

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CYCLONE

Анатолий Геннадьевич Неволин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: agentagn@mail.ru

Татьяна Михайловна Медведская

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: mtm2112@yandex.ru

Рассмотрена методика определения геометрических параметров крупногабаритных промышленных объектов цилиндрической формы на основе анализа их трехмерных моделей, полученных с помощью программного комплекса Cyclone. Несмотря на то, что рассматриваемое программное обеспечение предназначено для обработки результатов лазерного сканирования, оно также применимо для обработки и анализа геодезических измерений, полученных электронным тахеометром. Для проверки корректности работы Cyclone выполнен сравнительный анализ экспериментальных и реальных моделей промышленных объектов. Исследование показало, что точность аппроксимации средствами программы Cyclone сопоставима с ошибками измерений. В статье приведен пример обработки результатов геодезического мониторинга вращающейся печи обжига № 6 АО «Искитимцемент». Предложенная методика трехмерного моделирования может применяться для определения геометрических параметров обжиговых печей, РВС, гидрогенераторов, круговых кранов и других промышленных объектов по геодезическим данным, полученным с помощью электронного тахеометра в безотражательном режиме.

Ключевые слова: 3D-моделирование, деформационный анализ, объекты цилиндрической формы, аппроксимированный объект, средняя квадратическая ошибка, геометрические параметры промышленного объекта.

3D MODELING OF LARGE-SIZE INDUSTRIAL MACHINES BY MEANS OF A SOFTWARE COMPLEX CYCLONE

Anatoly G. Nevolin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: agentagn@mail.ru

Tatiana M. Medvedskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: mtm2112@yandex.ru

The technique of application of the software complex Cyclone to determine the geometric parameters of large industrial objects of cylindrical shape based on the analysis of their three-dimensional computer models. Despite the fact that the software is designed to work with laser

scanning data, it is also suitable for processing and analysis of geodetic measurements obtained by the electronic total station in non-reflective mode. To check the correctness of the work of Cyclone in the program simulated experimental models that allow you to check the accuracy of the construction of objects by means of the program. The performed studies have shown that the errors of the approximation results obtained by the program and their deviations from the design values do not exceed the random errors of measurements performed by geodetic instruments (or comparable to the accuracy of such measurements). The article provides an example of processing the results of geodetic monitoring of the kiln. The proposed method of analysis of three-dimensional models can be used to determine the geometric parameters of kilns, RVS, RGS, hydro generators, circular cranes and other similar industrial facilities using electronic total stations.

Key words: 3D modeling, deformation analysis, cylindrical objects, approximated object, mean square error, geometrical parameters of industrial object.

Введение

В настоящее время определение и анализ геометрических параметров крупногабаритных промышленных агрегатов (обжиговых печей, сушилок барабанного типа, объектов нефтедобычи и др.) выполняются на основе различных методик и современных программно-аппаратных средств, что неоднократно освещалось в научных публикациях [1–20] и др.

Целью данной статьи является применение трехмерного моделирования для определения геометрических параметров обжиговых печей, нефтеналивных резервуаров (РГС), гидрогенераторов и других подобных промышленных объектов.

В этом случае предлагается выполнять деформационный мониторинг перечисленных выше объектов на основе трехмерного моделирования с применением программного комплекса Cyclone фирмы Leica Geosystems. Cyclone позволяет также автоматизировать обработку и анализ геопространственных данных, полученных с помощью электронных тахеометров.

В статье выполнено исследование на предмет корректности работы данного программного обеспечения и обоснована возможность определения деформаций крупногабаритных промышленных объектов по их 3D-моделям при минимальном количестве измерений.

Методы и материалы

Для экспериментальных исследований средствами программы Cyclone, построена модель объекта (модель 1) – цилиндр диаметром равным 5 м и длиной 10 м. Аналитически были определены координаты двенадцати точек, расположенных по двум крайним образующим. Данные координаты приняты как исходные (проектные) для построения модели объекта. Путем аппроксимации, на основе функции встраивания в заданную область, получена твердотельная модель по двенадцати точкам. Точность встраивания объекта в область, заданную исходными координатами, оказалась 100 %. Длина оси полученной модели и ее диаметр также соответствуют исходным параметрам.

Анализ тестовой модели показал, что аппроксимация в Cyclone также без-
ошибочна в случае встраивания по шести точкам, расположенным с одной сто-
роны цилиндра. Возможность такого моделирования позволяет осуществлять
съемку объекта только с одной стороны в случае плохого доступа к нему. По-
добные ситуации возникают, например, при определении положения осей
опорных роликов при мониторинге вращающихся агрегатов (сушильных и об-
жиговых печей).

