

А. В. ЛЕОНОВ, Ю. М. БАТУРИН, И. А. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ

О НЕОБХОДИМОСТИ 3D-ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ПАМЯТНИКОВ ТЕХНИКИ: ПРИМЕР ШУХОВСКОЙ БАШНИ НА ШАБОЛОВКЕ

В статье рассмотрен пример 3D-документирования крупного инженерно-технического сооружения – Шуховской башни на Шаболовке, которая в настоящее время находится под угрозой разрушения. Проект по лазерному сканированию и 3D-моделированию этого памятника техники и архитектуры был выполнен Центром виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН в 2011–2012 гг. Показано, что современные технологии лазерного сканирования и 3D-моделирования позволяют с высокой пространственной точностью зафиксировать форму (геометрию) сложной технической конструкции. Вместе с традиционной документацией (проектной, рабочей, обмерной), которая содержит информацию о внутреннем устройстве узлов и элементов, результаты лазерного сканирования дают возможность создать точную и детальную 3D-модель технического объекта любого масштаба. Для историков науки и техники методы 3D-документирования представляют несомненный интерес прежде всего как новый способ фиксации информации о памятниках техники.

Ключевые слова: В. Г. Шухов, Шуховская башня на Шаболовке, лазерное сканирование, 3D-моделирование, 3D-документ, виртуальное наследие.

Одна из задач истории науки и техники – сбор информации об исследуемых объектах с ее последующим документированием. Важную роль здесь играет фиксация структуры, формы и внешнего вида объекта, а также его расположения (ориентации) относительно других объектов. Формы фиксации могут быть различными, начиная с рисунков экспедиционных художников¹, проходивших специальное обучение, карт-чертежей², географических карт, чертежей и схем и вплоть до фото- и кино/видеосъемок, в том числе стереоскопических, и трехмерных (3D) моделей объектов.

Фото-, кино- и фотодокументы являются общепризнанными формами научно-технической документации наряду с традиционными «бумажными» документами. По мере развития компьютерных технологий все большее распространение получают электронные документы – тексты, изображения, аудио- и видеозаписи, сохраненные в виде цифровых электронных файлов.

Развитие технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, томографии, а также 3D-моделирования сегодня позволяет широко применять новый способ фиксации информации об объектах – создание электронной (цифро-

¹ М. В. Ломоносов и академические экспедиции XVIII века / Авт.-сост. О. А. Александровская, В. А. Широкова, О. С. Романова, Н. А. Озерова. М., 2011.

² Хорографическая чертежная книга Сибири С. У. Ремезова. Тобольск, 2011.

вой, виртуальной) 3D-модели объекта. Цифровая 3D-модель может содержать информацию о геометрии (топологии) и пространственной ориентации объекта, его внешнем виде, внутренней структуре (элементах, связях), особенностях материалов, динамике во времени (в том числе, в обращенном времени), испытываемых нагрузках и получаемых повреждениях.

Важно подчеркнуть, что ни один из перечисленных способов фиксации информации об объектах не отменяет предыдущие, а дополняет их. Каждый из них имеет свои преимущества перед другими, но также и свои недостатки. Поэтому на практике необходимо применять все доступные способы закрепления информации об объекте.

Широкое использование 3D-моделей и основанных на них информационных систем привело к появлению понятия 3D-документа, которое употребляется в научной литературе по меньшей мере с 2007 г.³ Одной из сфер применения 3D-документов является формирование виртуального наследия (англ. *virtual heritage*): цифровых копий (моделей) рукотворных и природных объектов, представляющих общественную ценность – от памятников культуры и природы до любых иных видов национального или мирового достояния.

Для историков науки и техники методы 3D-документирования представляют несомненный интерес прежде всего как способ фиксации информации о памятниках техники. В первую очередь это касается крупных технических объектов (башен, мостов, туннелей, гидротехнических и фортификационных сооружений, машин и механизмов большого размера), музеефикация или консервация которых представляет наибольшую сложность.

В данной статье рассмотрен пример 3D-документирования крупного инженерно-технического сооружения – Шуховской башни на Шаболовке, которая в настоящее время находится под угрозой разрушения⁴. Проект по лазерному сканированию и 3D-моделированию этого памятника техники и архитектуры был выполнен Центром виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН в 2011–2012 гг.⁵

Что такое 3D-документ

С технической точки зрения документ – это информация, зафиксированная на материальном носителе для ее длительного хранения и использования. Исторически способы закрепления информации на носителе и сами носители менялись, развивались, но вплоть до XIX в. сводились к созданию текстов

³ *Fellner, D. W., Saupe, D., Krottmaier, H.* Guest Editors' Introduction: 3D-documents // IEEE Computer Graphics and Applications. 2007. Vol. 27. No. 4. P. 20–21.

⁴ *Гранев В. В., Мамин А. Н., Кодыш Э. Н., Кузнеценко С. А., Ершов М. Н.* Техническое состояние несущих конструкций радиобашни В. Г. Шухова // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 90–92.

⁵ *Аникушкин М. Н., Иванов А. В., Леонов А. В.* О первых результатах лазерного сканирования и 3D-моделирования Шуховской башни на Шаболовке // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН, 2012. М., 2012. Т. 2. С. 838–841; *Аникушкин М. Н., Леонов А. В.* 3D-моделирование Шуховской башни на Шаболовке на основе лазерного сканирования // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 4. С. 56–58.

и рисунков. Принципиальный шаг вперед был сделан с изобретением фотографии, которая позволила сохранять изображение, полученное оптической системой, и фонографа, который позволил фиксировать звук. Дальнейшее развитие техники в этом направлении привело к появлению киносъемки, которая, по сути, представляет собой динамическую фотографию с синхронным звуком. Соответственно, возникли понятия фото-, фонокинодокументов.

