

Н. Н. Яковлев^{1✉}, Д. Г. Назаров²

Применение наземного лазерного сканирования при оценке деформаций внутренней защитной оболочки реакторного здания

¹Государственное автономное учреждение Московской области «Научно-исследовательский и проектный институт градостроительства (ГАУ МО «НИиПИ градостроительства»),
г. Москва, Россия

² Акционерное общество «Концерн Титан-2» Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Россия
e-mail: yakovlevnn@niipi.ru

Аннотация. Строительство объектов атомной энергетики является передовым направлением, имеющим стратегическое значение для развития страны. К атомной энергетике предъявляются повышенные требования на всех этапах строительства и последующей эксплуатации. Применение наземного лазерного сканирования при получении геопространственных данных даёт существенные преимущества, такие как: высокую скорость, точность, детализацию и автоматизацию в процессе сбора, обработки и анализа пространственных данных. В данной статье апробирован современный подход к получению геопространственных данных, последующей обработке и анализу результатов наземного лазерного сканирования при оценке деформаций сооружений внутренней защитной оболочки реакторного здания. Проанализирована возможность применения и последующего внедрения в производственные процессы технологии информационного моделирования (BIM – Building Information Modeling).

Ключевые слова: внутренняя защитная оболочка реакторного здания, картограмма купола, наземное лазерное сканирование, оценка влияний деформаций

N. N. Iakovlev^{1✉}, D. G. Nazarov²

Application of ground-based laser scanning in the assessment of deformations of the inner protective shell of the reactor building

¹State autonomous institution Moscow region «Research and Project Institute of Urban Planning»,
Moscow, Russia

²Joint Stock Company Concern Titan-2 Leningrad Region, Sosnovy Bor, Russia,
e-mail: yakovlevnn@niipi.ru

Abstract. The construction of nuclear power facilities is a cutting-edge area of research that is of strategic importance for the country's development. Nuclear power facilities are subject to stringent requirements at all stages of construction and subsequent operation. The use of terrestrial laser scanning for obtaining geospatial data offers significant advantages, including high speed, accuracy, detail, and automation in the collection, processing, and analysis of spatial data. This article presents a modern approach to obtaining geospatial data, followed by the processing and analysis of terrestrial laser scanning results for assessing the deformation of the internal protective shell of a reactor building. The possibility of applying and subsequently implementing information modeling technology (BIM – Building Information Modeling) in production processes has been analyzed.

Keywords: Internal protective shell of the reactor building, dome map, ground-based laser scanning, and assessment of deformation effects

Введение

Атомная электростанция АЭС «Аккую» расположена на берегу Средиземного моря. Район входит в состав муниципалитета Гюлнар (Gülнар) провинции Мерсин (Mersin). Район строительства относится к Средиземноморскому региону.

Площадка находится в окружении холмов высотой до 270 м, являющихся естественной границей территории размещения АЭС. Отметка земли на площадке изменяется от 0 до 150 м над уровнем Средиземного моря (рис.1).



Рис. 1. Промышленная площадка АЭС «Аккую»

К основным зданиям и сооружениям промышленной площадки относятся реакторное здание, которое включает в себя несколько контуров физической защиты реактора, внутренняя защитная оболочка ВЗО и наружная защитная оболочка НЗО. На этапе укрупнительной сборки металлоконструкции купола реактора проверяются геометрические параметры и оцениваются деформации [1]. Выполняется тахеометрическая съемка с заданным шагом, на основании данной съемки производится анализ фактических параметров купола. Отчетным документом является картограмма купола, где сравниваются фактические параметры с проектными.

Для обработки массива данных необходимо построить проектную модель купола (эталонную полусферу), которая будет являться отчетной основой при сравнении с результатами наземного лазерного сканирования. Необходимо отметить, что данный подход, связанный с построением эталонной поверхности является широко применяемым в отечественной нефтегазовой сфере при построении моделей трубопроводных систем и сложных геометрических объектов [2]. На основании проведенных исследований, можно сделать однозначный вывод, что комплексный подход с использованием наземного лазерного сканирования (НЛС) является эффективным для сбора геопространственных данных и после-

дующего анализа вертикальных и горизонтальных деформаций. Так же необходимо отметить, что при помощи НЛС получается массив данных, который полностью описывает геометрию исследуемого объекта [1, 2, 3, 4, 5].

