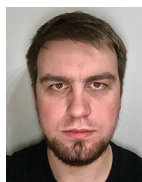


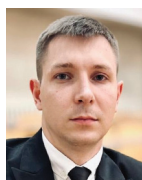
Бесконтактное определение деформированного состояния элементов конструкций технологического оборудования портов



А. Ю. Ганшкевич,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Водные пути,
порты и портовое оборудо-
вание» Академии водного
транспорта Российского
университета транспор-
та (РУТ (МИИТ))



Н. М. Стоянов,
аспирант кафедры «Вод-
ные пути, порты и порто-
вое оборудование» Акаде-
мии водного транспорта
РУТ (МИИТ),



Н. С. Шихов,
старший преподаватель
кафедры «Механизация,
автоматизация и робо-
тизация строительства»
Национального исследо-
вательского Московского
государственного строи-
тельного университета

Исследования в области применения фотограмметрии при измерении деформаций элементов стальных конструкций подъемных сооружений позволили оценить их точность, дать рекомендации по нормированию допустимых значений погрешностей измерений, предложить методические подходы к решению проблем, которые возникают при изучении деформированного состояния конструкции.

В настоящее время активно развиваются методы контроля и мониторинга технического состояния объектов различного назначения с применением беспилотных технологий. Для этого применяются методы, основанные на фото- и видеофиксации, в том числе фотограмметрия. Наибольшее применение она нашла в строительстве и геодезии, однако все чаще применяется и при контроле состояния объектов транспорта. Опубликованные результаты применения фотограмметрии [1–6] подтверждают возможность не только визуального, но и измерительного контроля зданий [1], сооружений [2] и других объектов [3–6], а также их элементов.

Приводится анализ теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся авторами на протяжении ряда лет и направленных на создание методики фотограмметрического измерения деформаций конструкций подъемных сооружений и внедрения ее в практику экспертизы промышленной безопасности [6, 7]. Исследования проводились для целого ряда объектов:

- порталные краны «Альбатрос» и «Альбрехт» в АО «Северный порт» (Москва);
- плавучий кран КПл-16–30, принадлежащий ООО «Экос-Г» (Москва);
- порталный кран «Сокол» и вагоноопрокидыватель № 2 в АО «Торговый

порт Посыет» (Приморский край, пос. Посыет);

- контейнерные перегружатели KONE в АО «Ванинский морской торговый порт» (Хабаровский край, пос. Ванино);
- мобильные краны Sennebogen и их грузозахватные устройства в порту Логпром, Кстово (Нижегородская обл., г. Кстово).

Все фотограмметрические измерения, проводимые в рамках коммерческих работ (экспертиза промышленной безопасности, техническое диагностирование), дублировались либо непосредственным измерением (рулетка, штангенциркуль, толщиномер), либо тахеометрической съемкой.

Целью исследований является разработка методики дистанционного контроля и мониторинга деформированного состояния конструкций технологического оборудования портов без необходимости длительного простоя техники и применения дорогостоящего оборудования. В идеальном варианте съемка выполняется без выезда на объект экспертов на основе фото- или видеоматериалов, подготовленных заказчиком экспертизы.

Самым серьезным препятствием для внедрения фотограмметрического измерения деформаций в практику технических обследований и экспертизы промышленной безопасности является отсутствие нормативной базы и апроби-



Рис. 1. Калибровочные метки на тяге противовеса портального крана «Альбатрос»

рованных методик съемки и обработки результатов. Также на практике применение фотограмметрии для измерения деформаций металлоконструкций сталкивается с недоверием со стороны заказчиков и надзорных органов, которое связано прежде всего с сомнением в точности получаемых результатов.

При этом требования к точности измерения величины прогибов и деформаций в существующих нормативных документах по проведению экспертизы промышленной безопасности подъемных сооружений¹ отсутствуют. Некоторые требования к точности измерений геометрических параметров мостовых и козловых кранов можно найти в соответствующих стандартах. Так, ГОСТ 29266 устанавливает допустимое значение относительной погрешности 1 %, что, по мнению авторов, является неоправданно жестким условием для целей технического диагностирования. В ГОСТ 27584 «Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия» и ГОСТ 25251 «Краны козловые электрические. Методы испытаний» рекомендуется использовать допустимое значение погрешности 10 % при определении прогиба конструкции. В работе авторы руко-

водствовались допустимым значением погрешности, равным 10 %.

