. Таким образом, внешний обвод контура 150-метровой башни, предложенный в рабочей тетради В.Г. Шухова 28.02.1919 г., является параболой.

Внешний обвод контура башни

Первый расчёт массы башни высотой 250 м сделан в рабочей тетради В.Г. Шухова 27.01.1919 г. [5, Л. 25]. 1.02.1919 г. выполнен расчёт массы башни высотой 320 м из девяти секций (две секции высотой по 20 м, и семь секций высотой по 40 м) [5, Л. 26, 26 об.]. В тот же день начинается подробный расчёт массы и конструкции башни произвольной высоты из секций высотой 25 м [5, Л. 26 об.-28]. Секции нумеруются сверху вниз римскими цифрами. Расчёт прерван на XV секции, таким образом, полностью рассчитана башня высотой 350 м (14 секций по 25 м). Все ноги предполагаются из сдвоенного швеллера (от №10 для I секции до №18 для XIV секции). Диаметр опорных колец растёт линейно: от 5 м для I секции до 70 м для XIV секции. 12.02.1919 г. продолжается расчёт башни высотой 350 м из 14 секций: для каждой секции указано количество ног, их конструкция и общая масса [5, Л. 28 об., 29]. Выполнены краткие расчёты массы

Фактические радиусы опорных колец Шуховской башни на Шаболовке совпадают с расчётом в тетради для четырёх нижних секций. В верхней части башни внешний контур обвода расходится с расчётным: для кольца на уровне 100 м фактический радиус на 10% больше, чем расчётный, на уровне 125 м – на 29% больше, на уровне 141 м – на 95% больше, рис. 8. На чертеже 1919 года [6] внешний обвод контура башни совпадает с фактическим.

Чертеж 350-метровой башни [7] не соответствует расчётам в тетради как по количеству и высоте секций, так и по зависимости радиуса опорных колец от высоты. Внешний обвод контура башни на этом чертеже визуально соответствует квадратичной зависимости, которая была предложена в тетради только для 150-метровой башни.

Конструкция секций башни

Фактическая конструкция секций башни (количество и конструкция ног) существенно расходится с расчётами в рабочей тетради [5, Л. 30], см. табл. По проекту предполагалась единообразная конструкция ног всех секций (из сдвоенных швеллеров), в реальности, для четырёх верхних секций использовались уголки, а не сдвоенные швеллера. На чертеже [6] определить количество и конструкцию ног затруднительно; можно утверждать лишь то, что ноги во всех секциях показаны сдвоенными линиями, что соответствует проекту в тетради. Количество промежуточных колец жёсткости на чертеже [6] в четырёх верхних секциях отличается от фактического, см. табл.

Таблица. Конструкция секций башни: по проектам и фактически

Номер секции	Конструкция, по тетради (1919 г.)	Конструкция, по чертежу (1919 г.)	Конструкция, фактическая (1922 г.)
6 (I сверху)	ноги: 12 сдвоенных швеллеров №10; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 8 шт.	ноги: 24 уголка 90 мм (внизу) и 80 мм (вверху); кольца: 9 шт.
5 (II сверху)	ноги: 16 сдвоенных швеллеров №12; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 8 шт.	ноги: 24 уголка 90 мм; кольца: 9 шт.
4 (III сверху)	ноги: 24 сдвоенных швеллера №12; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 6 шт.	ноги: 48 уголков 90 мм; кольца: 9 шт.
3 (IV сверху)	ноги: 24 сдвоенных швеллера №14; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 8 шт.	ноги: 48 уголков 120 мм (внизу) и 100 мм (вверху); кольца: 7 шт.
2 (V сверху)	ноги: 30 сдвоенных швеллеров №14 или 36 сдвоенных швеллеров №12; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 4 шт.	ноги: 48 сдвоенных швеллеров №14; кольца: 4 шт.
1 (VI сверху)	ноги: 36 сдвоенных швеллеров №14; кольца: не указано	ноги: сдвоенные линии; кольца: 4 шт.	ноги: 48 сдвоенных швеллеров №14; кольца: 4 шт.

