

УДК 528.482

DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1014-12-35-45

Определение геометрических параметров путей мостовых кранов промышленных предприятий координатным методом

© Никонов А. В., 2024

Сибтехэнерго

630032, Россия, Новосибирск, ул. Планировочная, д. 18/1

Сибирский государственный университет геосистем и технологий

630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10

sibte@bk.ru

В статье проанализированы требования нормативных документов, регламентирующих допуски на плано-высотное положение рельсовых путей мостовых кранов. В действующих федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» отсутствует допуск на прямолинейность рельсовой нити, хотя чрезмерное искривление кранового пути в горизонтальной плоскости может приводить к износу колес крана и направляющих, к затруднению свободного перемещения крана. Рассмотрены особенности реализации координатного метода при съемке надземного кранового пути длиной 343 м. Достоинство координатного метода заключается в одновременном получении данных о плано- и высотном положении рельсов и подкрановых конструкций. Приведен порядок обработки результатов съемки в программном обеспечении Microsoft Excel. Предложено по съемочным точкам строить аппроксимирующую прямую, относительно которой контролировать прямолинейность рельсовой нити. Применение координатного метода позволяет отказаться от створных измерений, а геометрическое нивелирование заменить тригонометрическим. С помощью координатного метода можно ускорить процесс контроля геометрии кранового пути

аппроксимирующая прямая, координатный метод, крановый путь, мостовой кран, прямолинейность рельсовой нити, точность, тригонометрическое нивелирование, электронный тахеометр

Для цитирования: Никонов А. В. Определение геометрических параметров путей мостовых кранов промышленных предприятий координатным методом // Геодезия и картография. – 2024. – № 12. – С. 35–45. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1014-12-35-45

Введение

В различных отраслях промышленности применяют подъемные сооружения (грузоподъемные краны разных типов, подъемники, электрические тали и др.) для монтажа тяжеловесного оборудования, обеспечения технологических процессов, погрузки готовой продукции, выполнения ремонтных работ. Мостовые краны – наиболее распространенные средства механизации подъемно-транспортных операций в промышленности. Например, на тепловых электростанциях эксплуатируют мостовые краны в турбинном и

котельном отделениях главного корпуса. К характерным особенностям этих кранов следует отнести значительную протяженность путей и большую грузоподъемность.

Сотрудники специализированных организаций периодически проводят экспертное обследование грузоподъемных машин, их приборов безопасности и крановых путей. По результатам обследования оценивают соответствие объекта предъявляемым к нему требованиям нормативных технических и эксплуатационных документов, после чего составляют заключение экспертизы промыш-

ленной безопасности с указанием возможности или невозможности дальнейшей эксплуатации грузоподъемной машины.

Безопасная эксплуатация кранов мостового типа во многом зависит от устройства и исправности крановых путей. Надземные крановые пути – важная часть промышленного здания. Их преждевременный выход из строя снижает эксплуатационные качества кранов и влечет значительные затраты, связанные с ремонтом путей и приостановкой технологического процесса [12].

Обоснованный вывод о соответствии крановых путей требованиям промышленной безопасности можно сделать по результатам их комплексного технического диагностирования. При этом оценивают геометрические параметры кранового пути (прямолинейность, ширина колеи, продольный и поперечный уклоны), а также физическое состояние рельсовой нити (наличие повреждений рельсов, дефектов на стыках и др.), промежуточных скреплений и подкрановых строительных конструкций. Корректные выводы о состоянии кранового пути могут быть получены при совместном рассмотрении результатов его обследования с данными о взаимодействии пути с ходовыми колесами крана – оценивают износ направляющих пути и ходовых колес крана, фактический пролет крана и др.

Для обеспечения идеальных условий эксплуатации кранов и подкрановых конструкций необходимо, чтобы пути отвечали следующим требованиям [3]:

подкрановые балки горизонтальны и параллельны;

рельсы (направляющие) прямолинейны, параллельны, лежат в одной горизонтальной плоскости;

расстояние между осями рельсов (ширина колеи) соответствует расстоянию между вертикальными осями колес кранов, т. е. рельсы уложены не по паспортному значению ширины колеи крана, а по фактическому [9];

смещение оси рельса с оси подкрановой балки (эксцентриситет) минимально.

Фактическую геометрию кранового пути, т. е. расстояние между осями рельсов, прямолинейность рельсовых нитей, а также

продольные и поперечные уклоны, определяют посредством геодезических методов. Традиционно прямолинейность рельсовой нити контролировали створными измерениями, а высотное положение головок рельсов определяли всеорообразным нивелированием, устанавливая нивелир на подкрановой балке или непосредственно на мосту крана. Расстояние между осями рельсов измеряли стальной рулеткой, на одном конце которой закрепляли упор или струбцину, а натяжение проводили динамометром. Позже стали применять лазерные рулетки, положение которых во время измерения фиксировали специальными устройствами. Классические подходы в определении геометрических параметров кранового пути детально рассмотрены в работах [3, 6, 16].