Современные технологии 3D-моделирования позволяют сохранить пространственную информацию о геометрии и структуре объекта в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. В этом состоит их качественное отличие от рисования, фото- и киносъемки, которые сохраняют двумерные изображения объекта (точнее, проекции трехмерных объектов на двумерную поверхность, например, плоскость). Поэтому информация, зафиксированная в виде 3D-модели, может рассматриваться как новый тип научно-технической документации – 3D-документ⁶.

Виртуальная 3D-модель объекта может быть связана посредством взаимных ссылок с другими электронными документами (текстами, изображениями, аудио- и видеофайлами, другими 3D-моделями), сохраненными в базах данных или файловых системах, в том числе на удаленных серверах, доступных через Интернет. 3D-документом часто называют не только саму 3D-модель объекта, но и весь комплекс связанных с ней данных.

Таким образом, с технической точки зрения 3D-документ – это особым образом организованная информация, предназначенная для представления пользователю трехмерного (пространственного) визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также разнообразной дополнительной информации, непосредственно связанной с этим визуальным образом.

Формат 3D-документа позволяет запоминать и сохранять намного более полную информацию о геометрии, структуре и внешнем виде объекта, чем набор чертежей или фотокинодокументов. Более того, 3D-документ позволяет пользователю самостоятельно «исследовать» объект: рассматривать 3D-модель в разных ракурсах, менять параметры отображения, изучать связанную с визуальным образом дополнительную информацию.

3D-документирование является сегодня одним из основных методов (наряду с фото- и видеодокументированием) создания виртуального наследия: цифровых копий (моделей) выдающихся рукотворных и природных объектов. 3D-моделирование позволяет точно воспроизводить, а иногда и воссоздавать утраченные объекты и сохранять их для последующих поколений, обеспечивать широкий доступ к информации о них.

ЮНЕСКО выделяет две категории всемирного наследия (*world heritage*): наследие культурное (*cultural heritage*) и природное (*natural heritage*), к которым объектам приложимы обе категории. Такое же деление применимо и к виртуальному наследию. Значительную его часть составляют памятники архитектуры, которые часто являются также памятниками техники. Например,

⁶ Леонов А. В., Батуринов Ю. М. 3D-документ – новый тип научно-технической документации // Вестник архивиста. 2013. № 2. С. 56–58.

Эйфелева башня в Париже входит в список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО в составе комплекса объектов «Набережная Сены»⁷.

Формирование виртуального наследия активно развивается в мире. Регулярно проводятся научные конференции, посвященные этой тематике⁸, публикуются статьи в ведущих научных журналах⁹. В фокусе внимания исследователей находится применение современных технологий для 3D-моделирования различных объектов, анализ и сравнение их эффективности, применение созданных 3D-моделей для научных задач (численного моделирования, оценки состояния объектов), создание информационных систем на основе 3D-документов.

Проект по 3D-моделированию Шуховской башни на Шаболовке, представленный в данной статье, является не только примером 3D-документирования памятника техники, но и демонстрацией возможностей создания виртуально-го наследия в области истории техники.

История документирования Шуховской башни на Шаболовке

Радиобашня на Шаболовке, построенная в 1919–1922 гг. – всемирно известный памятник архитектуры русского авангарда¹⁰. Сегодня ее чаще называют Шуховской башней по имени ее создателя – выдающегося русского инженера В. Г. Шухова (1853–1939).

Башня состоит из шести гиперболоидных секций¹¹ общей высотой 144,16 м, которые в данной статье нумеруются снизу вверх, и надстройки (антенной секции). Оригинальная надстройка 1922 г. была реконструирована в 1937 г., а в 1991 г. демонтирована и заменена на современную.

Каждая гиперболоидная секция состоит из прямолинейных ног¹², 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 фансонки. Конструкция соединительных узлов различается для разных секций. Кроме того, в каждой секции есть промежуточные кольца жесткости, которые крепятся к ногам изнутри.

⁷ UNESCO World Heritage List: “Paris, Banks of the Seine”: <http://whc.unesco.org/en/list/600>

⁸ *The International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST), 3D-Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH)* и др.

⁹ *Journal of Cultural Heritage, Virtual Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, The Photogrammetric Record, IEEE Multimedia, Journal on Computing and Cultural Heritage, Science and Technology for Cultural Heritage, Applied Geomatics, Remote Sensing* и др.

¹⁰ *Петропавловская И. А. Башня радиостанции на Шаболовке // В. Г. Шухов (1853–1939). Искусство конструкции / Пер. с нем. М., 1994. С. 92–103.*

¹¹ В литературе встречаются также термины «этаж» или «ярус».

¹² Действующие строительные нормативы не регламентируют название таких конструктивных элементов. В. Г. Шухов использовал термин «ноги», и мы придерживаемся этого именованья. В литературе встречаются также термины «(прямолинейные) стержни», «(наклонные) стойки», «опоры», «образующие».

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.

Проектная и рабочая документация по башне практически не сохранилась. В Архиве РАН хранится единственный чертеж 1919 г.: проект башни высотой 150 м со схемами нескольких соединительных узлов в сборе¹³. Также сохранился расчет башни высотой 150 м из шести секций, выполненный Шуховым в своей рабочей тетради 28 февраля 1919 г.¹⁴

Расчет в тетради не соответствует фактической конструкции башни. В частности, отличаются диаметры двух верхних опорных колец, число ног во всех секциях, конструкция ног четырех верхних секций. В расчете ноги всех секций предполагалось выполнить из сдвоенных швеллеров, тогда как фактически ноги четырех верхних секций выполнены из уголка.