В данной статье проанализированы различные методы и способы получения массива данных, выполнено построение эталонной полусферы и апробирована методика оценки деформации купола внутренней защитной оболочки энергоблока АЭС «Аккую».

Постановка задачи

Для успешной реализации строительно-монтажных работ по укрупнительной сборке и последующему монтажу металлоконструкции внутренней защитной оболочки (далее ВЗО) необходимо выполнить тахеометрическую съемку с заданной дискретностью. Полученные значения необходимо сравнить с проектными параметрами купольной части.

Полусфера – это трехмерная геометрическая фигура, которая представляет собой верхнюю половину сферы. Принципиальная схема верхней части внутренней защитной оболочки приведена представляет собой сферу (рис. 2).

Сравнение геометрических размеров проектной и фактической полусферы является оценкой деформации купола и определяется длиной вектора от центра сферы до заданной точки на ее поверхности.

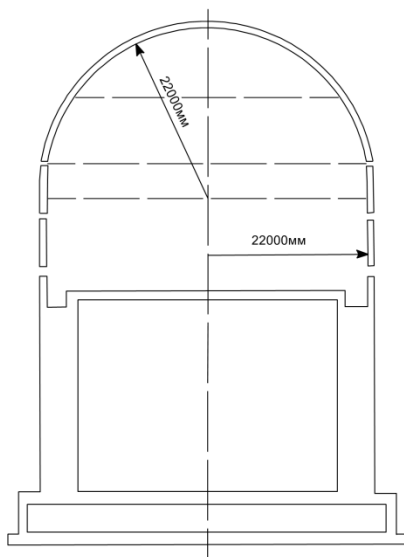


Рис. 2. Схема ВЗО энергоблока АЭС

Методы исследований

Для решения поставленной данной задачи необходимо следующее:

- сгущение геодезической разбивочной основы на участке укрупнительной сборки;
- сгущение геодезической разбивочной основы на монтажном горизонте;
- сканирование ВЗО на заданных площадках;

- математическая обработка результатов измерений в специализированном программном комплексе;
- построение цифровой модели проектного купола;
- сравнение фактических параметров купола с проектными;
- анализ деформационных параметров.

Сгущение геодезической разбивочной основы

При сканировании купола, на стапеле выполнялось сгущение геодезической основы с использованием электронного тахеометра с систематической погрешностью 1 сек. При обработке результатов геодезических измерений применялся математический аппарат метода наименьших квадратов.

В результате уравнивания получена математическая модель, максимально подобная реальному построению геодезической сети ВРС. При этом полевые измерения и применяемые методы позволили минимизировать систематические погрешности, а случайные погрешности подчиняются закону нормального распределения. При проведении геодезических измерений, выполнялись все меры, чтобы ослабить систематические погрешности, путем соответствующих геодезических построений с задачей оптимальной геометрии фигур и увеличением числа избыточных измерений.

При сканировании купола на монтажном горизонте выполнялась проверка внутренней разбивочной основы. После чего выполнялись работы по сканированию купола.

Создание математической модели проектного купола

Основной задачей на данном этапе было построение проектной математической модели купола, которая является отчетной поверхностью сравнения с фактическими измеренными параметрами по результатам сканирования.

Цифровые модели, полученные по результатам измерений и построенные с заданной регулярной сеткой, необходимо было представить в виде картограммы для однозначного дешифрирования и последующей оценки деформации в каждом из узлов регулярной сетки. Для решения данной задачи рассматривались разные интерпретации построения регулярной сетки. Опытным путем было установлено, что метод хорд (рис. 3). является максимально адаптивным для данных условий. Данный способ построения регулярной сетки реализован и зарекомендовал себя как многофункциональный.

Для построения регулярной сетки эталонной полусферы и последующей обработки измерений использован подход, реализованный в [1] для оценки влияния деформации.

Оптимальным решением для построения регулярной сетки является метод хорд, (Рис. 3). Метод хорд описывает расчёт координат вершин правильных многоугольников, которые вписанных в сферу и расположены по плоскостям меридианов и параллелей. Шаг сетки определяется количеством многоугольников и количество вершин этих многоугольников и коррелирует с размерами хорды, соединяющей две

соседние точки сетки. В нашем случае величина хорды должна быть равна расстоянию между серединами двух смежных элементарных участков.