Появление электронных тахеометров заметно облегчило контроль геометрии крановых путей, позволило одновременно определять плановое и высотное положение рельсов и элементов подкрановых конструкций. Специалисты проявили интерес к возможности использовать тахеометры для съемки планово-высотного положения крановых путей [10, 11, 14, 15, 17]. Так, в статье [14] рассмотрены схемы створных измерений, выполненных при помощи электронного тахеометра. Однако многие из них лишь облегчают обработку результатов измерения прямолинейности пути, но в полной мере не задействуют преимущества координатного метода, который позволяет вообще отказаться от створных измерений. А в работах [10, 11] предложено для выполнения съемки кранового пути устанавливать тахеометр в любом удобном для измерений месте (на полу цеха, на подкрановых конструкциях или на кране) и в условной системе координат определять плановое и высотное положение точек на оси рельсов (направляющих); в статье [15] рекомендовано определять необходимые геометрические параметры кранового пути непосредственно в цехе с записью результатов в журнал либо вычислять ширину колеи крана по теореме косинусов или путем решения обратной геодезической задачи, что весьма трудоемко. Ряд работ посвящен определению оптимальных элементов рихтовки кра-

нового пути [2, 4–8]. Например, в статье [4] при расчете рихтовок рельсов учитывается обеспечение не только их прямолинейности, но и проектной ширины колеи и допустимых эксцентриситетов, а в статье [2] рассматривается применение криволинейных оформляющих (выравнивающих) линий, что особенно актуально для протяженных путей. Опыт обработки результатов съемки крановых путей в современных программных продуктах представлен в работах [10, 11, 17], однако в качестве объекта исследования выбраны краны с небольшой протяженностью пути. В этой связи представляет интерес методика выполнения измерений при контроле геометрии путей мостовых кранов длиной более 100 м.

Анализ требований нормативной литературы

Впервые в СССР Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов утверждены в 1956 г., в дальнейшем их периодически перерабатывали и переиздавали.

В Российской Федерации Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-14-92), утвержденные

Госгортехнадзором России 30 декабря 1992 г., вступили в силу 15 сентября 1993 г., заменив документ, действовавший с 1969 г. Опыт эксплуатации кранов показал, что часть параметров стало необходимо выдерживать более строго, в частности продольный уклон пути, и в то же время допуск на поперечный уклон увеличили почти в 2 раза.

В настоящее время безопасную эксплуатацию грузоподъемных механизмов регламентируют федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (далее – ФНП ПС), утвержденные приказом Ростехнадзора от 26 ноября 2020 г. № 461 и введенные в действие с 1 января 2021 г. (www.pravo.gov.ru, 31 декабря 2020 г., № 0001202012310065).

Предельные значения отклонений рельсового пути от проектного положения в плане и профиле, указанные в вышеперечисленных документах, представлены в таблице.

В действующих ФНП ПС допуски установлены с учетом ширины колеи кранов, но предельные значения остались почти неизменными. Самое существенное изменение,

Требования нормативных документов к плано-высотному положению рельсового пути мостовых кранов

Requirements of reference documents for the planned-elevation position of the overhead cranes track

Показатели	Правила 1969 г.	ПБ 10-14-92	ФНП ПС	ГОСТ Р 56944-2016	
				класс 2	класс 3
Разность отметок головок рельсов в одном поперечном сечении, мм	20 (на опорах); 25 (в пролете)	40	0,002S, но не более 40	±20	±40
Разность отметок рельсов на соседних колоннах, мм	15 ($l \leq 10$ м); 20 ($l > 10$ м)	10	0,0015l, но не более 10 ($l < 10$ м); 20 ($l > 10$ м)	–	–
Сужение или расширение колеи рельсового пути, мм	15	15	0,002S, но не более 15	±16 ($S \leq 16$ м); ± [16 + 0,25 × × ($S - 16$)] ($S > 16$ м)	±25 ($S \leq 16$ м); ± [25 + 0,25 × × ($S - 16$)] ($S > 16$ м)
Отклонение от прямолинейности оси рельса в горизонтальной плоскости в любой точке пути, мм	20 (на участке пути 40 м)	–	–	±20	±40

Примечание. Символы S – пролет крана (ширина колеи); l – шаг колонн.

коснувшееся еще ПБ 10-14-92, – исключение требований к прямолинейности кранового пути, т. е. геометрию рельсового пути стало возможным контролировать двумя приборами: рулеткой измерять ширину колеи, а нивелиром определять высотное положение рельсовых нитей.

Предположение, что отклонение кранового пути от прямой линии при сохранении ширины колеи не влияет на работоспособность крана, – ошибочно. Доказано, что при тангенсе угла отклонения направляющей 0,002 и более поперечное усилие, действующее на колесо, составляет приблизительно 1/5 часть вертикального давления колеса на рельс [9]. Это неизбежно приводит к интенсивному износу реборд колес и рельсов, а повышенные боковые нагрузки вызывают повреждения промежуточных скреплений.

В 2016 г. выпущены два отечественных стандарта (ГОСТ 34020–2016 и ГОСТ Р 56944–2016)¹, в которых изложены конструктивные и эксплуатационные допуски на планово-высотное положение крановых путей в соответствии с международным стандартом ISO 12488-1:2012 (см. таблицу). Данные требования применимы ко всем новым кранам и крановым рельсовым путям. Все допуски разделены на четыре класса, в зависимости от суммарного пути L , проходящего краном за срок службы. Например, класс допуска 2 применим для кранов, проходящих за срок службы от 10 до 50 тыс. км, а класс допуска 3 используется для постоянных рельсовых путей при $L < 10$ тыс. км. Вновь введена норма на отклонение оси рельса от прямой линии, но уже не на участке пути длиной 40 м, а в любой его точке. В то же время в ГОСТ Р 56944–2016 содержится примечание, допускающее не проводить измерение отклонений рельсового пути от прямолинейности, если отсутствуют признаки ускоренного износа реборд ходовых колес и головок рельса, а также участки, где

плавное и свободное перемещение крана затруднено.

