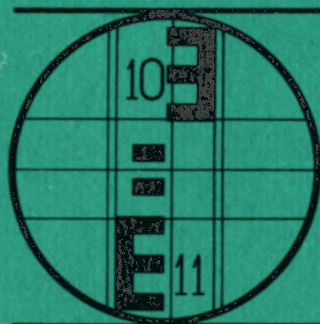


Г. Г. АСТАШЕНКОВ

---

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ  
РАБОТЫ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
КРУПНОГАБАРИТНОГО  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**





Г. Г. АСТАШЕНКОВ

---

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ  
РАБОТЫ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
КРУПНОГАБАРИТНОГО  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**



МОСКВА „НЕДРА“ 1986

---



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В нашей стране постоянно наращиваются производственные мощности в результате строительства новых предприятий, реконструкций старых, введения прогрессивных технологий, создания новых типов агрегатов, технологических линий и т.п. Главное сегодня – изыскать и привести в действие все резервы повышения эффективности производства.

Строительство, монтаж, ремонт и эксплуатация любого инженерного объекта сопровождаются геодезическими измерениями, объем, сложность и ответственность которых постоянно возрастают. Это в полной мере относится и к геодезическому контролю за промышленным оборудованием при эксплуатации. Тенденция выполнять измерения без остановки работающих агрегатов обуславливает развитие нового направления прикладной геодезии – контроля пространственного положения промышленного оборудования в рабочем состоянии без прекращения технологического процесса.

К настоящему времени накоплен большой опыт геодезического обеспечения монтажа оборудования и значительно меньший – геодезического контроля технологического оборудования при его эксплуатации. Поэтому целью данной работы являются обобщение принципиальных вопросов геодезическому контролю крупногабаритного промышленного оборудования при его эксплуатации и выдача рекомендаций по совершенствованию такого контроля.

На первый план были поставлены вопросы организации и проведения геодезического контроля за промышленным оборудованием. Практическая реализация разработок показана лишь на отдельных характерных примерах, что позволило достичь поставленной цели наиболее оптимальным образом. Для рассмотрения современного состояния этих вопросов выбраны в основном крупногабаритные вращающиеся печи.

Интерес геодезистов к вращающимся печам понятен – при диаметрах до 7 м и длинах до 230 м эти агрегаты имеют во время работы большие пластические и упругие деформации и требуют довольно точного контроля пространственного положения опорных элементов.

Практические исследования, результаты которых приведены в данной работе, выполнялись на одном из крупнейших цементных предприятий страны.

При работе над книгой автор руководствовался инструкциями, наставлениями и другими нормативными документами по проведению контрольных измерений технологического оборудования, а также учитывал опыт и рекомендации передовых предприятий, известных ученых и производственников. Автор выражает глубокую признательность проф. Д.А. Кулешову за руководство и ценные замечания, высказанные при подготовке рукописи к изданию.

## Глава 1

# ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО МОНТАЖЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

## § 1. Основные этапы, задачи и методы геодезического контроля

Отличительная черта современного уровня оснащения предприятий промышленным оборудованием – его комплексность и высокая автоматизация. Нормальное и бесперебойное функционирование оборудования во многом обеспечивается высокой точностью изготовления отдельных элементов оборудования, его монтажа и соблюдением требуемого взаимного пространственного положения этих элементов. Потребность в решении задач инструментального контроля в машиностроении привела уже в конце прошлого столетия к созданию специальных методов измерений. Геодезические методы всегда служили в качестве органической составной части комплекса измерений в промышленности.

Увеличение габаритов оборудования, постоянное ужесточение допусков, качественное и количественное изменения конструкторского решения монтажа и эксплуатации агрегатов, поточных автоматических линий, технологических конвейеров и т.п. резко расширили диапазон геодезических работ в промышленности.

Все настойчивее проявляется тенденция постоянного контроля пространственного положения оборудования по время его работы, т.е. без прекращения технологического процесса.

Контроль за пространственным положением технологического оборудования проводится в соответствии с проектом производства работ (ППР) по следующим этапам: 1) периодическая проверка положения основных опорных узлов при монтаже; 2) исполнительная съемка (контроль) положения оборудования по завершении монтажных работ и после пробных пусков; 3) периодический контроль оборудования при эксплуатации; 4) контроль положения оборудования при его ремонте и реконструкции.

Каждый из этапов геодезических измерений имеет как общие, так и специфические задачи.