Конструкция соединительных узлов

Поскольку проект, представленный в тетради В.Г. Шухова, предполагал единообразную конструкцию ног всех секций (из сдвоенных швеллеров), по-видимому, предполагалась и единообразная конструкция стыков ног разных

секций, что нашло отражение на чертеже [6]. В реальности, фактическая конструкция узла стыка ног разных секций оказалась индивидуальна для каждой пары секций.

Схемы узлов стыка ног, приведённые на чертеже 1919 г. [6], не соответствуют фактической конструкции. В частности, на обеих схемах показан стык ног из сдвоенного швеллера №10 (в реальности таких ног на башне нет); на схеме «Соединение ног двух секций» фасонка расположена в радиальной плоскости (тогда как в реальности все фасонки на стыках ног расположены перпендикулярно радиальной плоскости и имеют другую форму); фактический способ крепления ног и фасонки к кольцевой ферме отличается от изображённого на схемах. Схема «Верхнее кольцо II секции» отдалённо напоминает фактическую конструкцию узла соединения ног первой и второй снизу секций, но форма и размер фасонки и расположение заклёпок на этой схеме заметно отличаются от фактического. Таким образом, фактическая конструкция узлов соединения ног разных секций не имеет практически ничего общего со схемами на чертеже [6]. К сожалению, во многих изданиях, посвящённых Шаболовской радиобашне, схема «Соединение ног двух секций» 1919 г. приводится как схема фактической конструкции. В частности, она приведена в книге ученика и биографа В.Г. Шухова Г.М. Ковельмана 1961 г. [14, С. 157] и в книге «Шухов В.Г. (1853-1939). Искусство конструкции» 1995 г. [1, С. 92, 94], без каких-либо оговорок о том, что в реальности конструкция соединительных узлов совершенно другая.

Рабочая схема узла соединения ног 2 и 3 секции 1921 г., хранящаяся в архиве РГАНТД [9], внешне похожа на фактическую конструкцию этого узла, однако при анализе обнаруживается ряд расхождений. Уголки внутреннего и наружного колец на схеме показаны обушками вверх (а швеллера обрешетки лежат на них сверху, полками вверх); фактически уголки внутреннего и наружного колец установлены обушками вниз (а швеллера обрешетки приклепаны к ним снизу, полками вниз). Внутреннее кольцо на схеме показано из равнополочного уголка 100x100x10 мм, фактически — из неравнополочного уголка 150x100x12 мм. Наружное кольцо на схеме показано из уголка 100x100x16 мм, фактически — из уголка 100x100x12 мм. Длина коротышей из швеллера №14 между фасонкой и опорными кольцами на схеме указана 356 мм, фактически — 240 мм; на схеме коротыши расположены полками вниз, фактически — полками вверх.

Отметим, что стык между 2 и 3 секциями монтировался дважды. 29 июня 1921 года при подъёме четвёртой секции произошла авария — уже смонтированная к тому моменту третья секция сломалась, четвёртая упала и повредила вторую и третью. После возобновления работ, первые две секции были отремонтированы, а третья — полностью разобрана и затем собрана заново. Повторный подъём и монтаж третьей секции был выполнен в конце октября 1921 г. Схема [9] датирована 9 августа 1921 г. — всего через десять дней после 30 июля, когда В.Г. Шухов сделал знаменитую запись в своём дневнике: «Приговор Шухову — условный расстрел» [15]. Неизвестно, отражает ли эта схема реальную конструкцию стыка 2 и 3 секций в первом варианте его исполнения, или является проектом для повторного монтажа стыка — так или иначе, фактическая конструкция имеет существенные отличия.