В ГОСТ 34020–2016 и ГОСТ Р 56944–2016 не уточняется, как следует задавать прямую при контроле прямолинейности: проводить ее через точки на оси рельса в начале и в конце пути или как-то иначе. Часто крупные электростанции строят в несколько этапов (очередей) с постепенным увеличением длины главного корпуса. При возведении новой очереди разбивочные оси могут быть заданы с некоторым разворотом относительно осей существующей части здания, что в конечном итоге повлияет на положение подкрановых конструкций и на прямолинейность общего кранового пути. Учитывая, что многие крупные тепловые электростанции строили в три-четыре очереди, обеспечение отклонения оси рельсовой нити от прямой в пределах 20 мм (класс допуска 2) при длине пути более 300 м выглядит весьма проблематичным. В подобных случаях следует рассмотреть возможность разделения кранового пути на отдельные участки, на каждом из которых задается своя опорная прямая (алгоритм нахождения ломаных проектных линий изложен в статье [4]), либо применить криволинейные оформляющие линии [2].

Существует ряд геометрических параметров, связанных с положением строительных конструкций, которые нужно фиксировать при планово-высотной съемке кранового пути: смещение оси рельса с оси подкрановой балки, расстояние от выступающих частей крана до колонн здания и нижних поясов ферм; а при обследовании подкрановых конструкций обращают внимание и на смещение балки с опорной поверхности колонны (консоли). Указанные параметры обязательно должны приниматься во внимание при разработке проекта рихтовки кранового пути. Критерии для оценки технического состояния стальных и железобетонных элементов подкрановых конструкций изложены в отраслевом стандарте².

¹ГОСТ 34020–2016. Краны грузоподъемные. Допуски для колес, рельсовых путей кранов и их грузовых тележек. М.: Стандартинформ, 2017. 25 с. ; ГОСТ Р 56944–2016. Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 44 с.

²СТО 17230282.27.010.001–2007. Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния / утв. приказом ОАО РАО «ЕЭС России» от 22 октября 2007 г. № 677. М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2007. 179 с.

Применение координатного метода для определения планово-высотного положения кранового пути

Геодезические измерения на промышленных предприятиях выполняют в условиях внешних воздействий. На электростанциях к ним относятся: вибрация от работы турбоагрегатов и вспомогательного оборудования; запыленность и плохое освещение в цехах, ограничивающие видимость. Кроме того, тепловые потоки от трубопроводов или работающего оборудования искажают положение визирного луча и приводят к размытию изображения визирной цели. Опыт работы на электростанциях показывает, что расстояние от тахеометра до мини-отражателя не должно превышать 75 м. При большей длине визирного луча наведение на отражатель становится неуверенным. Исходя из этого, первую станцию тахеометра нужно выбирать на расстоянии около 60 м от начала кранового пути.

Рассмотрим особенности реализации координатного метода на примере съемки кранового пути в турбинном отделении тепловой электростанции. Длина кранового пути составляет 343 м, шаг колонн 7 м, ширина колеи 19,5 м (рис. 1). Первая станция t_1 выбрана по оси Б, между 10 и 11-й осями, расстояние до постоянного торца главного корпуса составляет 57 м (рис. 2). Ножки штатива опирались на подкрановую балку и примыкающий к ней стальной настил. В работе использован электронный тахеометр Leica TS-06 с паспортной точностью измерения: углов 2", расстояний на призму 1,5 мм.

Необходимо задать условную систему координат таким образом, чтобы исключить отрицательные значения координат, а ось абсцисс была направлена примерно вдоль кранового пути. Для этого на центрах колонн по оси А маркером намечают точки m_1 и m_2 , после чего в режиме кос-

венных измерений определяют горизонтальное проложение между ними ($d = 14,004$ м). Точке m_1 присваивают условные координаты и высоту: $x_{m_1} = 70$, $y_{m_1} = 50$, $H_{m_1} = 15$, а точке m_2 только координаты: $x_{m_2} = x_{m_1} + d = 84,004$, $y_{m_2} = y_{m_1} = 50$. Полученные данные о точках m_1 и m_2 вносят в память тахеометра, после этого выполняют установку станции методом обратной линейно-угловой засечки от этих двух точек, как от исходных. На данном этапе можно считать систему условных координат заданной, а тахеометр готовым к работе.

Далее проводят съемку кранового пути. Согласно ФНП ПС, расстояние между съемочными точками не должно превышать 5 м.



Рис. 1. Общий вид надземного кранового пути

Fig. 1. Overview of overhead crane tracks

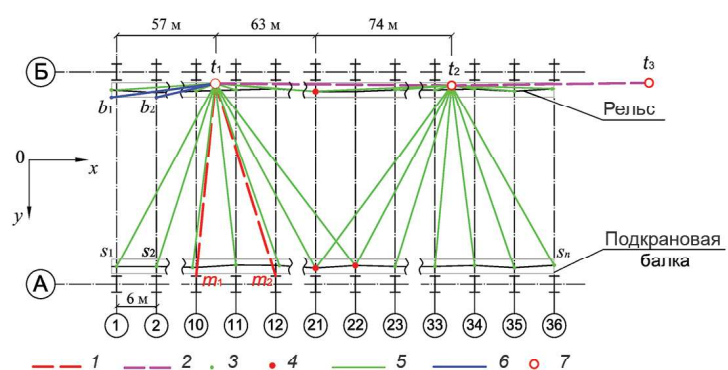


Рис. 2. Схема съемки кранового пути координатным методом:

1 – обратная засечка; 2 – сторона хода; 3, 4 – соответственно съемочная, контрольная точки на оси рельса; 5, 6 – съемка положения соответственно рельса, балки; 7 – точка хода

Fig. 2. Scheme of surveying the crane track by coordinates method:

1 – resection; 2 – traverse line; 3 – survey point on the rail axis; 4 – control point on the rail axis; 5 – survey of the rail position; 6 – survey of the beam position; 7 – traverse point

Иногда при шаге колонн 6 м строгостью этого требования пренебрегают и выбирают съемочные точки напротив колонн (см. рис. 2) [16]. При шаге колонн более 6 м необходимо выбирать съемочные точки и между колоннами. В рассматриваемом примере съемочные точки располагались с шагом 5 м, что контролировали по значению абсцисс на экране тахеометра. С помощью рулетки или специального шаблона определяют точку на оси рельса и устанавливают на нее мини-веху с отражателем, после чего выполняют измерения тахеометром. Съемку ведут поочередно, сначала по одной рельсовой нити, например по оси А, а затем по другой – по оси Б. По каждой рельсовой нити положение последних снимаемых с данной станции двух-трех точек отмечают на рельсе маркером, чтобы съемку этих же точек можно было выполнить повторно с последующей станции (такие точки будем называть контрольными).

Кроме съемочных точек на оси рельса определяют положение подкрановых балок. Для этого отражатель ставят на краю балки, в ее начале и конце (см. рис. 2, точки b_1 и b_2). Ширину балки измеряют рулеткой и сравнивают с проектным значением. Для определения положения оси балки к ординате точки на краю балки прибавляют (для балок по оси Б – отнимают) половину ширины балки. Найденную ординату сравнивают с ординатой съемочной точки на оси рельса, их разница – смещение оси рельса с оси балки.

После того, как с первой станции выполнена съемка положения рельсовых нитей и подкрановых балок по осям А и Б, переходят к определению координат второй станции t_2 . На расстоянии примерно 150 м устанавливают штатив со стандартным отражателем и несколькими приемами (от трех до шести) определяют его координаты. За окончательные координаты и высоту второй станции принимают среднее арифметическое из нескольких приемов. Сохраняя положение штативов, меняют местами тахеометр и отражатель, как это принято делать при работе по трехштативной системе. При установке станции t_2 вводят в память тахеометра полученные осредненные координаты и высоту, а затем выполня-

ют ориентирование относительно отражателя, находящегося на штативе на станции t_1 . Установив станцию, для контроля в режиме «съемка» определяют координаты первой станции, которые не должны отличаться от исходных значений более чем на 2–3 мм. Также в целях контроля выполняют съемку двух-трех съемочных точек на рельсовых нитях, положение которых отмечено маркером и определено с первой станции. Расхождение в координатах контрольных точек, полученных со смежных станций, не должно превышать ± 4 мм. При этом в большей степени следует обращать внимание на соответствие ординат контрольных точек.

Далее съемку рельсов и подкрановых балок ведут со второй станции аналогичным образом. По завершении съемки выполняют контроль стабильности положения штатива путем визирования на отражатель в точке t_1 . Если координаты первой станции и отсчет по горизонтальному кругу остаются неизменными в определенных пределах (не превышают 3 мм и 8" соответственно), то штатив с точки t_1 перемещают вперед, на место станции t_3 .

При работе на станции t_3 мостовые краны будут помехой для съемки завершающей части кранового пути. Для решения этой проблемы необходимо зафиксировать принятую систему координат на колоннах здания. Для этого маркером на колоннах намечают несколько точек, положение которых определяют в безотражательном режиме (для закрепления точек допускается применять пленочные отражатели). Затем тахеометр убирают с подкрановой балки, чтобы краны можно было переместить в начало корпуса и освободить пространство для окончания съемки. Далее тахеометр вновь размещают на штативе, установку станции выполняют методом обратной линейно-угловой засечки относительно закрепленных на колоннах точек (ошибка определения координат станции обычно не превышает 1–2 мм), после чего завершают съемку кранового пути.

Съемку надземного кранового пути длиной 343 м удалось выполнить с трех станций, причем на последней станции прибор устанавливали дважды из-за перемещения

кранов. В рассмотренном примере проложен вытянутый висячий тахеометрический ход. Тем не менее достаточная для поставленной задачи точность геодезического построения достигается многократными измерениями при координировании точек хода. Контролем также служит соответствие в положении общих съемочных точек на оси рельса, которые снимают со смежных станций. Для целей контроля прямолинейности кранового пути в тахеометрическом ходе имеет значение именно поперечная ошибка m_y , обусловленная точностью измерения горизонтальных углов. Предрасчет показывает, что при проложении висячего хода, включающего три точки, где первая принимается за исходную, при длине сторон 150 м и точности измерения углов 2–3" средняя квадратическая ошибка (СКО) ординаты третьей точки хода составит 3–5 мм, чем можно пренебречь.

Если длина кранового пути превышает 350 м, то имеет смысл отказаться от висячего хода и создать опорную сеть в виде замкнутого четырехугольника с выполнением уравнивательных вычислений. Кроме съемки положения рельсовых нитей и подкрановых балок, в безотражательном режиме целесообразно зафиксировать положение граней колонн, элементов нижнего пояса ферм, а также наиболее выступающих частей крана – эта информация должна учитываться при разработке проекта рихтовки пути. Необходимо соблюдать следующие требования ФНП ПС: расстояние от верхней точки крана до нижнего пояса фермы должно быть не менее 100 мм, расстояние от выступающих частей торцов крана до колонн – не менее 60 мм.