При монтаже оборудования основными задачами геодезического обеспечения являются: разбивка монтажных осей оборудования; контроль размеров крупногабаритных деталей, проверка наличия и при необходимости нанесение на них осевых рисок; контроль установки оборудования в проектное положение; исполнительная съемка и составление акта на скрытые работы, т.е. работы по сборке машин и их узлов, по их

выверке и другие работы, которые не могут быть проконтролированы после выполнения последующих операций; наблюдение за осадками и деформациями фундаментов и их основания.

Исполнительная съемка (контроль) смонтированного оборудования включает: проверку и при необходимости восстановление монтажных осей; определение фактического пространственного положения опорных узлов оборудования, формы поверхностей.

Во время эксплуатации выполняют: контроль устойчивости фундаментов путем измерения их колебаний, кренов и осадок; контроль фактических постоянных и кратковременных смещений опорных узлов оборудования относительно фундаментов; определение пространственного положения основных точек, осей и плоскостей работающего оборудования; определение оптимального положения осей оборудования и его рихтовки, а при необходимости и возможности – рихтовку без прекращения технологического процесса.

Ремонт и реконструкция сопровождаются: проверкой сохранившихся монтажных осей или их восстановлением; определением пространственного положения основных точек, осей и плоскостей остановленного оборудования; контролем за пространственным положением заменяемых опорных узлов и элементов; контролем за процессом рихтовки; составлением исполнительных чертежей.

При геодезическом контроле промышленных агрегатов приходится выполнять три специфических вида геодезических измерений: 1) определение размеров отдельных деталей оборудования; 2) определение формы поверхностей деталей; 3) определение взаимного расположения деталей.

Первые два вида измерений позволяют судить о реальных параметрах деталей. Последние измерения являются измерением расстояний, углов и превышений между точками, осями или линиями соответствующих поверхностей, т.е. характеризуют взаимное пространственное положение двух или более деталей.

Методы и средства измерений подробно описаны в работах [6, 24, 36 и 45].

Наиболее часто встречающиеся в промышленном производстве виды, методы и средства не только геодезических, но и физических и машиностроительных измерений представлены в табл. 1. Комбинации физических и машиностроительных методов отнесены к машиностроительным методам (см. графу 4).

Краткий перечень методов и средств измерений в промышленности (см. табл. 1) свидетельствует об их многообразии. Выбор конкретной программы наблюдений зависит от многих факторов: требований к точности измерений, наличия приборов и технологий их производства, внешних условий, сроков наблюдений и т.п.

Следует учесть, что при выборе или разработке технологии измерений предпочтение нужно отдать той, которая обеспечивает большую внешнюю

Таблица 1

## Виды, методы и средства измерений в промышленности

Измерения	Методы и средства измерений		
	геодезические	физические	машиностроительные
1	2	3	4
<i>1. Определение размеров отдельных деталей</i>			
а) габаритов деталей прямоугольной формы	<p>Непосредственный: механические средства измерений – стальные или инварные рулетки, ленты, проволоки, длиннымеры [6]</p> <p>Оптический: параллактический, оптические дальномеры [6]</p>	<p>Радиоактивный: приборы с использованием радиоактивных изотопов [36]</p> <p>Пневматический: приборы с манометром, с ротаметром, пневматические измерительные головки [36]</p>	<p>Механический: плоскопараллельные концевые меры длины, штриховые меры длины; штангенинструменты: штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмусы; микрометрические инструменты – микрометры разных видов [36]</p> <p>Рычажные, зубчатые и пружинные передачи и их сочетания: рычажно-механические приборы: рычажная скоба, рычажный микрометр, индикаторы часового типа, индикаторный глубиномер, индикаторная скоба, нутромеры, рычажные индикаторные головки высокой точности [36]</p> <p>Оптико-механический и оптический: рычажно-оптические приборы (вертикальный и горизонтальный оптиметры), измерительные машины, оптические длиннымеры, измерительные микроскопы, универсальные координатные измерительные приборы, катетомеры [36]</p> <p>Интерференционные: бесконтактные и контактные интерферометры [36].</p> <p>Электрический: электроконтактные приборы, индуктивные приборы [36]</p> <p>Комбинированный: индикаторы, тензометры, экстензометры, дистометры [6], [45]</p> <p>Оптический: интерферометры [45]</p>
б) изменения длины	<p>Непосредственный: механические средства – измерительные ленты</p>	<p>Электрический: индуктивные датчики, электронные уровни, емкостные датчики, частотные датчики колебания струн [45]</p>	

