

УДК. 528.48

**М. И. ЛОБОВ, А. Н. ПЕРЕВАРЮХА, А. С. ЧИРВА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ И ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАЧТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Рассмотрены вопросы применения фотограмметрических методов для определения вертикальности мачтовых сооружений в статическом и в динамическом состояниях. Выполнена оценка точности разработанных методов. Рассмотрен опыт применения трехмерного лазерного сканирования в Украине и за рубежом и возможность его использования для определения геометрических параметров башенных сооружений.

**фотограмметрия, мачты, деформации, исследования**

**Формулировка проблемы.** Развитие сети телевидения и мобильной связи предполагает широкое использование в качестве ретрансляторов и телебашен мачтовых сооружений разной высоты. По конструкции они могут быть комбинированными (железобетонные и металлические), высоты которых не превышают 30-50 м и металлическими, высоты которых колеблются от 50 до 250 м, а отдельные мачты превышают высоту 500 м [1]. Для обеспечения их стабильного положения, вертикальности часто используются оттяжки, количество которых определяется высотой и конструктивными особенностями. Учитывая, что мачтовые сооружения в значительной мере подвержены влиянию внешних условий (ветровая нагрузка, гололед, неравномерный солнечный нагрев, изменение натяжения оттяжек и т.д.), определение их вертикальности или изгибов традиционными способами справедливо только при одновременном измерении с двух станций. В отличие от телебашен, дымовых труб, градирен, мачтовые высотные сооружения больше подвержены динамическим воздействиям, амплитуда колебаний которых может меняться в течение короткого времени. Происходящие колебания оттяжек, изменение их натяжения, вызывает изгиб мачты и смещение верхней части сооружения. Исследования показали, что максимальное напряжение возникает на отметке крепления оттяжек к мачтовому сооружению. Это может вызывать обратимые и необратимые деформации (изгибы).

**Анализ последних исследований и публикаций.** За последние годы значительный прогресс наметился в области применения фотограмметрических, аэрокосмических методов определения деформации сооружения. Значительный вклад в решение этой проблемы внесли Войтенко С. П., Дорожинский А. Л., Куштин И. Ф., Лобанов А. Н., Мигильный С. Г., Сердюков В. М. и другие ученые. Появились новые методы определения деформаций с помощью лазерного сканирования, однако некоторые вопросы требуют дальнейшего совершенствования, особенно при определении деформаций высотных сооружений.

**Целью данной работы** является исследование возможности применения фотограмметрических методов и лазерного сканирования для определения вертикальности мачтовых сооружений как в статическом, так и в динамическом состояниях.

Применение наземной фотограмметрии для определения геометрических параметров высотных сооружений достаточно эффективно в условиях крупных промышленных предприятий, когда на фотоснимках получают одновременное изображение множества высотных объектов. Применение фотограмметрических методов в промышленном и гражданском строительстве, позволяющее в

различных условиях с помощью фототеодолитов определять необходимые параметры сооружений, было обобщено и развито проф. Сердюковым В. М. [2]. Применение данных методов ограничивалось трудоемкостью камеральных работ, требующих применения для фотосъемки специальных приборов и значительного объема полевых геодезических работ, а также специального камерального оборудования.

В инженерной фотограмметрии применяют метод, когда для измерительных целей используют независимо одиночные снимки (фотограмметрический) или стереофотограмметрический метод с использованием стереопар, полученных с разных точек базиса. Фотограмметрический метод целесообразно использовать тогда, когда необходимо определить положение точек сооружения в одной плоскости. В этом случае фотосъемку производят с одной станции. Если съемка выполняется с определенным временным интервалом, это позволяет определить динамическое состояние сооружения или возможные деформации за определенный период.

Применение фотограмметрии одиночного снимка достаточно эффективно с использованием цифровых фотоаппаратов, не требующих трудоемких фотолабораторных работ, и с последующим использованием компьютерных технологий. Данный метод с успехом можно использовать при исполнительной съемке возводимых сооружений или их конструкций, а также при исследовании поведения высоких мачт с оттяжками с целью быстрой и одновременной фиксации их положения, величин провисания оттяжек и их влияния на вертикальность высотных сооружений, определять изгибы и деформации, а также другие быстротекущие процессы. Фотограмметрические методы наиболее экономичны и производительны при большом количестве определяемых точек на сооружении. Определение координат точек сооружения через заданные временные интервалы с помощью снимков, выполненных с одной станции позволяет исследовать высотное сооружение, как в статистическом так и в динамическом состоянии.