Предрасчет точности определения геометрических параметров кранового пути при работе координатным методом

Фактическую ширину колеи S находят как разность ординат съемочных точек, лежащих в одном поперечном сечении. Поскольку координаты обеих съемочных точек определяют с одной станции, то для оценки точности искомой ширины колеи следует использовать СКО не ординат, а их приращений:

$$m_S = \sqrt{m_{\Delta y1}^2 + m_{\Delta y2}^2}, \quad (1)$$

где m_S – СКО определения ширины колеи; $m_{\Delta y1}, m_{\Delta y2}$ – СКО приращений ординат между станцией и съемочными точками 1 и 2 соответственно.

Ошибка приращения ординаты Δy вычисляется по формуле

$$m_{\Delta y} = \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot m_D^2 + D^2 \cos^2 \alpha \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho^2} + m_u^2}, \quad (2)$$

где α – дирекционный угол направления со станции на съемочную точку; m_D – СКО измерения расстояния D от тахеометра до съемочной точки; m_β – СКО задания направления на съемочную точку; ρ – число секунд в радиане, $\rho = 206264,8''$; m_u – СКО установки вехи на точке по оси рельса.

В формуле (2) m_β обусловлена как ошибкой ориентирования прибора при установке станции, так и ошибкой наведения на миниротрагатель. Поскольку ошибка ориентирования прибора для данной станции – величина постоянная, то в предрасчете будем считать, что m_β связана только с ошибкой визирования на цель в условиях цеха. Для съемочных точек вдоль буквенной оси, на которой установлен тахеометр ($\alpha_1 \approx 0^\circ$), первое слагаемое в формуле (2) будет стремиться к нулю, т. е. ошибка измерения расстояния не повлияет на ординату съемочной точки.

Подставляя в формулу (2) значения $\alpha_1 = 0^\circ$, $m_D = 2$ мм, $m_\beta = 5''$, $D = 65$ м, $m_u = 1$ мм, получаем СКО ординаты первой съемочной точки $m_{\Delta y1} = 1,9$ мм. Для второй точки при ширине колеи $S = 19,5$ м дирекционный угол $\alpha_2 = 18^\circ$, а ошибка ординаты также будет $m_{\Delta y2} = 1,9$ мм. Подставляя найденные значения в формулу (1), получаем СКО определения ширины колеи пути $m_S = 2,7$ мм.

Согласно ФНП ПС, допуск на сужение или расширение колеи составляет 15 мм. При переходе от эксплуатационного допуска к допустимой СКО геодезического контроля применяют, как правило, коэффициент 0,2 [13]. Тогда допустимая СКО определения ширины колеи кранового пути равна 3 мм. Расчетное

значение ошибки $m_s = 2,7$ мм не превышает 3 мм, следовательно, координатный метод при $D = 65$ м соответствует по точности заданным требованиям.

Превышение h между двумя съемочными точками определяют из тригонометрического нивелирования, оценку точности которого можно выполнить по формуле [1]

$$m_h = \sqrt{2 \sin^2 v \cdot m_D^2 + \frac{2D^2 m_v^2}{\rho^2}}, \quad (3)$$

где m_h – СКО определения превышения между двумя съемочными точками; v – угол наклона при визировании на мини-отражатель; m_v – СКО измерения угла наклона.

Первое слагаемое подкоренного выражения в формуле (3) при малых углах наклона стремится к нулю. При съемке удаленных точек (50–70 м) угол наклона v не превышает 2° , тогда, подставив в формулу (3) значения $m_D = 2$ мм, $m_v = 5''$, $D = 60$ м и $v = 2^\circ$, получим ошибку превышения $m_h = 2,1$ мм. При съемке точек на расстоянии до 20 м из-за перефокусировки зрительной трубы возможно изменение места нуля тахеометра до $10''$ и увеличение угла наклона до 15° , однако из-за малости расстояний и в таких случаях СКО определения превышения между двумя точками не превысит 2 мм.

Разность отметок рельсов на соседних колоннах, согласно ФНППС, не должна превышать 10 мм, следовательно, допустимая СКО геодезического контроля составит 2 мм. Указанная точность обеспечивается даже широко распространенными тахеометрами с СКО измерения углов наклона $m_v = 5''$.

Обработка результатов измерений

В ходе съемки кранового пути тахеометром получают координаты и высоты точек. Обработку результатов измерений удобно выполнять в программном обеспечении Microsoft Excel, в которое импортируют данные по столбцам (x, y, H). На первом этапе обработки необходимо более точно обеспечить параллельность оси x системы координат и оси рельсов, чем это было сделано при задании условной системы координат в цехе.