Обмерная документация

Обмерная документация 1947 г. [10] соответствует фактической конструкции башни. Однако необходимо отметить, что обмерная документация создавалась с целью расчёта несущей способности конструкции, и не отражает целый ряд деталей и элементов оригинальной конструкции, не имеющих отношения к её несущей способности. В частности, в ней не указано расположение стыков

составных частей ног и колец башни, монтажные отметки и отверстия, клейма на металле. Кроме того, доступная обмерная документация и созданные на её основе проекты реконструкции башни [10-13] не отражают целый ряд элементов, установленных на башне в 1973 г. и позже. В частности, нигде в доступной документации не отражены усиливающие накладки в нижней части 5 секции и на некоторых местах отбора проб; дополнительные кольца жёсткости и кольцевая вертикальная ферма в верхней части 5 секции, установленные в 1973 г.; технологические платформы на уровнях 50, 75, 100, 138 м.

Заключение

Выполненный анализ показал, что фактическая конструкция Шуховской башни на Шаболовке имеет существенные отличия от сохранившихся проектных и рабочих чертежей, а также расчётов в рабочей тетради В.Г.Шухова. 3D-моделирование конструкции позволило эффективно обнаружить и проанализировать расхождение исторической документации с фактической конструкцией, выявить ошибки в описании памятника техники.

Л и т е р а т у р а

1. Шухов В.Г. (1853-1939). Искусство конструкции: Пер. с нем. / Под. ред. Р. Грефе, М. Гаппоева, О. Перчи. М.: Мир, 1995. 192 с., ил.
2. Аникушкин М.Н., Леонов А.В. 3D-моделирование Шуховской башни на Шаболовке на основе лазерного сканирования // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №4. – С. 57-59.
3. Леонов А. В., Батурич Ю. М., Петропавловская И. А. О необходимости 3D документирования памятников техники: пример Шуховской башни на Шаболовке // Вопросы истории естествознания и техники. – 2013. – № 3. – С. 156-170.
4. Леонов А. В. Анализ проектной документации Шуховской башни на Шаболовке и её сравнение с современной 3D моделью // Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2013). Т. 2. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – С. 390-394.
5. Рабочая тетрадь В.Г. Шухова (записи с 22.03.1918 г. по 10.10.1922 г.) // Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 61.
6. «Шаболовская радио-башня системы инж. Шухова. Высота 150 м. Проект 1919 г.»: проект башни высотой 150 м из шести секций, со схемами нескольких соединительных узлов в сборе. 1919 г. // Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 85. Л. 1.
7. Проект башни высотой 350 м из девяти секций. 1919 г. // Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 84. Л. 2.
8. «Сетчатая башня системы инженера В. Г. Шухова. Высота башни - 150 м для беспроводного телеграфа. Фундамент»: схема фундамента. 1921 г. // РГАНТД. Ф. 166. Оп. 1. Д. 36. Л. 1.
9. «Верхнее кольцо 2й секции радио-башни»: схема узла стыка ног 2 и 3 секций. 1921 г. // РГАНТД. Ф. 166. Оп. 1. Д. 36. Л. 2.
10. Обследование металлоконструкций башни системы Шухова Московского телевизионного центра. 1947 г. // Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр 281.
11. Заказ № 4138. Реконструкция оконечной аппаратной РРЛ. МТЦ (Шаболовка). ГСПИ Минсвязи СССР. Москва. 1969 г. // Архив ГСПИ РТВ.
12. Определение несущей способности металлоконструкций телебашни системы Шухова и составление заключения о возможности её дальнейшей эксплуатации. 1971 г. // Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр ОРИС-569.
13. Металлоконструкции надстройки башни Шухова для крепления антенн УКВ-ЧМ. 1991 г. // Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр 20-Ф 5720-1-КМ.
14. Ковельман Г.М. Творчество почетного академика инженера Владимира Григорьевича Шухова. – М.: Госстройиздат, 1961. – 363 с., ил.

15. Шухова Е.М. Труды и дни инженера В.Г.Шухова // Наше наследие. – 2004. – № 70. – С. 82-98.