Наиболее полно исследовано применение фотограмметрического метода при определении вертикальности дымовых труб промышленных предприятий [3]. Экспериментально установлено, что фотограмметрический метод эффективен при наличии нескольких башенных сооружений. Так, для 8 дымовых труб металлургического завода высотой 100-180 м, экономия времени составляет до 45% (с использованием цифровых фотоаппаратов) по сравнению с геодезическим методом отдельных направлений [4].

Точность определения координат точек высотного сооружения зависит от разрешающей способности фотокамеры, условий съемки, расстояния до определяемого объекта, точности измерений на снимках. Современные фотограмметрические приборы позволяют выполнять измерения на снимках с погрешностью 0,001-0,02 мм. Геодезические координаты определяемых точек сооружения получают переычислением фотограмметрических пространственных координат (при стереофотограмметрическом методе) или определяют только фотограмметрические координаты при определении взаимного положения точек.

Анализ исследований выполненных рядом авторов по точности определения кренов дымовых труб показал, что она зависит от инструментальных погрешностей камеры, качества стекла, из которого изготовлены фотопластинки (при использовании фототеодолитов), деформации фотоэмульсии, погрешностей измерений на стереокомпараторе [5]. Повышение точности измерений деформаций возможно с применением современных цифровых фотокамер, обладающих лучшими разрешающими способностями, особенно когда используются объективы с большим фокусным расстоянием, а для измерений используются высокоточные стереометрографы. Это позволяет определять крен высотного сооружения с погрешностью 4-5 микрон в масштабе снимка, что практически позволяет достичь той же точности, что и при измерении геодезическими методами. При определении отклонений мачтовых сооружений от вертикали по одиночным снимкам, фотографирование следует выполнять не менее чем с 2-3 точек стояния, расположенных на расстоянии от высоты сооружения до 1,5 высоты. Наиболее оптимально расположение станций под углами 80-100° к высотному сооружению. Отклонение мачты определяют измерением координат  $X, Z$  точек сооружения на стереометрографе или стереокомпараторе. Исследования точности определения смещений точек по фотоснимкам показали, что одним из значительных факторов является удаление станции от объекта, т.е. от масштаба снимков. Применение фотоустройства, состоящего из фотоаппарата и длиннофокусного объектива МТО-1000 путем фотографирования марок с разных расстояний позволило определить реальную точность измерения смещений, которое определялось по формуле работы [7]:

$$Q = b \cdot M, \quad (1)$$

где  $b$  – смещение марки, измеренное на одиночном снимке,  $M$  – знаменатель масштаба фотоизображения.

При расстояниях от 100 до 300 м величина определения  $M_q$  колебалась от 2 до 5 мм. Для определения влияния масштаба снимка и расстояния до станции фотографирования применялся двухфакторный дисперсионный анализ, влияние которых устанавливалось по F-критерию. Анализ показал, что влияние расстояния на точность определения смещений значимо. С увеличением масштаба снимка точность определения смещений точек несколько снизилась, что связано с деформацией фотобумаги при увеличении снимков. Зависимость точности определения деформаций сооружений от расстояний при использовании длиннофокусного объектива выражается прямолинейной регрессией вида:

$$M_q = a + bS. \quad (2)$$

Коэффициенты которой определены на основании экспериментальных исследований [7],  $a=0,13$ ,  $b=0,016$ , а уравнение прогнозирования примет вид:

$$M_q = 0,13 + 0,016S \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $S$  – расстояние в метрах.

Ошибка определения  $M_q$  не превышает 0,4 мм. Данное устройство обеспечивает необходимую точность определения смещений точек при расстояниях 150-170 метров. При увеличении расстояний точность снижается за счет качества снимков и горизонтальной рефракции. Устройство можно применить для определения статического состояния высотного сооружения.