Для этого решают обратную геодезическую задачу между первой (x_1, y_1) и последней (x_n, y_n) точками, расположенными на оси рельса. Угол φ_A между рельсом по оси А и осью координат x вычисляют по формуле

$$\varphi_A = \arctg \frac{y_n^A - y_1^A}{x_n^A - x_1^A}.$$

Аналогичным образом находят угол φ_B между рельсом по оси Б и осью x , а далее вычисляют средний угол φ , на который необходимо развернуть оси условной системы координат. В данном примере $\varphi_A = 7' 28''$, $\varphi_B = 7' 30''$, $\varphi = 7' 29''$. Пересчет всех точек проекта в новую систему координат $x'y'$ после разворота координатных осей $xу$ на угол φ осуществляется по формулам

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \varphi - y \sin \varphi, \\ y' &= x \sin \varphi + y \cos \varphi. \end{aligned}$$

Такие параметры, как разность отметок головок рельсов в одном поперечном сечении, разность отметок рельсов на соседних колоннах, отклонение колеи рельсового пути от проектного значения, инструментами Microsoft Excel вычисляют по простым формулам, не требующим пояснения. Наибольший интерес представляет определение прямолинейности рельсовых нитей. Практика показывает, что многие исполнители проводят опорную прямую через точки на оси рельса в начале и в конце кранового пути, но для протяженных путей такое допущение необоснованно. Задание вероятнейших осей рельсов при работе по методу частей створа описано в статье [7]. При реализации координатного метода имеет смысл построить аппроксимирующую съемочные точки прямую, относительно которой в дальнейшем оценивать прямолинейность рельсовой нити. Используя функцию ЛИНЕЙН в Microsoft Excel, можно получить параметры уравнения аппроксимирующей прямой вида $y = kx + b$.

В нашем случае уравнения аппроксимирующих прямых для съемочных точек по осям А и Б:

$$\begin{aligned} y_A &= -0,000091x + 49,328, \\ y_B &= -0,000079x + 29,816. \end{aligned} \quad (4)$$

Числа при абсциссе в уравнениях (4) называются угловыми коэффициентами и равны тангенсу угла между прямой и положительным направлением оси x . Угол разворота прямой составил: $-18,8''$ по оси А, $-16,3''$ по оси Б. Из-за этого расстояние между прямыми в начале и в конце пути равно 19,511 м и 19,508 м. Эти значения вполне соответствуют среднему значению ширины колеи $S_{\text{cp}} = 19,508$ м, которое отличается от проектного значения $S_{\text{пр}} = 19,5$ м в пределах допуска ± 15 мм. В конкретном случае полученной разностью в углах разворота прямых $2,5''$ можно пренебречь.

Для строгости решения следует в уравнениях прямых (4) принять одинаковый средний коэффициент $k_{\text{cp}} = -0,000085$, тем самым обеспечив их параллельность, а изменением вторых слагаемых b добиться расстояния между прямыми, равного фактическому пролету крана или среднему из всех измерений ширины колеи ($S_{\text{cp}} = 19,508$ м), если оно в допуске. В последнем случае уравнения прямых будут иметь вид

$$\begin{aligned} y_A &= -0,000085x + 49,326, \\ y_B &= -0,000085x + 29,818. \end{aligned} \quad (5)$$

При значительной непараллельности аппроксимирующих прямых по осям А и Б одна из прямых может быть принята за опорную, а вторая получена параллельным переносом на величину фактического пролета крана. Возможны изменения параметров обеих аппроксимирующих прямых или разделение кранового пути на отдельные участки с заданием нескольких прямых.

Для наглядности полученных результатов строят графики искривления рельсовых нитей в плане и по высоте (рис. 3).

Для каждой съемочной точки вычисляют отклонение Δ_i от аппроксимирующей прямой по формуле

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b), \quad (6)$$

где x_i, y_i – координаты i -й съемочной точки; k – угловой коэффициент из уравнения аппроксимирующей прямой; b – смещение прямой вдоль оси y .

Например, подставляя координаты ($x = 187,075, y = 49,354$) съемочной точки, расположенной в осях 20–21 (см. рис. 3), в формулу (6) и используя параметры аппроксимирующей прямой для оси А из формулы (5), получаем отклонение оси рельса от прямой $\Delta = 44$ мм.

Если оценить прямолинейность рельсовой нити на 40-метровых участках пути (см. рис. 3, показаны пунктиром), то отклонения не превысят 10 мм, что в пределах допуска ± 20 мм (см. таблицу). В то же время отклонение рельсовой нити относительно аппроксимирующей прямой, построенной по всем съемочным точкам 343-метрового пути, достигает 44 мм. Учитывая зафиксированное стачивание ребордами колес граней направляющих в осях 20–28 здания, можно сделать вывод, что устаревший допуск, регламентирующий оценку прямолинейности на 40-метровых участках пути, не вполне объективен.

Из анализа планового положения рельсовой нити по оси А (см. рис. 3) напрашивается решение по рихтовке пути, заключающейся в смещении рельсовой нити в направлении аппроксимирующей прямой (по оси Б рельсовая нить имеет такое же отклонение от прямой и на первый взгляд нуждается в аналогичном смещении). Однако это приве-

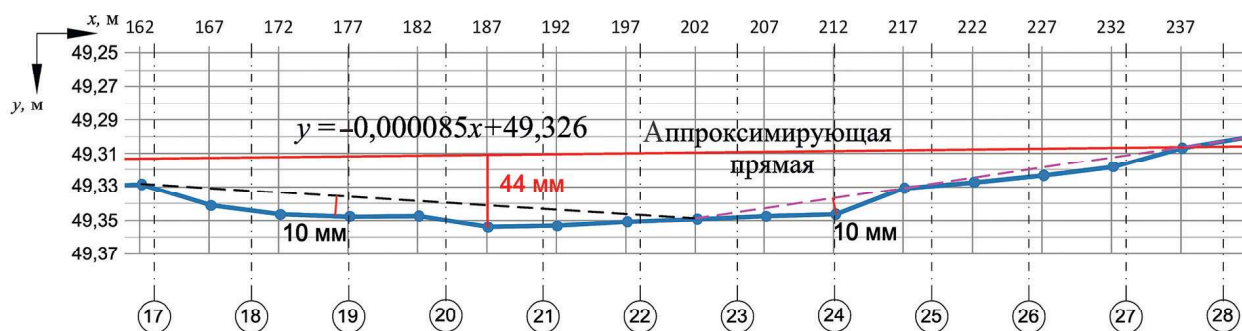


Рис. 3. Фрагмент отклонения рельсовой нити в плане по оси А от аппроксимирующей прямой