Полагаем, что методически правильный подход к нормированию допустимой погрешности демонстрирует действующая «Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов» Федеральной службы геодезии и картографии России. В ней допустимая погрешность нормируется в зависимости от требуемой разрешающей способности карт. Аналогичный подход считаем необходимо применять и для определения допускаемой погрешности при измерении деформаций металлоконструкций. В этом случае разрешающая способность и допускаемая погрешность должны зависеть от размеров и формы деформированного участка и/или от величины допускаемого прогиба.

Традиционно для оценки величин деформаций металлоконструкций технологического оборудования портов используются методы инструментально-оптического контроля или тахеометрическая съемка. В основном подходы, применяемые при инструментально-оптическом контроле, одинаковы.

Создается идеальная прямая (струна, оптическая ось нивелира или теодолита, лазерный луч) или плоскость (образуемая поворотом оптической оси вокруг вертикальной оси прибора), относительно которой линейкой или рейкой измеря-

ются смещения конструкции в заранее определенных точках. При тахеометрической съемке определяются координаты точек, принадлежащих конструкции на основе измерения вертикального и горизонтального углов и расстояния до точки наведения.

На практике достаточным основанием подтверждения точности измерений для заказчика или надзорных органов является наличие паспорта измерительного прибора с указанием его погрешности, свидетельства о периодической поверке (калибровки) измерительного прибора и удостоверения, подтверждающего квалификацию сотрудника, проводившего измерения. При этом надо иметь в виду, что фактическая ошибка измерения зависит не только от погрешности прибора, но и от случайных и субъективных погрешностей, возникающих в результате неточности установки и центрирования прибора [8], ветровых воздействий на элементы конструкции, величины натяжения струны, ошибки считывания и т. п. Для тахеометрической съемки ошибка складывается из линейной и угловой погрешности измерения, погрешностей установки, наведения и т. д. [9–11].

Таким образом, оценка полной погрешности измерения требует достаточно сложных математических вычислений и на практике обычно не выполняется. В таких условиях наиболее оптимальным является прямой контроль точности, выполняемый сравнением значений определенных размеров конструкции, полученных разными методами измерения [1, 9, 11].

К недостаткам указанных методов можно отнести длительное время простоя техники (из-за необходимости подготовки площадки, организации доступа к измеряемому элементу), упрощенную геометрическую модель элемента конструкции вследствие большой дискрет-



Рис. 2. Калибровочные шаблоны на грейфере мобильного крана Sennebogen



Рис. 3. Магнитные линейки в качестве шаблонов на балке портала контейнерного перегружателя KONE

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (с изменениями на 22 января 2024 года), руководящие документы серии РД-10–112.

ности сети точек съемки, применение в процессе съемки дорогостоящего оборудования с участием соответствующего квалифицированного специалиста.

Ошибки, возможные при фотограмметрических измерениях, подразделяют на пять групп: ошибки снимка, измерительного прибора (программные), опознавания точек, методики обработки и опорных точек [12]. Величины этих ошибок зависят от целого ряда факторов: характеристики камеры и объектива, режима съемки, освещенности, перекрытия снимков, атмосферных явлений и др. Причем большая часть этих факторов будет изменяться от снимка к снимку. Как показывает практика [7, 12, 13], при неблагоприятной комбинации внешних условий погрешность фотограмметрических измерений может достигать значительной величины.

Учитывая большое количество случайных факторов, оценка погрешности фотограмметрических измерений расчетным методом оказывается еще более сложной, чем для других методов контроля, а в некоторых случаях и вовсе не представляется возможной [13, 14]. Авторы считают, что при фотограмметрических измерениях оценку точности следует выполнять путем сравнения размеров построенной пространственной модели измеряемого объекта или его части с контрольными размерами, полученными прямыми измерениями, тахеометрической съемкой либо из иных, заслуживающих доверия, источников.

Авторами предложена и успешно применяется методика проведения из-

мерений, включающая следующие этапы: подготовительный, съемочный, первичную обработку, детализацию, построение модели. Подготовительный этап включает в себя изучение объекта съемки, измерение (при возможности) характерных контрольных размеров, нанесение меток (рис. 1) или калибровочных шаблонов (рис. 2) для последующей калибровки и контроля модели, разработку технологии съемки. Метки и шаблоны наносятся по возможности краской с помощью трафарета, что позволяет в дальнейшем осуществлять мониторинг состояния конструкции с обеспечением единства измерений.

При разовой съемке в качестве калибровочных и контрольных шаблонов могут без потери точности использоваться подручные элементы известных размеров (рис. 3).