Учитывая, что данный метод требует применения особых условий фотографирования определенного объема лабораторных работ, нами были исследованы более эффективные методы с применением современной видеокамеры Panasonic M9000 S-VHS MOVIE с разрешающей способностью 400 точек на дюйм и оптическим увеличением  $12^x$ . В исследованиях использовался стенд с круговой маркой, которой задавалось вращательное движение с радиусами 100, 200, 260 мм и периодом 2-14 секунд, характерным для динамических колебаний башенных сооружений вызванных ветровой нагрузкой, а для исследования колебательного процесса вибрационные перемещения осуществлялись с амплитудой 100 мм [8]. В процессе видеосъемки имитационной марки изображение на видеокассете преобразовывалось в цифровую информацию, дальнейшая обработка которой производилась на компьютере. Координаты центра вращения имитационной марки  $X_u, Y_u$  и координаты центра самой марки  $X_m, Y_m$ , определялись через  $15^\circ$ . По этим данным вычислялся радиус окружности по формуле:

$$R = \sqrt{(X_u - X_m)^2 + (Y_u - Y_m)^2}. \quad (4)$$

Выполняя масштабирование, вычислялся переводной коэффициент:

$$K = \frac{d_\phi}{d}, \quad (5)$$

где  $d_\phi$  – фактический диаметр круговой марки,  $d$  – диаметр этой марки, определенный на мониторе компьютера.

Фактический радиус  $R_\phi$  вращения имитационной марки, являющийся аналогом амплитуды динамических колебаний исследуемого объекта, определяется по формуле:

$$R_\phi = K \cdot R. \quad (6)$$

Оценка точности выполнялась по формуле Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{V_i^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где  $V_i = R_{\phi_i} - R_0$ ,  $R_0$  – эталонный радиус имитационной марки,  $n$  – количество измерений радиуса  $R_\phi$ .

Исследования проводились в разных условиях и на разных расстояниях. При увеличении расстояний более 50 м изображение становится расплывчатым, что не позволяет определять координаты марки с достаточной точностью [8]. На основании многократных исследований была получена регрессионная модель колебательного процесса вида:

$$m = (2,57 + 0,121S + 0,009S^2) \text{ мм}, \quad (8)$$

в которой интервал принят равным 5 м, а предельная величина створа достигала 50 м. Величина погрешностей определения амплитуд колебаний с помощью видеокамеры колебалась от 3 мм (при  $S = 5$  м) до 30 мм (при  $S = 50$  м) и практически может использоваться при исследовании динамического состояния мачт высотой до 50 м.

При исследовании цифровой видеокамерой Soni-235 с оптическим увеличением  $24\times$ , цифровым  $990\times$  и большей разрешающей способностью исследования проводились на базисной линии  $S = 300$  м с шагом 5 м. Погрешности измерений колебались от 4 мм до 42 мм, что позволило получить регрессивную модель колебательного процесса вида:

$$m = (3,908 + 0,0724S + 0,001S^2) \text{ мм}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции равен  $r = 0,98$ , что подтверждает высокое качество аппроксимации.

Анализ результатов исследований показал, что с увеличением оптической характеристики видеокамеры значительно расширяется диапазон измерений, в три раза повышается точность и возможность применения данного способа для исследования высотных сооружений до 200 м. При этом затраты времени на выполнение измерений сокращаются в 2-3 раза по сравнению с геодезическими методами, а стоимость работ на 20-30% [8, 11]. Данная методика была внедрена на исследовании мачтовых сооружений мобильной связи и подтвердила достаточную эффективность.