Fig. 3. Fragment of deviation of the rail line in plan on axis A from the approximating line

дет к недопустимому смещению оси рельса с оси балки, что должно обосновываться поверочным расчетом несущей способности подкрановых балок³. Перемещение же балок по консоли колонны – процесс крайне трудоемкий, который в отдельных случаях может потребовать наращивания консоли, подрезки колонны с последующим ее усилением, поэтому к перемещению балок прибегают только в самых крайних случаях. На рассматриваемом объекте ширина колеи по всей длине кранового пути соответствует проектному значению 19,5 м в пределах допуска ± 15 мм. Поскольку действующими ФНП ПС такой параметр, как прямолинейность пути, не регламентируется, то формального основания к рихтовке пути в плане нет.

Обсуждение и заключение

Для обеспечения безопасной эксплуатации грузоподъемного крана периодически выполняют комплексное обследование кранового пути, включающее определение планово-высотного положения рельсовых нитей и подкрановых конструкций. Наиболее эффективно выполнить геодезическую съемку кранового пути позволяет координатный метод, суть которого рассмотрена на

³РД 34.21.621–95. Методические указания по рихтовке подкрановых путей в главных корпусах тепловых электростанций / утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 30 марта 1995 г. М.: ОРГРЭС, 1997. 47 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврунев Е. И., Уставич Г. А., Грекова А. О., Никонов А. В., Мелкий В. А., Долгополов Д. В. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2729.
2. Баран П. И., Дульский И. А., Кавунец Д. Н. Определение элементов плановой рихтовки подкрановых путей // Геодезия и картография. – 1991. – № 5. – С. 16–19.
3. Ганьшин В. Н., Репалов И. М. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации подкрановых путей. – М.: Недра, 1980. – 120 с.
4. Дьяков Б. Н. О расчете проектных линий для рихтовки подкрановых путей // Геодезия и картография. – 1990. – № 11. – С. 9–11.
5. Дьяков Б. Н. Обработка высотной съемки подкранового пути // Геодезия и картография. – 1991. – № 9. – С. 29–30.
6. Жарников В. Б., Дьяков Б. Н., Жуков Б. Н. и др. Геодезическое обеспечение эксплуатации промышленных предприятий. – М.: Недра, 1992. – 160 с.

примере работ в турбинном отделении крупной ГРЭС (длина пути 343 м). При оценке прямолинейности рельсовой нити целесообразно в качестве опорной линии принимать аппроксимирующую прямую, построенную по съемочным точкам.

Отметим, что при анализе результатов геодезической съемки должно приниматься во внимание техническое состояние направляющих, промежуточных скреплений и подкрановых балок (наличие повреждений, степень износа головки рельса и др.), а также фактический пролет крана и износ реборд его колес. В отдельных случаях анализируют данные по осадке фундаментов каркаса здания, оценивают крены колонн. При проведении геодезической съемки необходимо фиксировать не только положение самих рельсовых нитей, но и положение подкрановых балок, колонн здания, элементов нижнего пояса ферм, а также наиболее выступающих частей крана. Технически обоснованный проект рихтовки кранового пути может быть составлен только при учете всех исходных данных.

В основу дальнейшего совершенствования координатного метода при съемке крановых путей может быть положено применение автоматизированных электронных тахеометров, особенно с функцией захвата цели, а также использование подвижной каретки с закрепленным на ней отражателем 360°.

7. Жуков Б. Н. Геодезическая съемка подкрановых путей действующих тепловых электростанций // Электрические станции. – 1972. – № 1. – С. 49–52.
8. Жуков Б. Н. Обработка результатов съемки подкрановых путей на ЭВМ // Геодезия и картография. – 1988. – № 5. – С. 57–59.
9. Кузнецов Е. С. Обоснование необходимости рихтовки рельсовых путей кранов мостового типа. URL: <https://clck.ru/3Ffi3S> (дата обращения: 12.10.2024).
10. Михайлов В. И., Скребок Г. В. О методике геодезического контроля подкрановых путей электронным тахеометром // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 3. – С. 27–29.
11. Новоселов Д. Б. Съемка подкрановых путей с применением электронного тахеометра и программного продукта CREDO-DAT // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 147–149.
12. Сероштан В. И., Рахаев В. В. Комплексный контроль за состоянием кранового пути // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 9. – С. 22–27.
13. Сытник В. С. Строительная геодезия. – М.: Недра, 1974. – 136 с.
14. Уставич Г. А., Сальников В. Г., Скрипников В. А., Рябова Н. М., Соболева Е. Л. Совершенствование

программ створных измерений координатным способом // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 78–97.

15. Шеховцов Г. А., Кочетова Э. Ф. Современные методы геодезического контроля подкрановых путей мостовых кранов // Приволжский научный журнал. – 2018. – № 3. – С. 30–40.