Измерения	Методы и средства измерений		
	геодезические	физические	машиностроительные
1	2	3	4
в) диаметров	<p>триангуляция: теодолит, рулетка [36]</p> <p>Метод подобных треугольников: теодолит, рейка с инварной полоской</p> <p>Метод вспомогательного базиса: рулетка, подвижной оптический прибор вертикального проектирования [31]</p>		<p>Прямой метод: штангенциркули, нутромеры, дуговые или линейные скобы [36]</p> <p>Косвенный метод опоясыванием: стальные или инварные рулетки и ленты [36]</p> <p>Косвенный метод измерением по хорде и высоте сегмента: накладные приборные ездки</p> <p>Косвенный метод обкаткой мерным роликом: приборы типа ИП, АИД Красноярского сельхозинта, ОП-6 Челябинского завода "Инструментальщик", ИБД Львовского политехникума [24]</p> <p>Механический: регулируемый угольник, угломер с нулем [6, 36]</p> <p>Оптический: оптический угломер, оптическая делительная головка, оптический делительный стол, накладные угломерные приборы [6, 36]</p>
г) углов и превышения	<p>Оптический: теодолит, нивелир [6]</p>		

## 2. Определение формы поверхностей деталей

а) овальности	<p>Оптический: подвижной оптический прибор вертикального проектирования [31]</p>	<p>Механоэлектрический: струны, электрические датчики, записывающие устройства [31]</p>	<p>Механический: микрометры, штангенциркули [36]</p>
б) огранки			<p>Рычажные, пружинные передачи, пневматический метод: различные приспособления с использованием закрепительных колец, колодок, призм, калибровочных колец, индикаторов [36]</p>
в) нецилиндричности (бочкообразности, вогнутости, изогнутости, конусности)	См. п. 2а		<p>Механический: индикаторы [36], биениемеры [24, 36], профилографы [24], деформациографы [24]</p>

Измерения	Методы и средства измерений		
	геодезические	физические	машиностроительные
1	2	3	4
г) отклонения поверхности детали от прямолинейности и плоскостности	<p>Оптический: теодолит, нивелир, алиниометр [6]</p> <p>Гидростатический: гидростатические нивелиры</p> <p>Нивелирование: рамные уровни, микро nivelеры [36]</p> <p>Струнный: струна, микроскоп [6]</p> <p>Оптический: микротелескопы, оптическая струна, плоскостопы</p> <p>Коллиматорный: коллиматоры [6, 29, 36]</p> <p>Автоколлиматорный: автоколлиматоры [6, 29, 36]</p>	<p>Электрический: электронные уровни, профилографы [6]</p>	<p>Механический: линейки, шупы, концевые меры, индикаторы "Пятен на краску": линейка, краска, поверочные плиты [36]</p> <p>Световой щели: лекальная линейка, образцы просвета [36]</p>
<i>3. Определение взаимного расположения деталей</i>			
а) биения и эксцентриситета	<p>Оптический: см. п. 2а, способ малых углов [31]</p>	<p>Механоэлектрический: струна, датчики, записывающие устройства [31]</p>	<p>Механический: рейсмусы</p> <p>Рычажные, зубчатые, пружинные передачи и их сочетания: индикаторы [36], биениемеры [24, 29]</p>
б) вертикальности	<p>Непосредственный: механические средства – отвесы, рейки - отвесы [6]</p> <p>Оптический: приборы вертикального проектирования</p>		
в) отклонений от параллельности и перпендикулярности плоскостей	<p>Непосредственный: механические средства – струна, отвесы [24, 31]</p> <p>Оптический: стру-</p>		<p>Рычажные, зубчатые, пружинные передачи и их сочетания; индикаторы на специальных плитах, стойках [36]</p> <p>Механический: угловые плиты и треугольники, угломеры [29, 36]</p>