Чертеж 1919 г. также имеет заметные отличия от фактической конструкции. Количество промежуточных колец жесткости в четырех верхних секциях по проекту – 8, 6, 8, 8 шт., фактически – 7, 9, 9, 9 шт. Схемы «Соединение ног двух секций» и «Верхнее кольцо II-й секции» не соответствуют фактически реализованной конструкции узлов соединения ног. На башне нет ног из сдвоенного швеллера № 10, нет фасонки такой формы, по-другому выполнено примыкание к кольцам фермы. Тем не менее эти проектные схемы представлены во многих последующих изданиях как чертежи реальной конструкции соединительных узлов. Например, схема «Соединение ног двух секций» приведена в книге ученика и биографа Шухова Г. М. Ковельмана¹⁵.

В Российском государственном архиве научно-технической документации (РГАНТД) хранятся два рабочих чертежа 1921 г.: схема фундамента и схема узла соединения ног второй и третьей секций¹⁶. Схема узла соединения ног отличается от фактически реализованной конструкции. Уголки внутреннего и наружного колец горизонтальной кольцевой фермы на схеме обращены полками друг к другу и вверх (а швеллеры обрешетки фермы лежат на них сверху, полками вверх); фактически уголки колец установлены полками друг к другу и вниз (а швеллеры обрешетки приклепаны к ним снизу, полками вниз). На схеме внутреннее кольцо выполнено из равнополочного уголка $100 \times 100 \times 10$ мм, фактически – из неравнополочного уголка $150 \times 100 \times 12$ мм. Наружное кольцо на схеме выполнено из уголка $100 \times 100 \times 16$ мм, фактически – из уголка $100 \times 100 \times 12$ мм. Длина коротышей из швеллера № 14 между фасонкой и кольцами фермы, указанных на схеме, – 356 мм, фактически – 240 мм; на схеме коротыши расположены полками вниз, фактически – полками вверх.

¹³ Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 85. Л. 1.

¹⁴ Там же. Д. 61. Л. 30.

¹⁵ Ковельман Г. М. Творчество почетного академика инженера Владимира Григорьевича Шухова. М., 1961. С. 157.

¹⁶ Российский государственный архив научно-технической документации (РГАНТД). Ф. 166. Оп. 1. Д. 36. Л. 1–2.

В 1937 г. на башне была установлена антенна телевизионного центра. Документация по этим работам не сохранилась. Составить представление о них можно по описанию 1947 г., приведенному ниже.

В 1947 г. Центральной научно-исследовательской лабораторией стальных сооружений (ЦНИЛСС) Всесоюзного государственного треста «Проектстальконструкция» было выполнено подробное обследование металлоконструкций башни, обмерочные работы и произведен проверочный расчет с целью

установить возможность увеличения нагрузок от вновь устанавливаемых антенн (турникетной антенны на отметке 148,34 м высотой 9,94 м и антенны 2-ой программы на отметке 124,46 м высотой 17,3 м) и подводимых к ним двух фидеров длиной 140 м каждый¹⁷.

Документация 1947 г. содержит общую схему башни, рисунки с развертками конструкции гиперболоидных секций (без соблюдения пропорций), схемы всех соединительных узлов. Отметим, что на развертках не указано расположение стыков прокатных профилей на ногах и кольцах башни, так как оно не влияет на несущую способность. Схемы выполнены очень тщательно, наш анализ выявил в них лишь три незначительные ошибки¹⁸. Во всех последующих проектах схемы башни основаны на схемах 1947 г.

В пояснительной записке к документации 1947 г. отмечается:

Техническая документация (технический проект, рабочие чертежи и расчеты) по башне не сохранились. В 1937 году для установки антенны телевизионного центра и подводки фидера по высоте башни до вышки была установлена металлическая двухстенчатая ферма и выполнены три площадки (на отметке 141,768; 144,3 и 148,378 м)¹⁹. На все металлоконструкции, выполненные по реконструкции, имеются рабочие чертежи. В связи с указанной реконструкцией в 1937 году был произведен проверочный расчет основного каркаса башни²⁰.

Однако уже в 1971 г. документация 1937 г. считалась утерянной.

¹⁷ Обследование металлоконструкций башни системы Шухова Московского телевизионного центра. 1947 г. // Архив ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова. Шифр 281. Чертеж 281-3.

¹⁸ На общей схеме конструкции башни (там же, чертеж 281-8) уголки опорного кольца между второй и третьей секциями на схеме обращены полками вверх, фактически – полками вниз (при этом на чертежах 281-91...100 – правильно). На схеме опорного кольца между пятой и шестой секциями (чертежи 281-, 180...184) внутреннее кольцо выполнено из швеллера № 12, фактически – из швеллера № 14 (при этом на чертежах 281-185...189 – правильно). Четвертое промежуточное кольцо третьей секции на схемах выполнено из равнополочного уголка 150 × 150 (чертежи 281-8, 281-106...115), фактически – из неравнополочного уголка 150 × 100.

¹⁹ Там же отмечается, что одна площадка расположена на верхнем промежуточном кольце шестой секции (отметка 141,768), а две – на надстройке (на отметках 144,3 и 148,378). Площадка на отметке 141,768 служит для выхода при подъеме, а площадки на отметках 144,3 и 148,378 – для установки антенны и фидера. Траверсы надстройки 1922 г. были, по-видимому, обрезаны именно в ходе реконструкции 1937 г.

²⁰ Там же, чертеж 281-3.

По-видимому, в связи с установкой антенны второй программы по проекту 1947 г. на башне была построена технологическая площадка на отметке 124,46 м. Ее схема есть в обмерной документации 1969 г.