Съемочный этап представляет собой непосредственно съемку объекта в соответствии с разработанной технологией. Первичная обработка включает в себя проверку качества и количества снимков, построение облака точек, калибровку модели на основе меток или шаблонов, первичную оценку точности на основе контрольных меток или размеров. На этом этапе использовались программы 3DF Zephyr и Agisoft Metashape. Важно отметить, что оценку точности по контрольным меткам или шаблонам необходимо выполнять раздельно по двум (для плоских элементов) или трем (для объемных элементов) направлениям.

Оценка средней погрешности измерений выполнялась по формуле

$$\Delta = 100 \% \cdot N^{-1} \sum_{i=1}^N (|Lc_i - Lm_i| / Lc_i),$$

где N — количество контрольных размеров;

Lc_i — значение i -го контрольного размера, полученное непосредственным измерением или тахеометрической съемкой;

Lm_i — значение i -го контрольного размера модели после ее калибровки.

Детализация включает в себя разбивку объекта съемки на отдельные поверхности, аппроксимацию этих поверхностей подходящей функцией, статистическую оценку погрешности построения поверхности, анализ вида распределения отклонения точек от аппроксимирующей поверхности, фильтрацию облака точек. Анализ формы распределения отклонения точек от аппроксимирующей поверхности позволяет выявить и отфильтровать различные детали, расположенные на поверхностях объекта съемки: электрокабели, рукава высокого давления, навесное оборудование (распределительные коробки, датчики приборов и устройств безопасности), ограждения и т. п.

На рис. 4, а в качестве примера показано распределение отклонений точек от плоскости при незначительной деформации поверхности рейки, а на рис. 4, б — распределение отклонений от плоскости при наличии на контролируемом участке рейки кронштейна крепления кабеля. На рис. 4, б отчетливо видна вторая мода распределения, соответствующая точкам кронштейна крепления кабеля.

Выполнение этого этапа может потребовать нескольких итераций. Для аппроксимации поверхностей и статистической обработки результатов использовались разработанные авторами программы на языке Python.

Построение модели включает в себя моделирование объекта целиком или его части на основе полученных на предыдущем этапе аппроксимирующих поверхностей. Моделирование выполнялось в программах NanoCAD и Autodesk Inventor. По его результатам проводилась оценка средней погрешности измерений сравнением характерных размеров объекта контроля с модельными значениями тех же размеров по формуле

$$\delta = 100 \% \cdot n^{-1} \sum_{j=1}^n (|L_j - Lm_j| / L_j),$$

где n — количество характерных размеров;

L_j — значение j -го характерного размера, полученное непосредственным измерением;

Lm_j — значение j -го характерного размера модели.

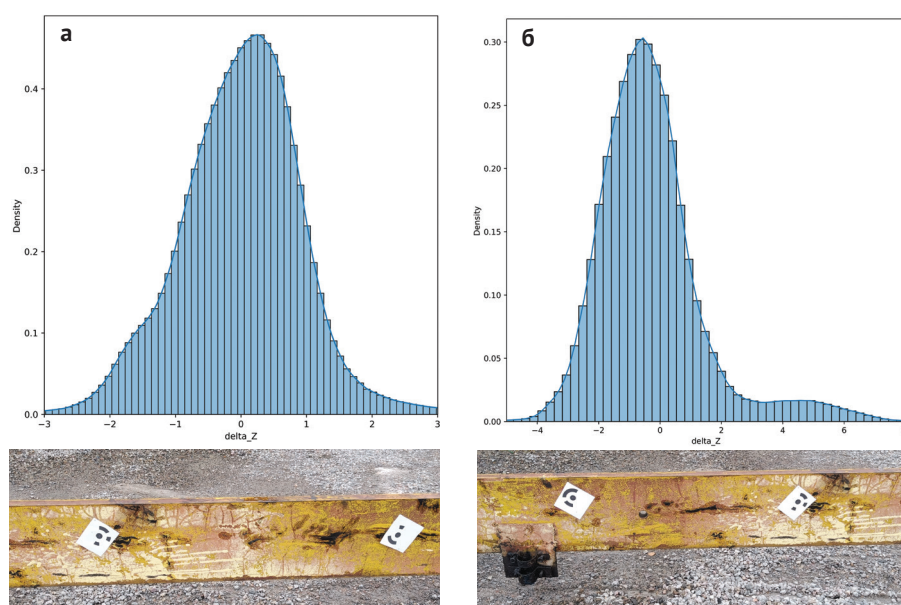


Рис. 4. Распределение отклонений точек от аппроксимирующей плоскости при отсутствии выступающих частей (а) и при наличии кронштейна кабеля (б)

