

**В.А.ВАЛЬКОВ**, аспирант, *Parliament.20@yandex.ru*

**М.Г.МУСТАФИН**, д-р техн. наук, профессор, *mustafin\_m@mail.ru*

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**Г.В.МАКАРОВ**, д-р техн. наук, профессор, *g.v.makarov@mail.ru*

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, Санкт-Петербург*

**V.A.VALKOV**, post-graduate student, *Parliament.20@yandex.ru*

**M.G.MUSTAFIN**, Dr. in eng. sc., professor, *mustafin\_m@mail.ru*

*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

**G.V.MAKAROV**, Dr. in eng. sc., professor, *g.v.makarov@mail.ru*

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg*

## ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ШУХОВСКОЙ БАШНИ

Рассмотрен опыт применения наземного лазерного сканирования для создания цифровых трехмерных моделей Шуховской (Шаболовской) башни и определения ее геометрических характеристик, позволяющий повысить надежность эксплуатации объекта.

**Ключевые слова:** наземное лазерное сканирование, цифровая трехмерная модель.

## APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR CREATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF SHUKHOV TOWER

Application of terrestrial laser scanning for creation of three-dimensional models of Shukhov (Shabolovskaya) tower and determination of its geometric characteristics is considered. It helps increase the reliability of operation of the facilities.

**Key words:** terrestrial laser scanning, digital three-dimensional model.

Проведение реконструкции и модернизации объектов, включающих сложные строительные элементы, технологическое оборудование и коммуникации, обязывает строительные и проектирующие организации иметь точные данные об их пространственном положении. Поскольку проектная документация не дает наглядного представления о взаимном расположении строительных элементов, в качестве исходной информации целесообразно использовать цифровую трехмерную модель, отображающую реальное состояние объекта на конкретный

момент. Точность построения такой модели может зависеть от назначения и значимости объекта, а также требований проектирующей организации.

В статье рассмотрен опыт применения наземного лазерного сканирования для определения геометрических характеристик и создания цифровых моделей высотных объектов на примере Шуховской башни (Москва).

Первоочередной задачей стало создание модели, включающей все узловые соединения башенной конструкции. В дальнейшем ее планировалось использовать для

оценки несущей способности узлов и расчета нагрузок на металлоконструкции. На основе узловой модели создается детальная твердотельная трехмерная модель башни, состоящая из элементов заданного сортамента. Эта модель используется для выпуска архитектурных чертежей и решения презентационных задач.

Башня была построена в 1920 г. по проекту В.Г.Шухова. Она состоит из шести секций, каждая высотой около 25 м. Диаметр в основании башни составляет 40,3 м, а на верхней площадке 3,4 м. Основой геометрического построения каждой из шести секций башни является однополостный гиперболоид вращения с прямолинейными образующими. Конструкция башни Шухова подробно описана во многих европейских книгах по истории архитектуры. На международной научной конференции «Heritage at Risk. Сохранение архитектуры XX века и Всемирное наследие», прошедшей в Москве в апреле 2006 г. с участием 170 специалистов из 30 стран мира, Шуховская башня признана объектом всемирного наследия<sup>\*</sup>.

В настоящее время башня находится в эксплуатации, общая масса установленного на ней оборудования возросла, однако капитальный ремонт сооружения ни разу не выполнялся<sup>\*\*</sup>.

Для решения задачи по созданию трехмерных цифровых моделей Шуховской башни в качестве способа сбора геопространственных данных об объекте был выбран метод наземного лазерного сканирования (НЛС). Суть НЛС заключается в измерении множества точек, принадлежащих поверхности исследуемого объекта, с по-

\* Фонд «Шуховская башня» / Режим доступа: <http://www.shukhov.ru/tower.html>, свободный. Дата последнего обращения: 20.12.2012.

Sukhov Tower Foundation / Mode of access: <http://www.shukhov.ru/tower.html>, free. Date of the last treatment: 20.12.2012.

\*\* Виноградов К.П. «3D-портрет» Шуховской башни / К.П.Виноградов, Д.И.Степанов // АРДИС: Архитектура. Реставрация. Дизайн. Инвестиции. Строительство. 2011. № 3. С.74-75.

Vinogradov K.P., Stepanov D.I. «3D-portrait» Shukhov Tower // ARDIS: Architecture. Restoration. Design. Investments. Construction. 2011. N 3. P.74-75.

мощью лазерного сканера. Результатом сканирования и предварительной обработки данных является облако точек исследуемого объекта в заданной системе координат и высот. Трехмерное представление значительно облегчает задачу визуального ознакомления с объектами, их реконструкции, корректного вписывания новых элементов в существующую структуру.