Учитывая значительные потребности в приборах и методах оперативного определения статического и динамического состояния различных высотных объектов в последние годы появились новые приборы, позволяющие осуществлять трехмерное лазерное сканирование. Подобные работы выполнялись в Киеве, Крыму, Харькове с использованием наземных 3D-сканеров, подтвердивших эффективность их при проведении фасадных съемок и интерьеров памятников архитектуры, изучении деформаций сооружений, решения некоторых градостроительных задач и др. [9, 10, 12]. Однако широкое внедрение данных приборов сдерживается из-за высокой стоимости приборного комплекта (от 70 тыс. до 120 тыс. долларов). В России наземное лазерное сканирование применяется чаще, и количество выполненных проектов исчисляется многими десятками [9]. Основа лазерного трехмерного сканирования – лазерный дальномер. Принцип измерения расстояний до определяемых точек – фиксация времени прохождения луча до объекта и обратно. Точность измерения расстояний 10-15 мм в зависимости от условий измерений и удаления от объекта. Для обеспечения движения лазерного луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях в 3D-сканерах используются вращающиеся призмы и сервоприводы, позволяющие осуществлять развертку луча в вертикальной, а затем горизонтальной плоскостях с заданной угловой величиной (0,1-0,2 градуса). Здания и сооружения могут сканироваться как снаружи, так и внутри, позволяя получить трехмерную модель. Многие 3D-сканеры дополнительно оснащаются цифровыми фотоаппаратами, что позволяет получать фотоснимки объектов, когда геометрический каркас сооружения текстурируется фотографиями. Результат сканирования – множество точек, положение которых определяется в сферической системе координат, а затем получают в принятой системе геодезических координат. Для этого одновременно со сканированием необходимо определять координаты каждой станции, как при фототеодолитной съемке, т.е. прокладкой теодолитного хода. Для сшивки сканов необходимо иметь как минимум четыре общие точки, в качестве которых используются характерные точки сооружения или специально замаркированные точки.

Сканирование имеет значительные преимущества по сравнению с тахеометрией, особенно когда сооружение имеет множество криволинейных архитектурных элементов. Лазерное трехмерное сканирование может вполне заменить фототеодолитную съемку, так как требует меньшего объема и трудоемкости камеральных работ, возможность отображения мелких архитектурных деталей, деформаций конструкций и сооружений за счет увеличения разрешения при сканировании. Недостатками сканерной технологии является высокая стоимость оборудования, отсутствие нормативной базы по производству перечисленных работ в Украине и стандартизированных технологий по оценке точности измерений. Результаты немногочисленных исследований в

Швейцарии и Германии по исследованию моделей, отсканированных в лабораторных условиях, позволили предположить о погрешностях  $\pm 0,7-3,6$  мм, хотя в реальных условиях воздействие внешней среды может значительно увеличить эти ошибки.

В настоящее время в Украине выполнено трехмерное сканирование и составлены планы масштаба 1:500 пещер Киево-Печерской Лавры, некоторые работы по сканированию Одесского оперного театра, имеющего большое количество сложных элементов и скульптурных форм, высокоточная фасадная съемка жилого высотного дома в г. Харькове (шаг по стенам составлял 10 см, по балконам – 5 мм), где погрешность измерений не превышала 10 мм, а также съемка фасадов и внутренних помещений реконструируемого магазина ("Мандарин Плаза") в г. Киеве [9, 10].