Для анализа корректности работы программы по аппроксимации цилинд-
рических объектов была исследована модель 2 с измененными координатами
для шести точек. В результате автоматического встраивания в область точек с
новыми координатами, получен аппроксимированный объект длиной 10.003 м
и диаметром по правой (верхней) образующей, равным 4.992 м.

Средняя квадратическая ошибка (СКО) встраивания объекта средствами
Cyclone в область, заданную координатами двенадцатью точками, составила
5 мм. Максимальная абсолютная ошибка при этом равна 7 мм.

В таблице представлены итоги определения параметров исследуемых объек-
тов, полученных в ПО Cyclone и формулам, предложенным авторами статьи [1].

$$r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{\left\{ (x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (z_j - z_o)^2 \right\}}, \quad (1)$$

где r – радиус аппроксимирующей окружности;

x_i, y_i, z_i – координаты точки i на поверхности агрегата цилиндрической
формы;

x_o, y_o, z_o – координаты центра сглаживающей окружности на заданном се-
чении объекта.

$$x_o = \frac{[x]}{n}; \quad y_o = \frac{[y]}{n}; \quad z_o = \frac{[z]}{n}, \quad (2)$$

где n – количество измерений.

Геометрические параметры экспериментальной модели 2

Пояс цилиндра для мо- дели II	Результаты вычисления по программе Cyclone (мм)				Результаты вычисления по формулам авторов (мм)					
	координаты центра окружности			ра- диус, r	длина оси цилиндра, S	координаты центра окружности			ра- диус, r	длина оси цилиндра, S
	x_o	y_o	z_o			x_o	y_o	z_o		
Нижний (левый)	-2	0	-2	2 496	10 003	0	0	0	2 500	10 003
Верхний (правый)	4	4	10 001	2 496		0	0	10 000	2 493	

Наибольшее отклонение координат центральных точек (см. таблицу), вычисленных программным путем, от вычисленных по формулам, представленным в статье [1], составило 4 мм.

Необходимо отметить, что ошибки результатов аппроксимации, полученные в Cусlone и их отклонения от проектных величин, не превышают случайных ошибок измерений, выполняемых электронным тахеометром.

При условии, что точность определения координат точек на поверхности объекта, полученных с помощью электронного тахеометра в безотражательном режиме, составляет 5 мм, тогда СКО (m_r) определения радиуса (r) аппроксимирующей окружности в заданном сечении цилиндра, вычисленная по формуле (3) при $n = 6$, оказалась равной 0.3 мм.

$$m_r^2 = \frac{1}{r^2 n^4} \left\{ \sum_{j=1}^n (x_j - x_o)^2 m_x^2 + \sum_{j=1}^n (y_j - y_o)^2 m_y^2 + \sum_{j=1}^n (z_j - z_o)^2 m_z^2 \right\}, \quad (3)$$

где m_x , m_y , m_z – средние квадратические ошибки определения координат точек.

Далее рассмотрим оценку точности длины осевой линии объекта цилиндрической формы, заданной координатами центральных точек. Для определения $m_{s_{ij}}$ ошибки определения длины осевой линии имеем [1]:

$$m_{s_{ij}}^2 = \frac{1}{S_{ij}^2} \left(\Delta x_{ji}^2 (m_{x_i}^2 + m_{x_j}^2) + \Delta y_{ji}^2 (m_{y_i}^2 + m_{y_j}^2) + \Delta z_{ji}^2 (m_{z_i}^2 + m_{z_j}^2) \right). \quad (4)$$

где S_{ij} – длина осевой линии;

x_i, y_i, z_i и x_j, y_j, z_j – координаты центральных точек i и j .

Полагая, что ошибки положения центральных точек i и j одинаковые и составляют некоторую величину m , тогда формула (4) примет вид:

$$m_{s_{ij}} = m\sqrt{2}. \quad (5)$$

Формула (5) является упрощенной по сравнению с формулой (4), что соответственно приведет к приближенным результатам.

Если принять, что средние квадратические ошибки определения координат точек $m_{x_i} = m_{y_i} = m_{z_i} = 5$ мм, то ошибку определения координат центральной точки кругового сечения, вычисляемую по шести измерениям, можно считать равной 2 мм. Тогда общая средняя квадратическая погрешность определения центра сглаживающей окружности равна

$$M_o = \sqrt{m_{x_o}^2 + m_{y_o}^2 + m_{z_o}^2} = 3.5 \text{ мм}. \quad (6)$$

Таким образом, ошибка $m_{s_{ij}}$ длины оси вращения агрегата при $m = 3.5$ мм, полученная по формуле (5), будет равна $m_{s_{ij}} = 3.5\sqrt{2} \approx 4.9$ мм.

Для более полного анализа точности длин осевых линий объектов рекомендуется использовать более строгую формулу (4). Это позволит также получить корректную оценку взаимного положения центров тяжести цилиндра в заданных сечениях.