В 1969 г. Государственным союзным проектным институтом (ГСПИ) Министерства связи СССР²¹ было выполнено обследование состояния металлоконструкций башни и подготовлен проект ее реконструкции для обеспечения связи с новым телекомплексом в Останкино по радиорелейной линии (РРЛ)²². Проект предполагал установку площадок на отметках 50,07 м и 99,72 м, усиление опорных колец на отметках 99,72 м и 124,46 м, установку дополнительных колец жесткости и других элементов.

В пояснительной записке к документации 1969 г. отмечается: «В расчете использованы геометрические характеристики и размеры элементов, принятые по расчету башни Шухова по проекту треста «ПСК» 1947 г.»²³. В кальках к тому № I-КР «Рабочие чертежи площадок, усилений и труб крепления волноводов» схема башни повторяет схему 1947 г., при этом исправлена опечатка в описании опорного кольца между второй и третьей секциями, но допущена новая ошибка в случае опорного кольца между пятой и шестой секциями (на внешнем кольце указан швеллер № 12)²⁴. В кальках к тому № III-КР «Статический расчет башни Шухова» схема ствола башни повторяет схему 1947 г., включая опечатку в описании конструкции опорного кольца на стыке второй и третьей секций, и с новой ошибкой в описании конструкции опорного кольца на стыке пятой и шестой секций (наружное кольцо показано составленным из двух швеллеров № 14)²⁵.

Отметим, что в документации 1969 г. представлен обмерный чертеж площадки на отметке 124,46 м²⁶. Указано, что на площадке размещены две антенны «Тесла» ТМ-11 и две антенны ПТС.

В 1971 г. институтом ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова совместно с Общесоюзной радиотелевизионной передающей станцией (ОРПС) Министерства связи СССР по заданию ГСПИ Министерства связи СССР было выполнено определение несущей способности металлоконструкций башни и составлено заключение о возможности ее дальнейшей эксплуатации²⁷. В пояснительной записке отмечается:

В 1937 году трестом «Радиострой» была выполнена реконструкция башни: установлена металлическая двухстенчатая ферма и выполнены три

²¹ В настоящее время ФГУП «Государственный специализированный проектный институт радио и телевидения» (ГСПИ РТВ).

²² Заказ № 4138. Реконструкция оконечной аппаратной РРЛ. МТЦ (Шаболовка). ГСПИ Минсвязи СССР. Москва, 1969 г. // Архив ГСПИ РТВ. Пап. 4138-15КМ-, 4138-15Р-, 4138.15-КМ-200, 4138-4ИС-, 4138-4ОА-, 4138-4ОТ-, 4138-4ВК-, 4138-4ТЦ-, 4138-4ЛС-, 4138-4ЛУ-, 4138-4ИЭ-, 4138-4РК-.

²³ Архив ГСПИ РТВ. Пап. 4138.15-КМ-200. Л. 3.

²⁴ Архив ГСПИ РТВ. Пап. 4138-15КМ-. Л. 5.

²⁵ Архив ГСПИ РТВ. Пап. 4138.15-КМ-200. Л. 11.

²⁶ Архив ГСПИ РТВ. Пап. 4138-15КМ-. Л. 26.

²⁷ Определение несущей способности металлоконструкций телебашни системы Шухова и составление заключения о возможности ее дальнейшей эксплуатации. 1971 г. // Архив ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова. Шифр ОРИС-569.

площадки на отметке 141,768; 144,3 и 148,378 м. Техническая документация на строительство и реконструкцию башни не сохранилась. В 1947 году институтом Проектстальконструкция было произведено обследование и расчет металлоконструкций башни с целью выявления возможности увеличения нагрузки – установки двух дополнительных антенн. В результате расчета рекомендовалось до установки дополнительных антенн поставить для уменьшения гибкости стоек 17 промежуточных колец. Московским телевизионным центром эти рекомендации не были выполнены; тем не менее были дополнительно установлены антенны турникетного типа на отметке 148,34 м (высота антенны 9,94 м) и антенны с плоским рефлектором на отметке 124,46 м (высота антенны 17,3 м) с подведением к ним 2-х фидерных линий длиной 140 м каждая. В настоящее время на телебашне системы Шухова дополнительно установлены еще 15 антенн типа ПТС; антенна с плоским рефлектором демонтирована²⁸.

Общая схема башни основана на данных 1947 г., сечения прокатных профилей уточнены по обмерам 1971 г.:

Основные геометрические размеры башни, отметки и диаметры опорных колец приняты в соответствии с выпуском № 281 Проектстальконструкции 1947 г. Сечения элементов башни приняты на основании выпуска № 281 Проектстальконструкции 1947 года и материалов обследования ОРПС Министерства связи СССР 1971 г.²⁹

Схемы соединительных узлов в документации 1971 г. выполнены без сохранения пропорций и являются, скорее, рисунками, чем чертежами. На развертках гиперболоидных секций показано примерное расположение стыков прокатных профилей на ногах и кольцах башни, но надежность этих данных вызывает сомнения³⁰. Схемы 1971 г. в целом выполнены менее тщательно, чем схемы 1947 г., и содержат ряд очевидных ошибок³¹.

В 1973 г. была проведена реконструкция башни: установлены дополнительные кольца жесткости в третьей и пятой секциях (6 и 7 шт. соответственно) и вертикальная кольцевая обрешетка (ферма) в верхней части пятой секции, обетонировано основание башни. Возможно, также в это время были установлены новые кольцевые площадки на отметках 50,07; 75,06 и 99,72 м, площадка на отметке 138 м, усиливающие накладки в нижней части ног пятой секции. Обнаружить документацию по этим элементам нам не удалось.