Измерения	Методы и средства измерений		
	геодезические	физические	машиностроительные
1	2	3	4
г) расстояний, непараллельности, неперпендикулярности, несоосности, перекоса отверстий, валов	<p>ны и приборы вертикального проектирования [6], теодолит, нивелир</p> <p>Коллимационный и автоколлимационный: коллиматоры, автоколлимационные теодолиты и нивелиры [6, 36]</p> <p>Струнный: струна, приборы механической и оптической регистрации ее положения, электрические преобразователи, геодезические струнные системы [6]</p> <p>Оптический: теодолит, нивелир, рейки, рулетки, лазерные створфиксаторы, приспособления для горизонтального и вертикального смещения приборов и визирных целей, для подсветки уровня, сетки нитей и штрихов рейки [6, 31]</p> <p>Автоколлимационный: автоколлимационные теодолиты [6, 23]</p>		<p>Механический: штангенциркули, микрометры, концевые меры длины, специальные контрольно-измерительные приспособления [29, 36]</p> <p>Комбинированный: валики, площадки треугольников с уровнями, индикаторы [36], линейки, угловые плиты, индикаторные приспособления [24, 36]</p> <p>Коллиматорный и автоколлимационный: коллиматоры и автоколлиматоры, гониометры, оптиметры, спектрометры, оптическая скамья [6, 23, 29, 36, 37]</p>
д) пространственных форм и взаимного расположения деталей	<p>Фотограмметрический: способы и приборы фотограмметрии [30]</p>		

эффективность [44], т.е. эффективность, обеспечивающую максимальную отдачу при монтаже и эксплуатации оборудования. Внутренняя эффективность, т.е. эффективность геодезических измерений, может и отсутствовать, но решающим должно стать соотношение внешней и внутренней эффективности, которое обычно бывает в пользу внешней.

Задача автоматизации процесса контроля, выверки и рихтовки оборудования остается одной из главных проблем промышленного производства. Известно, что под автоматизацией измерений, в том числе и геодезических, понимается создание и применение технических средств, при помощи которых без вмешательства человека осуществляется самостоятельное управление и контроль замкнутого процесса производства по заданным алгоритмам. В прикладной геодезии, в частности применяемой в машинстроении, особенно при монтаже и эксплуатации широко распространенного оборудования, в лучшем случае можно говорить лишь о частичной автоматизации и механизации. Основные элементы геодезических измерений – получение информации, ее обработки и использование – находятся на различных ступенях развития. Поэтому прогресс в автоматизации геодезических измерений требует новых экономических, технических и технологических решений.

## § 2. Методы установки промышленного оборудования

С точки зрения точности установки оборудования в проектное положение промышленное оборудование можно разделить на три группы:

1. Оборудование, агрегаты и узлы которого устанавливаются в линии, связанные общим технологическим процессом, требующее высокой точности установки для обеспечения его нормальной работы.

2. Оборудование, агрегаты и узлы которого устанавливаются в линии, связанные общим технологическим процессом, но допускающее меньшую, относительно требований к оборудованию в п. 1, точность установки.

3. Оборудование, не имеющее непосредственной технологической связи с другим оборудованием в общей цепи технологического процесса.

При этом геодезический контроль служит геометрической, основой процесса выверки.

Способы установки и выверки оборудования на фундаментах предусматриваются в проекте производства работ (ППР) проектной организации. Под выверкой следует понимать "... процесс введения оборудования в положение, предусмотренное проектом, с помощью грузоподъемных средств и специальных выверочных и центровочных приспособлений". [13].

Выверку оборудования производят в плане, по высоте и горизонтальности (вертикальности). Если предусмотрена технологическая связь с ранее смонтированным оборудованием, то обеспечиваются соосность

установленных и монтируемых агрегатов, взаимная перпендикулярность или параллельность их осей.

В результате выверки оборудование должно быть установлено в проектное положение с отклонениями, не превышающими допусков, указанных в заводской технической документации и инструкции на монтаж.

Если оборудование будет закреплено фундаментными болтами, то предварительную его установку в плане производят опусканием оборудования на фундамент таким образом, чтобы фундаментные болты вошли в соответствующие отверстия в опорной части оборудования.

Окончательную установку оборудования выполняют относительно монтажных осей перемещением его грузоподъемными машинами, домкратами или другими приспособлениями, при этом контролируют положение монтируемого оборудования относительно смежного, уже установленного оборудования.

Контроль по высоте осуществляется нивелированием относительно рабочих реперов, закрепленных на фундаментах, а также относительно ранее установленных машин, с которыми монтируемое оборудование связано кинематически или технологически.