Оценка погрешности измерения объектов контроля

Объект контроля	Цель выполнения замера	Средняя погрешность измерения, %	
		по контрольным точкам, Δ	по непосредственному измерению, δ
Тяга противовеса portalного крана «Альбатрос»	Оценка прогиба тяги в горизонтальном направлении	4,2	3,9
Гидравлический грейфер мобильного крана Sennebogen	Моделирование грейфера для оценки прочности и разработки проекта модернизации	6,3	5,1
Продольная балка портала контейнерного перегружателя KONE	Оценка величины местной деформации для проверки работоспособности балки	2,6	3,2

Результаты оценки погрешности приведены в *таблице*.

Как видно из *таблицы*, погрешность измерения не превышает 10 % при различных методах ее определения. Полученный результат позволяет сделать вывод: фотограмметрический метод контроля деформированного состояния конструкций подъемных сооружений при методически правильных подходах позволяет проводить измерения с высокой точностью. При этом его большим преимуществом является высокая плотность точек при описании измеряемых поверхностей, что позволяет получать модели высокого разрешения. Такие модели требуются при оценке влияния местных деформаций конструкции на трещиностойкость и усталостную прочность.

Таким образом, фотограмметрия при наличии соответствующих методических разработок может стать мощным инструментом оценки и мониторинга деформированного состояния конструкций различных транспортных объектов, в том числе портовой инфраструктуры. При этом для внедрения фотограмметрических методов контроля деформаций объектов портовой инфраструктуры в практику необходимо разработать нормативные документы. ■

Источники

- Корнев В. В., Орлова Н. С., Улыбин А. В., Федотов С. Д. Строительный контроль зданий и сооружений с применением мультикоптеров и фотограмметрии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 2 (65). С. 40–58.
- Барбасов В. К., Орлов П. Ю., Федорова Е. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования линий электропередачи // Электрические станции. 2016. № 10. С. 31–35.
- Costantino D., Pepe M., Alfio V., Carrieri M. Geomatic Techniques for Monitoring and Verifying of the Wear Condition of the Runways of the Bridge Cranes // ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W18. Pp. 23–30 DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-23-2019.
- Faresin E., Salemi G. Buddhist stela of swat valley: point cloud analysis and interpretation Int // Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2019. Vol. XLII-2/W18. Pp. 31–37. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-31-2019
- Wu Y., Qin Y., Wang Z. et al. A UAV-based visual inspection method for rail surface defects // Applied sciences. 2018. № 8. Pp. 1028. DOI: 10.3390/app8071028
- Ganshkevich A. Yu., Shikhov N. S., Stoyantsov N. M. Estimation of deformations of metal structures of cranes based on photogrammetry // Innovations and Technologies in Construction (BUILDINTECH BIT 2021) Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012061
- Мазурин П. А., Натальин М. А., Ширшина Е. А. Исследование факторов, которые влияют на качество фотограмметрии при техническом диагностировании грузоподъемных машин // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник докладов 27-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ-МГСУ. М.: Изд-во Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 2023.
- Алтынцев М. А., Щербаков И. В., Третьяков С. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для исполнительной съемки железных дорог // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 1. № 1. С. 111–118. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-111-118
- Костюк А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // Гео-Сибирь-2010. 2010. Т. 1. С. 83–87.
- Villanueva J. K. S., Blanco A. C. Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (uav) survey using structure from motion (SfM) // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci., 2019 5th Int. Conf. on Geoinformation Sci. – GeoAdvances 2018, 10–11 October 2018, Casablanca, Morocco. 2018. Pp. 167–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.
- Никонов А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник СГУГиТ. 2015. Вып. 1 (29). С. 43–53
- Данилов В. А., Федоров А. В., Безвершенко Л. С. Сравнение методов фотограмметрии и лазерного сканирования для создания трехмерных моделей объектов и территорий археологических ГИС (на примере археологического раскопа Увекского городища) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19. Вып. 2. С. 72–78. DOI: 10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78
- Краснопевцев Б. В. Фотограмметрия: Учебное пособие. М., 2008.
- Farella E. M., Torresani A., Remondino F. Sparse point cloud filtering based on covariance features // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2019. Vol. XLII-2/W15. Pp. 465–472. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-465-2019.