²⁸ Там же. Чертеж 569-4.

²⁹ Там же. Чертеж 569-5.

³⁰ Для двух нижних секций стыки на левом и правом швеллере каждой ноги обозначены буквами «Л» и «П», которые местами написаны неразборчиво до степени смещения (листы 569-6, 7). Некоторые швеллеры ног первой секции показаны без стыков. Расположение стыков на ногах первой секции расходится с данными натурных обследований, выполненных Е. В. Ножовой (Швейцарская высшая техническая школа в Цюрихе) в 2012 и 2013 гг.

³¹ Например, опорное кольцо на стыке первой и второй секций показано в трех разных вариантах, два из которых неверны (листы 569-6, 7); опорное кольцо на стыке пятой и шестой секций показано в трех разных вариантах, причем все неверны (листы 569-5, 10, 11); для третьего, четвертого и пятого промежуточных колец третьей секции профиль указан неверно (листы 569-5, 8) и др.

В 1991 г. ЦНИИпроектстальконструкция был подготовлен проект надстройки для крепления антенн УКВ-ЧМ. Общая схема башни, приведенная в этом проекте, повторяет схему 1947 г.³² В частности, на ней не указана площадка на отметке 124,46 м и дополнительные элементы, установленные в 1973 г.

В последующие годы был выполнен ряд выборочных обследований состояния металлоконструкций башни (работы проводили ОРПС, 1992 г.; Главный центр радиовещания и телевидения (ГЦРТ), 2001 г.; Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В. А. Кучеренко, 2001 и 2008 гг.). Обзор обследований, выполненных в 1947–2008 гг., представлен в отчете ОАО «Экспериментальный научно-проектный институт» (ЭНПИ)³³.

Таким образом, общие сведения о геометрии башни, приведенные в доступной документации, основаны на обмере 1947 г. и не отражают ее современного состояния. Проектные и рабочие чертежи практически не сохранились; анализ сохранившейся документации 1919 и 1922 гг. показывает значительные расхождения с фактической конструкцией башни. На обмерных схемах 1947 г. не отражено расположение стыков прокатных профилей, из которых составлены ноги и кольца башни, за небольшим исключением не отражены индивидуальные особенности и деформации элементов. Схемы 1969 и 1971 гг. основаны на схемах 1947 г. и при этом содержат ряд ошибок и опечаток. Элементы, установленные в 1973 г., не отражены в доступной документации.

Обмеры Шуховской башни на Шаболовке в 2011–2012 гг.

В 2011 г. было выделено государственное финансирование на реконструкцию башни, которую предполагалось провести за три года (2011–2013). В 2011 г. ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть» (РТРС) провело конкурс на разработку проектной и рабочей документации по реконструкции башни, победителем которого стало ООО «Производственно-строительное предприятие «Качество и Надежность»» (ПСП «КиН»). В рамках разработки проекта реконструкции в 2011 г. было выполнено лазерное сканирование и 3D-моделирование башни.

Высокая вероятность скорого начала реставрационных работ стимулировала выполнение в 2011–2012 гг. также двух инициативных проектов по обследованию и 3D-моделированию башни, выполненных Математическим институтом им. В. А. Стеклова РАН (на основе линейных обмеров) и Институтом истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН (на основе лазерного сканирования).

Также в 2011 г. был широко анонсирован проект по фотограмметрическому обследованию башни, которое должен был выполнить профессор Швейцарской высшей технической школы в Цюрихе Армин Грюн (*Armin Grün*) в

³² Металлоконструкции надстройки башни Шухова для крепления антенн УКВ-ЧМ. 1991 г. // Архив ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова. Шифр 20-Ф 5720-1-КМ. Л. 2.

³³ *Травин В. И., Савельев В. А.* Обработка результатов обследований башни Шухова В. Г., выполненных в 1947–2008 годах. М., 2010.

рамках исследовательского проекта «Инженерное искусство раннего модерна. Стратегии В. Г. Шухова в проектировании легких металлоконструкций» (*Konstruktionswissen der frühen Moderne: Suchovs Strategien des sparsamen Eisenbaus*)³⁴ при поддержке Комиссии по разработке научного наследия почетного академика В. Г. Шухова РАН. Однако возникшие технические сложности не позволили выполнить этот проект в намеченные сроки, в 2012 г. было проведено лишь два тестовых облета³⁵.

Таким образом, на момент написания статьи существует три независимо разработанных 3D-модели башни, две из которых созданы по результатам лазерного сканирования.

Летом и осенью 2011 г. линейные обмеры конструкций башни с использованием лазерного дальномера выполнили сотрудники Лаборатории популяризации и пропаганды математики Математического института им. В. А. Стеклова РАН под руководством Н. Н. Андреева. По результатам обмеров, фотографиям и доступным дневникам Шухова была создана 3D-модель башни и реконструирован процесс ее постройки, представленный в виде анимационного фильма³⁶. Результаты проекта представлены в Интернете³⁷. Модель обладает высокой детализацией, однако ее пространственная точность неравномерна: высокой точностью обладают лишь те элементы, которые были обмерены непосредственно. Все однотипные элементы (например, ноги одной секции) смоделированы идентично, без учета индивидуальных деформаций.