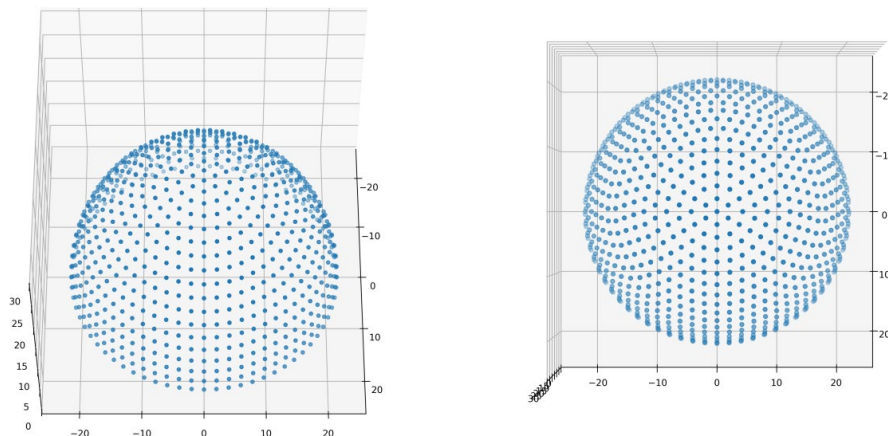


Рис. 3. Построение сетка по методу хорд

Необходимо отметить, что данный алгоритм построения регулярной сетки успешно реализуется методами программирования.

Наземное лазерное сканирование поверхности купола

Наземное лазерное сканирование выполнялось в ночное время с целью уменьшения влияния температурных деформаций, а также работающего персонала и средств механизации.

Обработка результатов измерений облака точек выполнялась в специализированном программном комплексе. Процесс сканирования ВЗО представлен на (рис. 4).



Рис.4. Сканирование ВЗО на монтажном горизонте

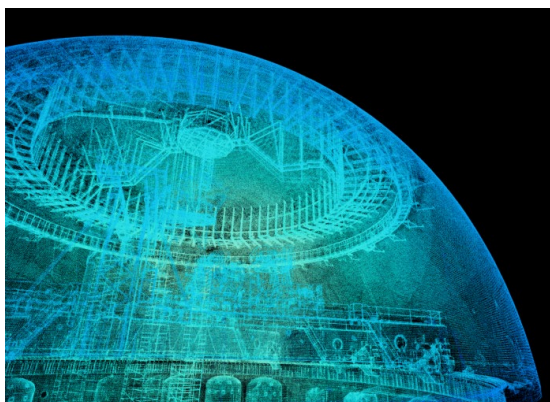
Необходимо отметить, что на этапе укрупнительной сборки купола расположено большое количество вспомогательных сооружений, которые в последствии при обработке результатов сканирования необходимо удалять. После отбраковки результатов сканирования выполняется фильтрация точек по различным критериям.

Данные научные изыскания были реализованы при укрупнительной сборке первого энергоблока АЭС «Аккую». (рис. 5).

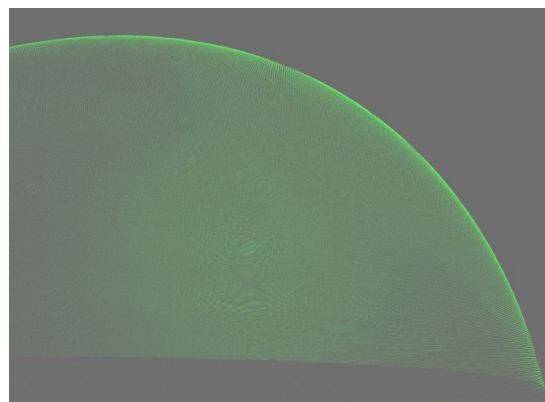


Рис. 5. Сканирование купола на стапеле

После математической обработки результатов измерений и оценки точности была построена модель купола реактора, при этом использовался программный продукт RiSCAN PRO. После этого выполнялась наложение фактической модели купола на проектную. Выполнялась отбраковка сопутствующих конструкций (рис. 6). Априорный расчет точности узлов регулярной сетки и последующее построение картограммы реализованы в [1].



а)



б)

Рис. 6. Облако точек: *а)* до фильтрации *б)* после фильтрации

Дискуссия

В результате сканирования ВЗО получена полноценная трехмерная модель купола. Данная модель при наличии ВІМ модели может оперативно и с высокой эффективностью использоваться для подготовки комплекта исполнительной геодезической документации, а также для анализа отклонений (деформации) от проектных параметров. Анализ параметров деформации показан на (рис.7).