В некоторых случаях, например при монтаже оборудования прокатных цехов, вращающихся печей, один из узлов оборудования, установленных на фундамент, принимают за базовый, опорный, и все остальные узлы технологической линии или агрегата выверяют относительно него. В свою очередь, опорными базами самих узлов оборудования являются специальные площадки на корпусных деталях, наружные поверхности валов, соединительных полумуфт, направляющих разъемные поверхности корпусов деталей и т.п.

При выверке оборудование передает свой вес на фундаменты либо через всю нижнюю площадку опирания, либо через опорные элементы. Такими опорными элементами могут быть: пакеты металлических прокладок, регулировочные болты, установочные гайки фундаментных болтов, инвентарные домкраты, жесткие опоры.

Необходимо стремиться к минимальному числу опорных элементов. В то же время следует обеспечить устойчивость положения оборудования при его установке и исключить недопустимые прогибы опорных частей под действием массы оборудования и усилий предварительной затяжки болтов.

В простейшем случае, при установке оборудования непосредственно на пол, выполняют контроль горизонтальности пола, установки оборудования и контроль его положения в плане.

### *Выверка оборудования на пакетах металлических прокладок*

Площадки фундамента, на которые будут укладывать прокладки, обрабатывают таким образом, чтобы подкладки устанавливались без качания. Суммарная площадь пакетов прокладок должна быть не меньше

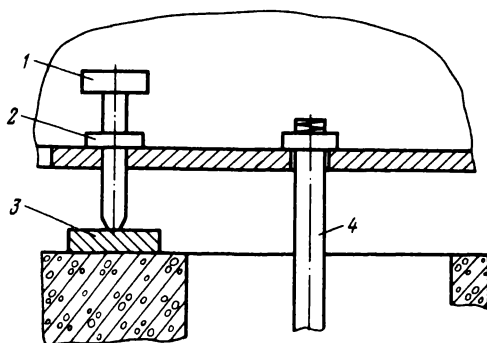
15-кратной площади всех фундаментных болтов. В каждом пакете должно быть не более пяти подкладок, из них две-три — установочные, остальные — регулировочные. Допускаемый уклон поверхности фундамента под пакетом прокладок, их размеры регламентируются для каждого вида оборудования в соответствующих нормативных документах. Так, например, при монтаже теплообменных и выпарных аппаратов [14] допускаемый уклон поверхности фундамента под пакетами прокладок составляет не более 3 мм на 1 м, толщина основных прокладок должна быть не менее 5 мм, регулировочных — не менее 0,5 мм.

При выверке оборудования на клиновых подкладках последние устанавливают на одну-две установочные подкладки и высоту пакета подбирают с занижением на 2–3 мм от проектной отметки низа основания узла оборудования. Доведение отметки низа основания узла до проектной осуществляют подбивкой верхнего клина. Длина клиновых подкладок должна быть больше длины установочных, клиновидность обычно равна 3–4°.

### *Выверка оборудования на регулировочных болтах*

Общий порядок монтажа оборудования с регулировочными болтами следующий:

а) укладка на фундаменты упорных пластин в соответствии с расположением регулировочных болтов (рис. 1); площадки, на которые укладывают пластины, должны быть выровнены с соблюдением горизонтальности. Допуски на горизонтальность площадок опирания и размеры пластин указаны в нормативной литературе. Например, при установке оборудования прокатных цехов [16] при диаметре болтов 20 мм пластины должны иметь размер 60x60x8 мм, при диаметре 48 мм — 140x140x16 мм и т.д.;



**Рис. 1. Схема устройства с регулировочным болтом:**

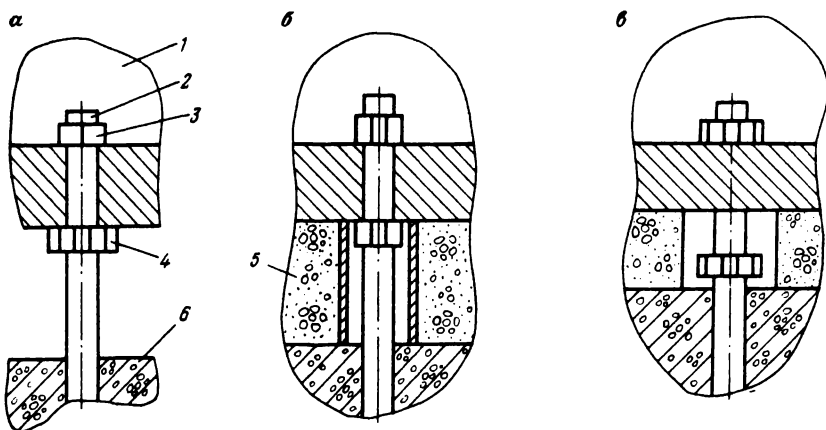
1 — регулировочный болт; 2 — контргайка; 3 — упорная пластина; 4 — анкерный болт

б) установка оборудования по осям в плане производится при минимальном выпуске регулировочных болтов. Затем вращением регулировочных болтов выверяют оборудование по высоте и в горизонтальной плоскости.