В октябре 2011 г. лазерное сканирование башни выполнили сотрудники ООО «НПП "Бента"» (Санкт-Петербург)³⁸ по заказу ООО ПСП «КиН», после чего было выполнено 3D-моделирование башни³⁹. Для производства работ применялась наземная импульсная лазерная сканирующая система *RiegIVZ-400*. Сканирование башни производилось с семи позиций, расположенных на удалении 100–200 метров равномерно вокруг нее. Съемка на четырех из семи станций велась с кровли близлежащих зданий. Точность взаимного ориентирования сканов составила 3–4 см. По полученным данным была построена каркасная 3D-модель башни, которая использовалась в дальнейшем проектировщиками для расчетов при разработке проекта реконструкции башни. Дополнительно была создана также твердотельная 3D-модель,

³⁴ Проект рассчитан на 2010–2013 гг. и выполняется четырьмя независимыми коллективами в Австрии, Германии и Швейцарии, каждый из которых получает финансирование от своего национального научного фонда (*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF), Schweizerische Nationalfonds (SNF)*).

³⁵ Первая попытка облета 5 июня 2012 г. оказалась неудачной из-за проблем с дистанционным управлением беспилотного октакоптера зарубежного производства. Второй тестовый полет был произведен 25 октября 2012 г. с использованием беспилотного гектакоптера отечественной разработки (группа компаний *ZALA AERO*, Ижевск).

³⁶ Андреев Н. Н., Жулин А. Ю., Калинин М. А., Панюнин Н. М. Компьютерная реконструкция постройки башни В. Г. Шухова на Шаболовке // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН, 2012. М., 2012. Т. 2. С. 833–834.

³⁷ См.: <http://www.etudes.ru/ru/etudes/shukhov/>

³⁸ Формально договор был заключен с ООО «ЭкоСкан», Санкт-Петербург.

³⁹ Виноградов К., Степанов Д. «3D-портрет» Шуховской башни // Архитектура, реставрация, дизайн и строительство. 2011. № 3 (49). С. 74–75.

которая строилась на основе каркасной модели путем выдавливания сечений по полученным ранее отрезкам. Для ног двух нижних секций использовались упрощенные сечения (прямоугольник вместо швеллера), для верхних секций – уголок соответствующих профилей (но без учета составного характера ног третьей и шестой секций). Узлы в этой модели показаны в упрощенном виде, без деталей. Твердотельная 3D-модель при подготовке проекта реконструкции не использовалась.

В декабре 2011 г. лазерное сканирование башни было выполнено компанией ООО «Триметари» (Санкт-Петербург) по заказу ИИЕТ РАН⁴⁰. Для производства работ применялись лазерные сканеры *Leica ScanStation2* и *FARO Focus3D*. Сканирование башни производилось с семи позиций, четыре из которых были расположены у основания башни в непосредственной близости от нее (10–15 м), а еще три – непосредственно на башне, на технологических площадках на отметках 99,72; 124,46 и 141,768 м. Точность взаимного ориентирования сканов составила 0,7 см. По полученным данным было выполнено трехмерное моделирование башни.

Основные элементы конструкции (ноги, кольцевые фермы и промежуточные кольца жесткости) были смоделированы с наиболее высокой точностью, по сечениям. Методика моделирования по сечениям, разработанная для точного моделирования скрученных стержней и колец гиперболоидной конструкции, состоит в следующем. Из облака точек выделяется часть, соответствующая отдельному элементу (например, швеллеру). Определяются края элемента, и проводится средняя линия. Перпендикулярно ей через каждые 2–3 м строятся секущие слои толщиной 1 см. По точкам, попавшим в секущий слой, вручную вписывается заранее известное сечение элемента (например, сечение швеллера № 14). Таким образом, получается набор из 10–12 сечений, отстоящих друг от друга на 2–3 м, по которым затем интерполируется профиль. Средняя точность вписывания трехмерной модели элемента в облако точек, достигаемая таким методом, составляет 0,2–0,8 см. При этом 3D-модель достоверно отражает индивидуальные деформации каждого элемента.

Узлы соединения ног смежных секций, крепления ног друг к другу и к кольцам жесткости моделировались по облаку точек и доступным чертежам 1947 г. с высокой детализацией. Также были смоделированы по историческим чертежам и фотографиям элементы конструкции, не существующие в настоящее время (надстройка 1922 г.), и конструкция фундамента башни. Средняя точность построенной 3D-модели башни составила около 1 см в единой системе координат.

Сопоставление двух 3D-моделей башни, построенных на основе результатов лазерного сканирования, показало хорошее соответствие между ними⁴¹. Расхождение между моделями не превышает в среднем 10 см и обусловлено, по-видимому, несколькими причинами: различием методов трехмерного моделирования, погрешностью взаимного позиционирования моделей, а также

⁴⁰ 30 ноября – подготовка и пробный скан, 1 и 2 декабря – основные работы.

⁴¹ Корчуков А. С., Леонов А. В. Использование технологии лазерного сканирования при создании 3D-моделей и мониторинге памятников архитектуры // Технология и организация строительного производства. 2013. № 1(2). С. 49–51.

температурным расширением материала конструкций. Хорошее соответствие двух моделей, построенных независимо друг от друга, говорит о высокой эффективности технологии лазерного сканирования для фиксации геометрии крупных технических объектов со сложной конструкцией. Технология лазерного сканирования на сегодняшний день пригодна для создания моделей технических объектов любой практически нужной точности. Периодическое лазерное сканирование с последующим построением упрощенных 3D-моделей может использоваться в качестве инструмента мониторинга состояния объекта.

Аналогичные работы на других башнях Шухова

Первое упоминание об использовании лазерного сканирования для фиксации геометрии шуховской гиперboloидной конструкции относится к 2006 г., когда в Краснодаре

для Краснодарводоканала сотрудники «ИнжГео» провели сканирование и создали трехмерную модель водонапорной башни системы инженера В. Г. Шухова⁴².

К сожалению, каких-либо сведений об этом проекте нам получить не удалось.