Основными преимуществами наземного лазерного сканирования при решении задач создания трехмерных моделей инженерных сооружений сложной геометрической конструкции являются:

- высокая скорость проведения работ;
- высокая точность;
- бесконтактность метода сбора данных;
- полнота и детальность получаемых результатов;
- мгновенная трехмерная визуализация;
- минимальное влияние «человеческого фактора».

Недостатками сканерной технологии являются высокая стоимость оборудования, отсутствие нормативной базы по производству работ и стандартизованных технологий по оценке точности измерений. Кроме того, необходимы высококвалифицированные специалисты, способные выполнять полевые работы по наземному лазерному сканированию и камеральной обработке его результатов.

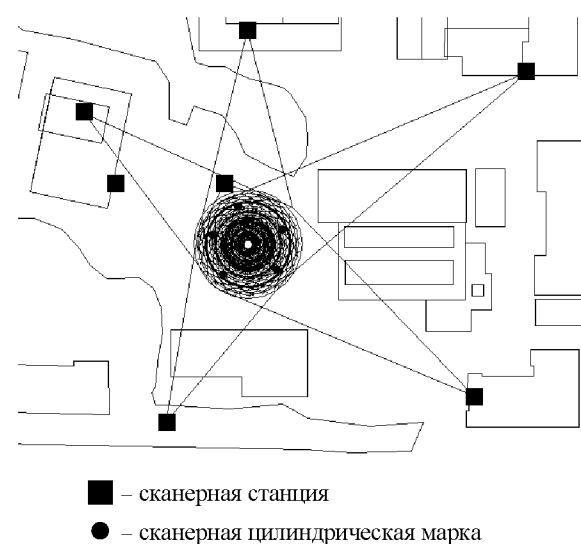


Рис.1. Схема расположения сканерных станций



Рис.2. Точечная модель Шуховской башни

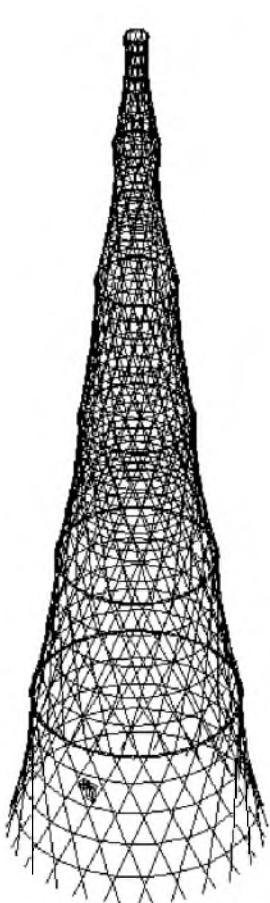


Рис.3. Каркасная модель Шуховской башни

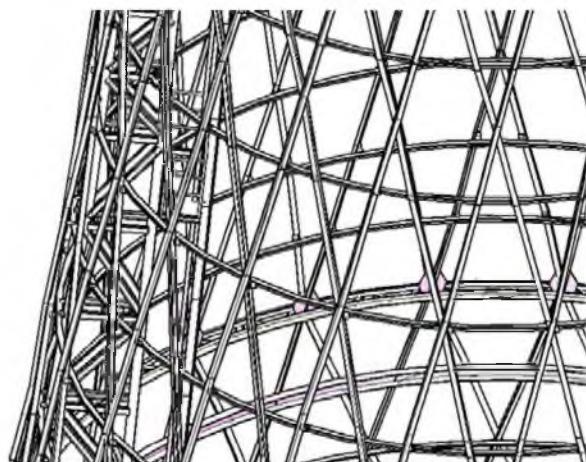


Рис.4. Фрагмент трехмерной модели Шуховской башни

Для производства работ по НЛС и созданию трехмерной цифровой модели Шуховской башни использовалась наземная импульсная лазерная сканирующая система

Riegl VZ-400 (Австрия), которая выполняет измерения на отстоянии до 600 м с точностью определения расстояний до 5 мм, обеспечивая скорость измерений до 125000 точек в секунду.

Методика создания цифровых трехмерных моделей Шуховской башни разрабатывалась с учетом наличия конкретного прибора и включала:

1) полевые работы (рекогносцировка с фотографированием исследуемого объекта; создание планово-высотного обоснования; сканирование объекта);

2) камеральные работы (приведение всех результатов сканирования в единую систему координат – взаимное ориентирование облаков точек; создание цифровых трехмерных моделей).