Анализируя имеющийся опыт применения разных методов определения статического и динамического состояния мачтовых сооружений, можно утверждать, что в зависимости от высоты, условий местности, необходимой точности выбор технологии геодезических работ определяется наличием современного приборного обеспечения. С появлением фотокамер и видеокамер с высоким разрешением возможно применение их для определения кренов и смещений высотных сооружений методом наземной фотограмметрии, что подтверждают исследования последних лет. Значительным преимуществом обладает трехмерное сканирование по сравнению с фототеодолитной съемкой, но 3D-сканирование в настоящее время используется преимущественно в рекламных целях ввиду большой стоимости оборудования, что препятствует широкому внедрению в Украине.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Броверман Г.Б. Строительство мачтовых сооружений. – М.: Стройиздат. – 1970. – 272 с.
2. Сердюков В.М. Фотораграмметрия в промышленном и гражданском строительстве. – М.: 1977. – 245 с.
3. Геодезические работы при выверке сооружений мачтового и башенного типов. – М.: ЦНИИГАиК, обзорная информация. – Вып. 57. – 1981. – 88 с.
4. Соловей П.И. Дослідження точності визначення величини і напрямку крена димових труб з двох ізольованих опорних пунктів // В кн. Удосконалення геодезичних і фотограмметричних робіт. – М., Труби ВАГО. – 1990. – С. 93-97.
5. Чирятыр Н.С. Совершенствование методов наблюдений за деформациями радиомачт. Новосибирск: Трубы НИИГАиК, 1975. – Т. XXXVII. – С. 103-113.
6. Установич Г.А., Пошивайло Я.Г. О применении неметрических цифровых камер для инженерно-геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2005. – №8. – С.19-24.
7. Ламбин Н.Е., Соловей П.И., Даниленко А.Ф., Деркач В.А. Исследование точности определения статических деформаций фотоустройством Ф-1. – М.: Геодезические работы на подрабатываемых территориях, научные трубки ВАГО. – 1987. – С. 77-81.
8. Соловей П.И., Лобов М.И., Переварюха А.Н., Анненков А.А. Исследование точности определения параметров колебательно-вращательного процесса с применением видео и кинокамер. Донецк: ДонНТУ, Материалы международной конференции "Геоинформатика, геодезия, маркшейдерия". – 2003. – С. 116-119.
9. Установич Г.А., Середович В.А., Пошивайло Я.Г., Середович А.В., Иванов А.В. Комбинированный способ создания инженерно-топографических планов масштаба 1:500 промышленных территорий и отдельных промплощадок // Геодезия и картография. – 2009. – №1. – С. 31-37.
10. Установич Г.А., Пошивайло Я.Г. О применении неметрических цифровых камер для инженерно-геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2005. – №8. – С. 19-24.
11. Середович А.В. Методика создания цифровых моделей объектов нефтегазовых промыслов средствами наземного лазерного сканирования: Автореферат дис. к.т.н. – Новосибирск: СГТА. – 2007. – 18 С.

### М. І. ЛОБОВ, А. М. ПЕРЕВАРЮХА, О. С. ЧИРВА ЗАСТОСУВАННЯ НАЗЕМНОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ І ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО СТАНУ ЩОГЛОВИХ СПОРУД

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Розглянуто питання застосування фотограмметричних методів для визначення вертикальності щоглових споруд у статичному та динамічному станах. Виконано оцінку точності розроблених методів. Розглянуто досвід застосування тривимірного лазерного сканування в Україні і за кордоном та можливість його використання для визначення геометричних параметрів баштових споруд.  
**фотограмметрія, щогли, деформації, дослідження**

M. I. LOBOV, A. M. PEREVARYUKHA, O. S. CHIRVA  
APPLICATION OF GROUND PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING FOR  
RESEARCH OF A DYNAMIC STATE OF MAST STRUCTURES  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The questions of application Photogrammetrical methods for determining of vertical position of mast structures in static and dynamic state are considered. The accuracy estimation of the elaborated methods has been carried out. The experience of three-dimensional laser scanning application in Ukraine and abroad and ways of its application for determining geometrical parameters of tower structures as been considered.  
**photogrammetry, mast, deformation, research**

**Лобов Михайло Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Інженерна геодезія" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік академії наук Вищої школи України з проблем будівництва. Наукові інтереси: комплексні геодезичні дослідження деформацій висотних споруд баштового типу.

**Переварюха Анатолій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Інженерна геодезія" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження статичних і динамічних деформацій коливних і обертових об'єктів.

**Чирва Олександр Сергійович** – аспірант кафедри "Інженерна геодезія" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження статичних і динамічних деформацій щоглових споруд.

**Лобов Михаил Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Инженерная геодезия" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик академии наук Высшей школы Украины по проблемам строительства. Научные интересы: комплексные геодезические исследования деформаций высотных сооружений башенного типа.

**Переварюха Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Инженерная геодезия" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций колеблющихся и вращающихся объектов.

**Чирва Александр Сергеевич** – аспирант кафедры "Инженерная геодезия" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций мачтовых сооружений.

**Lobov Michael Ivanovych** – the doctor of engineering sciences, professor, the Head of the "Engineering Geodesy" Chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. The academician of the Academy of Sciences of the Higher school of Ukraine on building problems. Scientific interests: complex geodetic researches of deformations of altitudinal constructions of tower type.

**Perevaryukha Anatoliy Mykolayovych** – a candidate of engineering sciences, assistant professor of the "Engineering Geodesy" Chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of share rotating objects.

**Chirva Olexander Sergeyvych** – a post-graduate student of faculty "Engineering Geodesy" Chair Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of mast structures.