В ходе проекта «Инженерное искусство раннего модерна. Стратегии В. Г. Шухова в проектировании легких металлоконструкций» были выполнены обмеры и 3D-моделирование конструкций 14 гиперboloидных башен Шухова в России, Белоруссии, Узбекистане и на Украине. Работы выполнялись в течение 2010–2012 гг. командой из Мюнхенского технического университета под руководством А. И. Кутного, доцента кафедры истории архитектуры, архитектурных исследований и охраны памятников архитектуры⁴³.

В 2010 г. были обмерены водонапорные башни в Бухаре, Фастове, Кагане; в 2011 г. – опора ЛЭП НиГРЭС на Оке под Дзержинском, два Аджиголь-Станиславских маяка под Херсоном, водонапорные башни в Выксе, Николаеве, Конотопе, Борисове; в 2012 г. – водонапорные башни в Черкассах, Белой

⁴² *Сергеева Н.* На пике технологий // ГеоИнжиниринг. 2012. № 1 (13). С. 45.

⁴³ *Nykyforchyn, H., Kutnyi, A., Kremin, T., Zyrulnyk, O.* Diagnostics of the Condition of the Cellular Hyperbolic V. G. Shukhov Towers Exploited over 100 years // Theorie und Praxis. 3. Internationale wissenschaftlich-technische Konferenz in Lviv (Ukraine). Lviv: Tagungsband, 2012; *Kutnyi, A.* Historische Wasserversorgung in Buchara (Usbekistan) // Historische Wasserleitungen. Gestern – Heute – Morgen. Mit besonderer Berücksichtigung ihrer denkmalgerechten und betriebssicheren Erhaltung. Tagungsband des Internationalen Frontinus-Symposiums, Wien, 19–23. Oktober 2011. BABesch Suppl. 24. SoSchrÖAI 49. S. 241–247; *Kutnyi, A.* Tanz der Eisentürme auf dem Wasser. Baugeschichte zweier Leuchttürme am Schwarzen Meer // Kurze Berichte aus der Bauforschung. 2013 Nr. 2. S. 38–48; *Barthel, R., Beckh, M., Kutnyi, A.* Construction and Structural Behavior of Vladimir Šuchovs NIGRES Tower // Structural Analysis of Historic Construction. London, 2008. P. 183–190; *Barthel, R., Beckh, M., Kutnyi, A., Schuller, M.* Ein Meilenstein im Schalenbau Schuchovs Halle für das Blechwalzwerk in Vyksa (Gemeinschaftsarbeit) // Festschrift für Rainer Graefe – Forschen, Lehren und Erhalten. Innsbruck, 2009. S. 105–122.

Церкви, Полибино, Помощном; в 2013 г. водонапорные башни в Шостке и Самарканде. Линейные обмеры выполнялись с помощью лазерного тахеометра, для некоторых башен также использовался фотограмметрический метод с использованием программы *Aspect 3D*. На основе полученных данных были построены 3D-модели с высокой детализацией в программе *Rhinoceros* с использованием плагина параметрического моделирования *Grasshopper3D*.

Заключение

Анализ истории документирования Шуховской башни на Шаболовке наглядно демонстрирует слабые стороны традиционной бумажной документации. Проектные и рабочие чертежи могут заметно отличаться от фактически построенного объекта. Обмерные чертежи, созданные для расчета несущей способности, не отражают те элементы конструкции, которые не влияют на ее несущую способность (например, точное расположение стыков профилей, данные об индивидуальных особенностях и деформациях элементов, дополнительные элементы). В то же время эти сведения могут быть важны для историка техники: например, для оценки параметров исходного металлопроката и способов его монтажа, исследования истории постройки и реконструкции объекта.

Чертежи могут содержать опечатки, при их перерисовывании происходит накопление ошибок (например, швеллер полками вниз превращается в швеллер полками вверх, № 12 – в № 14 и т.п.). Выявление и исправление этих ошибок требует натурного обследования, которое не всегда возможно для исследователя. При демонтаже или разрушении оригинальной конструкции, аргументированное исправление ошибок на основании анализа лишь сохранившейся документации может стать невозможным.

Современные технологии лазерного сканирования позволяют зафиксировать всю видимую форму (геометрию) сложной технической конструкции с высокой пространственной точностью, практически недостижимой при использовании других методов обмера. Кроме того, результат сканирования объективен так же, как фотография или видеозапись: здесь исключается субъективный фактор, человеческая ошибка при обмере и обработке первичных записей.

Результаты лазерного сканирования (облако точек) обладают существенно большей избыточностью данных о геометрии конструкции, чем набор схем и чертежей. Например, данные о форме и размере элемента в обмерной документации содержатся всего в 2–3 местах, и любая опечатка или ошибка существенно затрудняет выяснение правильного варианта. В облаке точек каждый элемент «оконтурен» тысячами точек, что заметно снижает вероятность ошибок такого рода.

В отличие от традиционной документации, лазерное сканирование фиксирует индивидуальную форму каждого элемента конструкции, что позволяет анализировать различия между типовыми элементами конструкции и делать выводы о точности строительства. Например, для Шуховской башни зафиксирована неравномерность «скрутки» и индивидуальные деформации каждой ноги, чего было практически невозможно достиг другими методами обмера.