Полевые работы выполнялись одной бригадой в течение двух дней. Сканирование проводилось с семи позиций, расположенных на удалении 100-200 м от объекта, обеспечивая наличие зон перекрытия (рис.1). Угловое разрешение съемки составило  $0,003^\circ$ , что соответствует шагу сканирования 7 мм на расстоянии 150 м. Важным моментом на стадии полевых работ являлось применение цилиндрических марок, что позволило сэкономить трудозатраты по созданию планово-высотного обоснования. Основным условием является их однозначное распознание с нескольких сканерных позиций. В основе дешифрирования данных марок по данным НЛС лежит принцип определения центра фигуры известной формы и размеров. Для удобства установки и надежности положения сканерных марок в момент сканирования использовали специально сконструированные подставки.

Взаимное ориентирование облаков точек осуществлялось в программе Riegl RiScan Pro по пяти цилиндрическим сканерным маркам диаметром 110 мм, которые были закреплены на первом ярусе конструкции на безопасной высоте. При выборе системы координат было решено приводить результаты сканирования со всех позиций в локальную систему. В качестве нее была принята система координат сканерной позиции, расположенной на земле у основания Шуховской башни.

На стадии регистрации сканов также использовались показания встроенного датчика наклона вертикальной оси, позволяющего ориентировать полученные облака точек в вертикальное положение и отслеживать это положение в процессе всей обработки. Таким образом, все облака точек приводились к горизонту, благодаря чему для их объединения достаточно было использовать лишь две из пяти связующих марок. В случае обнаружения расхождений между облаками точек с разных станций выполнялась ручная корректировка элементов ориентирования станции в интерактивном режиме. В результате была получена единая полная трехмерная точечная модель Шуховской башни, насчитывающая приблизительно 50 млн точек (рис.2).

Дальнейшим этапом камеральных работ стало построение трехмерной каркасной модели, включающее несколько этапов. Сначала строилась трехмерная твердотельная модель узла на каждом заданном уровне с использованием соответствующего сортамента металлоконструкций. Она содержала в себе отрезки, соответствующие векторам центров тяжести стоек, а также отрезки, проведенные между ближайшими точками векторов центров тяжести элементов. Данная модель в полуавтоматическом режиме «вписывалась» в облако точек в программном комплексе Autodesk AutoCAD с применением модуля-приложения XTools, разработанного специалистами «НПП «Бента», который предназначен для визуализации сканов и точечных моделей в программах САПР без специального конвертирования в соответствующие форматы. Удобство работы с XTools заключается в том, что данные наземного лазерного сканирования подгружаются напрямую в рабочее пространство модели программы AutoCAD.

В результате «вписывания» твердотельных узловых моделей в облако точек было определено положение необходимых узлов по всей башне. По полученным точкам строилась цифровая трехмерная каркасная модель Шуховской башни в формате \*.dwg (рис.3), применяемая в дальнейшем проектировщиками для расчетов нагрузок. Общее количество отрезков, соединяющих

узловые точки в каркасной модели, равнялось 10793.

Также была создана цифровая трехмерная твердотельная модель Шуховской башни, учитывающая локальные деформации и отклонения башенной конструкции от вертикальной оси (рис.4). Данная модель строилась на основе каркасной путем выдавливания сечений по расставленным ранее твердотельным элементам.

По твердотельной трехмерной модели на заключительном этапе камеральных работ были созданы обмерные чертежи: фасады, планы, а также разрез башни. Данный комплект документов необходим для последующей разработки проектно-технической документации при реконструкции или капитальном ремонте сооружения.

На основе выполненных работ можно сделать вывод, что НЛС эффективно для построения моделей высотных объектов при решении различных инженерных задач. Полученные модели целесообразно применять, в частности, для мониторинга деформационных процессов высотных зданий и сооружений, что весьма актуально в настоящее время. Технология НЛС также позволяет устранить недостатки традиционных методов за счет избыточности получаемой информации и измерения всего объекта.

Путем систематического лазерного сканирования здания или сооружения с определенной периодичностью можно создавать трехмерные модели и определять динамику смещений как всего объекта, так и определенного массива точек, составляющей конкретный конструктивный элемент. Сравнение фактических смещений с нормативными покажет степень допустимости деформирования как высотного объекта в целом, так и определенных элементов относительно друг друга.

Для реализации методики потребуется выполнить ряд исследований, в частности, по выявлению допустимых смещений земной поверхности и самих высотных объектов. Наличие разработанных специализированных программных комплексов по расчету деформированного состояния оснований сооружений дает возможность решения задач в целом.