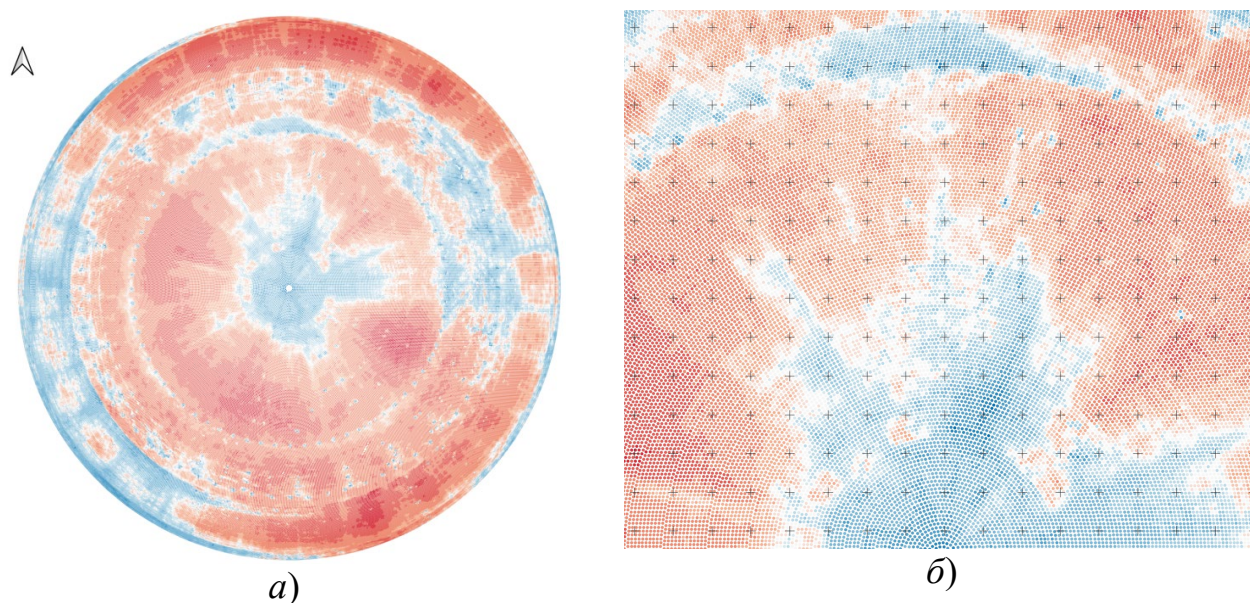


Рис. 7. Картограмма купола (а) и ее фрагмент (б)

Выводы

1. Данные исследования позволяют оперативно и с заданной точностью анализировать массив данных по выявлению деформации ВЗО;
2. Применение данного подхода позволит вносить соответствующие корректировки в технологические процессы по укрупнительной сборке с целью минимизации отклонения действительных геометрических параметров от заданных проектом;
3. Разработана методика построения эталонной модели и регулярной сетки для последующего анализа и сравнения с действительными значениями, полученными по результатам сканирования;
4. В рамках данного исследования разработано программное обеспечение, решающее задачи по строгой математической обработке результатов измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.Н. Яковлев, С.С. Руденко, А.А. Воробьев, А.В. Сугробов, Р.Р. Салимов-Берлинец, Д.Г. Назаров «Вопрос строгой обработки наземного лазерного сканирования при оценке деформации сооружений ядерной энергетики». Известия Вузов геодезия и аэрофотосъемка УДК 528.3.

2. Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий. 2009. 261 с. ISBN 978-5-87693-336-2.

3. Комиссаров, А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий: дис. ...д-ра технических наук. 25.00.34 "Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия". 2016. 278 с.

4. В.И. Медведев, Д.С. Сарычев, А.В. Скворцов. Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud / // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 2(3). – С. 67-74.

5. Шуршин, К.Ю. Проведение инженерно-геодезических изысканий объектов топливно-энергетического комплекса с использованием технологий мобильного лазерного сканирования и тепловизионной съемки // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 3(28). С. 10-13.

@ Н. Н. Яковлев, Д. Г. Назаров, 2026