Однако как и любой объективный метод фиксации информации об объекте, лазерное сканирование «не отличает важное от второстепенного» (что важно для практических задач). Там, где специалист обмерит важный соединительный узел или толщину профиля с точностью 1 мм, а примерное расположение стыков профиля или второстепенных соединительных элементов – с точностью 1 м, лазерный сканер «беспристрастно» зафиксирует все детали конструкции с точностью 1 см. С практической точки зрения (например, для расчета несущей способности), эта точность будет недостаточна в одном случае и избыточна в другом. Например, для Шуховской башни выполненное сканирование не позволило надежно зафиксировать толщины профилей, расположение всех заклепок и стыков профилей. Фиксация же всей конструкции с точностью 1 мм потребовала бы не оправданных никакими практическими задачами затрат ресурсов.

Кроме того, лазерное сканирование фиксирует только внешнюю геометрию конструкции, что в общем случае не позволяет восстановить внутреннее устройство узлов и элементов. Цвет и фактура поверхности при лазерном сканировании фиксируются с низкой точностью, поэтому оно не может заменить натурального обследования, например, для оценки состояния защитного покрытия и степени коррозии элементов.

Таким образом, лазерное сканирование является эффективным методом точного автоматического обмера внешней геометрии конструкции. Вместе с традиционной документацией результаты лазерного сканирования позволяют создать детальную 3D-модель сложного технического объекта любого масштаба. В частности, в ходе моделирования Шуховской башни на Шаболовке удалось достичь точности около 1 см в единой системе координат при высоте башни более 150 м. Вместе с исходным облаком точек построенная 3D-модель является наиболее полным описанием геометрии башни на сегодняшний день. Созданный 3D-документ сохраняет детальную информацию о современном состоянии шуховской гиперболоидной конструкции и позволяет обеспечить доступ к этим данным для широкого круга исследователей.

Для историков науки и техники современные технологии 3D-документирования являются мощным инструментом сохранения и анализа информации об уникальных технических объектах. Сопоставление исторической документации с облаком точек лазерного сканирования и фотографиями позволяет обнаружить и исправить ошибки в размерах и форме конструктивных элементов без проведения натурального обследования. Виртуальная 3D-модель может использоваться для анализа конструкции объекта, мониторинга его состояния, виртуальной реконструкции утраченных элементов, воссоздания истории постройки и дальнейших изменений конструкции объекта. Результаты лазерного сканирования и 3D-моделирования могут помочь в воссоздании утраченных чертежей конструкции или создании новых чертежей (например, проектов реконструкции).

Цифровая 3D-модель может быть связана взаимными ссылками с другими электронными документами: фотографиями, видеосъемками, историческими чертежам и др. Таким образом, на основе 3D-модели может быть создана информационная система, в которой помимо пространственных данных хранится также историческая информация. Виртуальная модель позволяет

обеспечить интуитивный интерфейс для доступа к большому объему графических и текстовых данных (например, фотографиям, чертежам и описаниям конструктивных элементов).

Наконец, виртуальная модель может использоваться для проведения виртуальных экскурсий, обеспечения доступа к информации об объекте для широкой публики, в том числе посредством Интернета. Это особенно актуально для объектов, недоступных для посетителей, таких как Шуховская башня на Шаболовке.

Таким образом, перечисленные достоинства 3D-документов, которые одновременно являются и аргументами в пользу их создания, говорят о необходимости перехода к 3D-документированию всех памятников техники как части культурного наследия. Это, во-первых, поднимет ведение документации по памятникам техники на самый передовой на сегодняшний день уровень и, во-вторых, сократит в будущем затраты на восстановление памятников техники, хотя бы в виде виртуальных моделей. Нет необходимости особо подчеркивать, что 3D-документы не отменяют традиционного поиска и сохранения рисунков, чертежей и фотографий указанных объектов, которые при наличии ссылок (связок) включаются в состав 3D-документа.

Благодарности

Авторы благодарят за выполненную работу ⁴⁴ сотрудников ООО «Триметари» М. Н. Аникушкина, Д. В. Линовского, А. В. Иванова, С. В. Овчарова, а также Е. Н. Ашарина и своих коллег А. Е. Бобкова и В. А. Конышева. Также авторы благодарят всех, кто предоставил информацию и оказал поддержку в проведении работ. Формат статьи не позволяет перечислить всех поименно, прежде всего, это К. Т. Кудрявцев, С. А. Белявский, А. В. Марсавин, А. Ю. Карманов, С. И. Александров (МРЦ РТРС), И. В. Степанов и И. В. Хрекин (РТРС), О. Б. Добродеев, П. П. Вихров и П. А. Иваницкий (ВГТРК), А. Н. Кулешов и А. И. Землянихин (ОАО «РТР-Сигнал»), Н. И. Пресняков, Г. Р. Шеляпина и Л. Б. Ковалева (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова), Г. А. Медведева (РГАНТД), В. Ю. Афиани и И. Г. Тараканова (Архив РАН), Н. А. Ульпе, Н. А. Иванова и Л. И. Чернышова (ГСПИ РТВ), В. Ф. Шухов и С. В. Арсеньев (фонд «Шуховская башня»), М. Н. Ершов и А. С. Корчуков (ООО «НПП “Качество и Надежность”»), К. П. Виноградов (ООО НПП «Бента»), Н. Н. Андреев (Математический институт им. В. А. Стеклова РАН), С. Ю. Желтов (ГосНИИАС), А. Грюн и Е. В. Ножова (Швейцарская высшая техническая школа в Цюрихе), А. И. Кутный (Мюнхенский технический университет), М. Ю. Каневский (ООО «Мастер-Сервис»), С. И. Котельников (ЗАО «НПП “Навгеоком”»). Специальную благодарность авторы выражают Г. Р. Шеляпиной, которая ознакомилась с рукописью статьи и сделала ряд ценных замечаний.

⁴⁴ Лазерное сканирование, 3D-моделирование, геодезическую привязку, визуализацию, а также стереовидеосъемку.