Установленное и выверенное оборудование должно опираться на все регулировочные болты, что контролируется шупом. Положение болтов фиксируется контргайками. Затем устанавливают опалубку, после окончания подливки до затвердения бетонной смеси выполняют контрольную проверку положения оборудования.

#### *Выверка оборудования на установочных гайках фундаментных болтов*

Существуют две разновидности такого монтажа: непосредственно на установочных гайках, на установочных гайках с использованием упругих элементов.

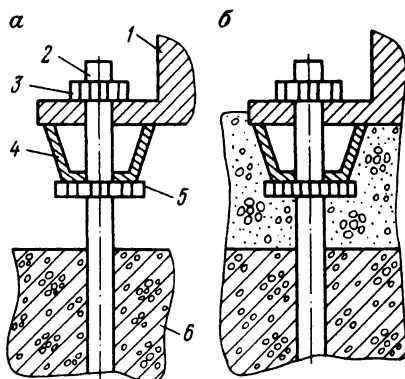


**Рис. 2.** Схема выверки оборудования непосредственно на установочных гайках:

1 – опорная часть оборудования; 2 – фундаментный болт; 3 – крепежная гайка фундаментного болта; 4 – установочная гайка; 5 – опалубка фундаментного болта; 6 – фундамент

**Рис. 3.** Схема выверки оборудования на установочных гайках при помощи упругих элементов:

1 – опорная часть оборудования; 2 – фундаментный болт; 3 – крепежная гайка фундаментного болта; 4 – тарельчатая шайба; 5 – установочная гайка; 6 – фундамент



В первом случае порядок монтажа такой: выверяют оборудование при помощи установочных гаек (рис. 2, а); устанавливают опалубки по периметру фундамента, а также вокруг фундаментного болта и осуществляют подливку оборудования бетонной смесью (рис. 2, б); снимают опалубку после затвердения бетонной смеси и подвинчивают установочную гайку для образования зазора между ней и основанием оборудования (рис. 2, в); закрепляют оборудование на фундаментах затяжкой крепежных гаек.

Во втором случае при монтаже на установочных гайках с использованием упругих элементов выполняют следующие работы: выверяют оборудование при помощи крепежной гайки за счет сжатия упругого элемента (рис. 3, а) (упругими элементами могут быть металлические тарельчатые шайбы, резиновые или пластмассовые шайбы); проводят подливку оборудования бетонной смесью; закрепляют оборудование на фундаментах затяжкой крепежных гаек (рис. 3, б).

#### *Выверка оборудования при помощи инвентарных домкратов*

При этом способе установки оборудования используют винтовые, клиновые, гидравлические и другие домкраты. Выбор вида домкрата зависит от требуемой точности, безопасности и удобства выполнения работ.

Вначале на фундаменте размечают места установки домкратов, которые выравнивают в соответствии с нормативными допусками для данного оборудования. Затем на эти подготовленные площадки фундамента устанавливают домкраты и с необходимой точностью выводят на проектную отметку. Оборудование опускают на домкраты и устанавливают в проектное положение регулировкой домкратов, после чего делается частичная затяжка гаек анкерных болтов.

Проводят установку опалубки и подливку бетонной смеси, после затвердения последней опалубку удаляют и окончательно затягивают гайки фундаментных болтов.

#### *Выверка оборудования на жестких опорах*

На жестких опорах может быть смонтировано любое оборудование, устанавливаемое на бетонных или железобетонных фундаментах. Эти опоры изготавливают с той же точностью, что и точность установки оборудования по высоте и горизонтальности.

Для повышения точности изготовления жестких опор в верхней части сооружаемого фундамента устанавливают закладные металлические детали с механически обработанной поверхностью — металлические пластины, отрезки швеллеров, двутавров, фундаментные металлические плиты или рамы.