Одним из важных геометрических параметров обжиговой печи является пространственное положение оси вращения, заданное центральными точками сечения цилиндра. Пространственное положение оси вращения объекта можно установить по ошибкам взаимного положения точек i и j , образующих данную ось.

Погрешность взаимного положения центральных точек цилиндра можно определить по следующей формуле [1]:

$$M^{\Delta} = \sqrt{(m^2_{x_i} + m^2_{x_j}) + (m^2_{y_i} + m^2_{y_j}) + (m^2_{z_i} + m^2_{z_j})}, \quad (7)$$

где M^{Δ} – ошибка взаимного положения центральных точек i и j объекта в трехмерном пространстве.

При равноточных значениях координат определяемых точек имеем: $m_{x_i} = m_{x_j} = m_{y_i} = m_{y_j} = m_{z_i} = m_{z_j} = m$.

Тогда получим упрощенную формулу для априорной оценки точности пространственного положения осевой линии рассматриваемого объекта

$$M^{\Delta} = m\sqrt{6}. \quad (8)$$

Отсюда погрешность взаимного положения центральных точек i и j цилиндра при заданных выше параметрах, составит 8.6 мм.

Полученное значение 8.6 мм является суммарной ошибкой взаимного положения точек i и j , обусловленной погрешностями длины и направления оси вращения объекта.

Результаты

По результатам геодезического мониторинга обжиговой печи № 6 АО «Искитимцемент» построена трехмерная модель обечайки с помощью программы Cyclone, приведенная на рис. 1.

Средняя квадратическая погрешность встраивания обечайки по 12 точкам, расположенным с одной стороны объекта, составила 6 мм. При этом средний радиус встроеного цилиндра на длине 9.403 м оказался равным 2.279 м. Фактическое среднее значение радиуса, полученное независимо в специальном программном комплексе «Визир 3D» [17], равно 2.275 м.

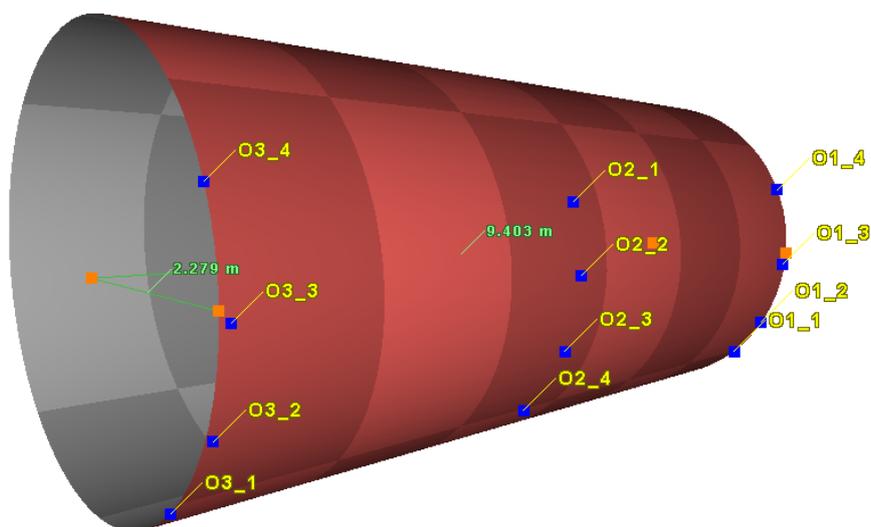


Рис. 1. Модель обечайки обжиговой печи АО «Искитимцемент»

На рис. 2 представлена модель бандажа обжиговой машины, полученная с помощью Cyclone.