16. Шеховцов Г. А. Современные методы геодезического контроля ходовой части и путей мостовых кранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 185 с.

17. Шляхова М. М., Васанов А. Е. Методика обработки данных геодезической съемки рельсовых путей мостовых кранов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1 (139). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.89.

Determining geometric parameters of industrial overhead cranes' tracks through the coordinate method

Nikonov A. V.

Sibtechenergo

630032, Russia, Novosibirsk, Planirovochnaja st., 18/1
Siberian State University of Geosystems and Technologies
630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10
sibte@bk.ru

The article deals with the requirements of regulatory documents as to tolerances for the overhead crane's rail tracks position. The current federal standards and rules "Safety Rules for Hazardous Industrial Facilities Using Lifting Structures" do not provide for tolerances of the straight track, although excessive curvature of the rail can lead to the crane's wheels and guides abrasion, and problems with its free movement. The author considers the features of the coordinate method at surveying an overhead crane way of 343 m long. The advantage of the chosen technique is that it simultaneously obtains data on the planned and elevated position of the rails and under-crane structures. The algorithm for processing the survey results in Microsoft Excel software is given. It is proposed to construct an approximating straight line based on the survey points, relative to which the straightness of the rail is controlled. Using this technology enables abandoning alignment measurements, and substitute geometric leveling for trigonometric one. With that method, it is possible to speed up the process of controlling the crane track's geometry

accuracy, approximating straight line, coordinate method, crane track, overhead crane, straightness of track rail, total station, trigonometric leveling

For citations: Nikonov A. V. (2024) Determining geometric parameters of industrial overhead cranes' tracks through the coordinate method. *Geodezia i Kartografia*, 85 (12), pp. 35–45 (In Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1014-12-35-45

REFERENCES

1. Avrunev E. I., Ustavich G. A., Grekova A. O., Nikonov A. V., Melkii V. A., Dolgoplov D. V. Tekhnologicheskie resheniya v oblasti obespecheniya geoprostranstvennoi informatsii o magistral'nykh truboprovodakh i ob"ektakh ikh infrastruktury. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, 331, 7, pp. 188–201 (In Russian). DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2729.
2. Baran P. I., Dul'sky I. A., Kavunets D. N. (1991) Definition of elements of planned straightening of crane tracks. *Geodezia i Kartografia*, 52 (5), pp. 16–19 (In Russian).
3. Gan'shin V. N., Repalov I. M. Geodezicheskie raboty pri stroitel'stve i ekspluatatsii podkranovykh putei. Moskva: Nedra, 1980, 120 p. (In Russian).
4. D'yakov B. N. (1990) On the calculation of design lines for straightening crane tracks. *Geodezia i Kartografia*, 51 (11), pp. 9–11 (In Russian).
5. D'yakov B. N. (1991) Processing of high-altitude survey of crane runway. *Geodezia i Kartografia*, 52 (9), pp. 29–30 (In Russian).
6. Zharnikov V. B., D'yakov B. N., Zhukov B. N. i dr. Geodezicheskoe obespechenie ekspluatatsii promyshlennykh predpriyatii. Moskva: Nedra, 1992, 160 p. (In Russian).
7. Zhukov B. N. Geodezicheskaya s"emka podkranovykh putei deistvuyushchikh teplovykh elektrostantsii. *Elektricheskie stantsii*, 1972, 1, pp. 49–52 (In Russian).
8. Zhukov N. B. (1988) Processing the results of surveying crane tracks on a computer. *Geodezia i Kartografia*, 49 (5), pp. 57–59 (In Russian).
9. Kuznetsov E. S. Obosnovanie neobkhodimosti riktovki rel'sovykh putei kranov mostovogo tipa. URL: <https://clck.ru/3Ffi3S> (accessed 12.10.2024).
10. Mikhailov V. I., Skrebkov G. V. O metodike geodezicheskogo kontrolya podkranovykh putei elektronnyim takheometrom. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, 3, pp. 27–29 (In Russian).
11. Novoselov D. B. S"emka podkranovykh putei s primeneniem elektronnoho takheometra i programmnoho produkta CREDO-DAT. *Interespo Geo-Sibir'*, 2008, 1, 1, pp. 147–149 (In Russian).
12. Seroshtan V. I., Rakhaev V. V. Kompleksnyi kontrol' za sostoyaniem kranovogo puti. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2008, 9, pp. 22–27 (In Russian).
13. Sytnik V. S. *Stroitel'naya geodeziya*. Moskva: Nedra, 1974, 136 p. (In Russian).
14. Ustavich G. A., Sal'nikov V. G., Skripnikov V. A., Ryabova N. M., Soboleva E. L. Sovershenstvovanie programm stvornykh izmerenii koordinatnym sposobom. *Vestnik SUGiT*, 2020, 25 (2), pp. 78–97 (In Russian).
15. Shekhovtsov G. A., Kochetova E. F. Sovremennye metody geodezicheskogo kontrolya podkranovykh putei mostovykh kranov. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*, 2018, 3, pp. 30–40 (In Russian).
16. Shekhovtsov G. A. Sovremennye metody geodezicheskogo kontrolya khodovoi chasti i putei mostovykh kranov. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. N. Novgorod: NNGASU, 2018, 185 p. (In Russian).
17. Shlyakhova M. M., Vasanov A. E. Metodika obrabotki dannykh geodezicheskoi s"emki rel'sovykh putei mostovykh kranov. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2024, 1 (139). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.89.