References

1. Shukhov V.G. (1853-1939). The Art of Structure. (1995). Trans. from German. Edited by R. Graefe, M. Gappov, O. Pertschi. Moscow: "Mir". 192 p.
2. Anikushkin M.N., Leonov A.V. (2013). 3D modeling of Shukhov tower on Shabolovka based on laser scanning // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. №4. P. 57-59.
3. Leonov A.V., Baturin Yu.M., Petropavlovskaya I.A. (2013). On the need for 3D documentation of the technical heritage: case study of Shukhov tower on Shabolovka // Voprosy istorii yestestvoznaniya i tekhniki. № 3. P. 156-170.
4. Leonov A.V. (2013). Analysis of project documentation of Shukhov tower on Shabolovka and its comparison with the modern 3D model // Institut istorii yestestvoznaniya i tekhniki im. S.I. Vavilova RAN. Godichnaya nauchnaya konferentsiya (2013). T. 2. Moscow: LENAND. P. 390-394.
5. Workbook of V.G. Shukhov (notes from March 22, 1918 to Oct. 10, 1922). Arkhiv RAN. F. 1508. Op. 1. D. 61.
6. Shabolovskaya radio-tower of the engineer Shukhov's system. Height 150 m. Project. 1919. Arkhiv RAN. F. 1508. Op. 1. D. 85. L. 1.
7. Project of the tower of the height of 350 m constructed of 9 sections. 1919. Arkhiv RAN. F. 1508. Op. 1. D. 84. L. 2.
8. Lattice tower of the engineer V.G. Shukhov's system. Height of the tower is 150 m for wireless telegraphy. Basement. 1921. RGANTD. F. 166. Op. 1. D. 36. L. 1.
9. The upper ring of the second section of the radio tower. 1921. RGANTD. F. 166. Op. 1. D. 36. L. 2.
10. The Inspection of Metal Structures of the Tower of the Shukhov's System of the Moscow TV Center. 1947. Arkhiv TzNIIPSK im. Mel'nikova. Shifr 281.
11. Order № 4138. Reconstruction of the terminal equipment of the radio relay link. Moscow TV Center (Shabolovka). GSPI Minsvyazi SSSR. Moscow. 1969. Arkhiv GSPI RTV.
12. Evaluation of bearing capacity of metal structures of TV tower of Shukhov's system and drawing conclusions about the possibility of its further exploitation. 1971. Arkhiv TzNIIPSK im. Mel'nikova. Shifr ORIS-569.
13. Metal structures of the superstructure of the Shukhov's tower for fastening FM antennas. 1991. Arkhiv TzNIIPSK im. Mel'nikova. Shifr 20-F 5720-1-KM.
14. Kovel'man G.M. (1961). Oeuvre of the honorary academician engineer Vladimir Grigoryevich Shukhov. Moscow, Gosstroyizdat, 363 p.
15. Shukhova E.M. (2004). Works and days of engineer V.G. Shukhov. Nashe nasledie. № 70. P. 82-98.

THE ANALYSIS OF DIFFERENCES BETWEEN HISTORICAL DESIGN DOCUMENTS AND THE REAL STRUCTURE OF THE SHABOLOVKA RADIO TOWER BASED ON USING 3D MODEL

Leonov A.V.

*The Center for Virtual History of Science and Technology of the S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

The analysis made in the paper has shown that the real structure of the Shukhov's tower located in Shabolovka Street has considerable differences in comparison with survived project and working drawings as well as with calculations performed in the workbook of Shukhov. In the S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, the project devoted to laser scanning and 3D modeling of the tower was fulfilled in 2011-2013. The conservation of information on geometry and real structure of the tower and guarantee of access to this information for specialists is the aim of this paper.

KEY WORDS: radio tower in Shabolovka Street, historical documents, real dimensions, tree-dimensional modeling of the tower, laser scanning.