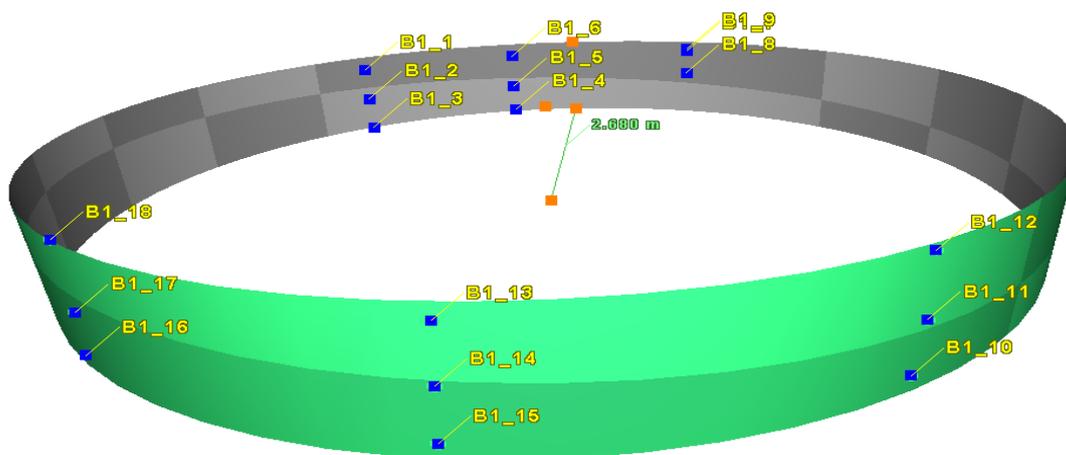


Рис. 2. Модель бандажа № 8 обжиговой машины

Для построения бандажа использовались 18 точек, определенных с помощью электронного тахеометра Leica TM30.

В результате моделирования бандажа с помощью Cyclone получен средний радиус встроенного цилиндра, равный $r = 2.680$ м. Средняя квадратическая ошибка встраивания цилиндра по 18 точкам оказалась равной 2 мм.

Согласно геометрическим параметрам, рассчитанным д.т.н., профессором А. А. Шоломицким с помощью специального программного модуля «Визир 3D», радиус бандажа равен 2.686 м. Расхождение составило 6 мм.

Все это подтверждает состоятельность предложенной методики для обработки результатов геодезического мониторинга промышленных агрегатов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что программный комплекс Cyclone, предназначенный для работы с данными лазерного сканирования, также подходит для обработки и анализа геодезических измерений, полученных электронным тахеометром в безотражательном режиме. Для проверки корректности работы программы были построены экспериментальные модели, которые позволили проверить точность моделирования объектов средствами данной программы при минимальном количестве измерений. Анализ моделей цилиндрической формы показал, что ошибки результатов аппроксимации, полученные средствами ПО Cyclone, сопоставимы с точностью измерений.

Таким образом, предложенная методика трехмерного моделирования может применяться для определения геометрических параметров обжиговых печей, РВС, РГС, гидрогенераторов, круговых кранов и других подобных промышленных объектов с применением ПО Cyclone и электронных тахеометров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неволин А. Г., Медведская Т. М. Анализ точности геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы по результатам геодезических измерений // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 13–24
2. Неволин А. Г., Медведская Т. М. Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 13–19.
3. Асташенков Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования. – М. : Недра, 1986. – 151 с.
4. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, В. А. Середович, А. В. Середович, Г. Н. Ткачева, С. С. Студенков // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С. 12–14.
5. Поклад Г. Г., Гриднев С. П. Геодезия : учеб. пособие для вузов. – М. : Академический проект, 2007. – 592 с.
6. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Фролов И. С. Геодезический мониторинг и выверка металлургического оборудования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 132–143.
7. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Фролов И. С. Новая технология определения геометрических и кинематических параметров вращающихся печей в процессе их эксплуатации // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. Зб. наук. праць. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 1 (21). – С. 125–130.
8. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24) – С. 12–19.
9. Жуков Б. Н. Роль, теория и практика геодезического контроля технического состояния зданий и сооружений // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 11–117.
10. Никонов А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–54.

11. Фолькер Швигер, Ли Чжан, Йюрген Швейцер. Оценка качества инженерно-геодезических работ в строительстве // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 25–45.
12. Хорошилов В. С. Оптимизация выбора методов и средств геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 117–125.
13. Точность определения геометрических параметров вращающихся агрегатов при «холодной» выверке / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Середович, А. А. Лунев // Материалы международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», г. Владивосток, 14–18 сентября 2015 г., Научное электронное издание ФГАОУ ВПО «ДВФУ», 2015. – С. 245–249.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
15. Уставич Г. А. Геодезия. В 2-х кн. Кн. 1 : учебник для вузов. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 352 с.
16. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.
17. Влияние нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения / А. А. Шоломицкий, П. С. Ковалев, Т. М. Медведская, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 18–26.
18. Асташенков Г. Г., Барлиани А. Г., Колмогоров В. Г. Коррелятная версия уравнивания и оценки точности геодезических сетей с равномерно измеренными величинами методом псевдооптимизации // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36) – С. 52–65.
19. Kai Zheng, Yun Zhang, Lei Liu, Chen Zhao. An Online Straightness Deviation Measurement Method of Rotary Kiln Cylinder // Tehnički vjesnik. – 2017. – № 24 (5). – P. 1297–1305. DOI: doi.org/10.17559/TV-20150426160032.
20. Kai Zheng, Yun Zhang, Chen Zhao and Lei Liu. Rotary Kiln Cylinder Deformation Measurement and Feature Extraction Based on EMD Method // Engineering Letters. – 2015. – № 23 (4). – P. 283–291.

© А. Г. Неволин, Т. М. Медведская, 2019