К установке закладных деталей предъявляются высокие требования, поэтому контроль их высотного положения и горизонтальности выполняют точным или высокоточным нивелированием и накладными уровнями соответствующей точности.

Правильно изготовленные жесткие опоры при условии учета конкретных размеров поступившего на монтажную площадку оборудования должны обеспечить непосредственную установку опорных узлов агрегатов на эти опоры. Однако в случае деформации закладных деталей опор при бетонировании или неравномерных осадок фундаментов при монтаже и эксплуатации положение устанавливаемого оборудования требует корректировки.

Выверку оборудования на жестких опорах осуществляют по одной из следующих схем [37]:

а) способом последовательных приближений, когда периодически контролируют и юстируют положение оборудования посредством прокладок или домкратов. Поскольку при такой схеме юстировка положения оборудования производится без контроля величины исправительных перемещений, то требуется несколько этапов контрольных и регулировочных работ, что весьма неэкономично;

б) выведение оборудования в проектное положение путем перемещения опорных точек на заданную высоту способом горизонта инструмента (обычно нивелира) по аналогии с широко применяемой в строительстве задачей вынесения в натуру точки с проектной отметкой. Преимущество этого способа по сравнению с предыдущим – постоянный геодезический контроль за высотным перемещением оборудования;

в) выведение оборудования в проектное положение с постоянным контролем машиностроительными средствами (например, индикаторными устройствами и шаблонами, накладными уровнями с разнесенной базой и т.п., расположенными в соответствующих контролируемых точках). Величины смещений рассчитывают по результатам предварительно выполненного геодезического контроля. Оборудование перемещают до такого положения, при котором на контрольных устройствах будут проектные показания.

Эта схема оптимальная, так как позволяет выполнять монтажные работы без проведения постоянного геодезического контроля и в то же время обеспечивает четкую картину положения оборудования на любой момент установки.

Таким образом, оптимальная последовательность монтажа оборудования следующая: 1) выверка оборудования в плане и по высоте; 2) корректировка по высоте, 3) корректировка в плане, 4) исполнительная съемка положения оборудования.

### § 3. Машиностроительные допуски и точность геодезических работ

Цель геодезических измерений при монтаже и эксплуатации технологического промышленного оборудования – обеспечение точности установки и контроля пространственного положения осей и плоскостей агрегатов, предусмотренной проектом, т.е. обеспечение так называемого геометрического качества. Поэтому возникает тесная взаимосвязь между геодезическими и монтажными работами, между геодезистом, машиностроителем, технологом, монтажником, механиком. Лишь полное взаимопонимание этих специалистов может служить основой достижения высокого геометрического качества установки и работы промышленного оборудования.

Предпочтительными характеристиками геометрического качества установки оборудования считаются предельные отклонения от номинального значения параметра.

Предельные отклонения регламентируются нормативными документами [10–20; 22; 28], их также указывают на чертежах заводов-изготовителей. Количество таких допустимых отклонений довольно значительно. Приведем диапазоны предельных отклонений для наиболее распространенных видов технологического оборудования, объединенных по точности монтажа агрегатов в три условные группы (табл. 2).

Эти величины служат исходными данными для назначения точности измерений. Ошибки измерений либо заранее рассчитывают конструкторы и указывают в нормативной документации или чертежах завода-изготовителя, либо рассчитывают исполнители измерений. Так, например, для относительно небольших размеров деталей (до 500 мм) линейные ошибки стандартизованы [38]. А.Д. Рубиновым [29] установлены допустимые погрешности для измерения деталей размером больше 500 мм. Величины погрешностей зависят от качества (класса точности по ЕСДП СЭВ – единой системе допусков и посадок для стран – членов СЭВ) и колеблются в пределах 20–40 % от допусков на размер детали.

Однако в большинстве случаев, особенно для крупногабаритного оборудования, ошибки геодезических измерений, за редким исключением [31], не регламентируются. К тому же и вопрос о некоторых машиностроительных допусках представляется спорным и требует доработки [21]. Поэтому при организации геодезического контроля за промышленным оборудованием могут возникнуть следующие ситуации:

1. Ошибки измерений установлены нормативными документами или указаны в чертежах завода-изготовителя. Для обеспечения требуемой точности измерений исполнителю остается лишь выбрать оптимальную технологию измерений, исходя из наличия приборов, условий измерений, сроков и т.д.

2. Ошибки измерений не регламентированы нормативными докумен-

Таблица 2

Предельные отклонения при установке основного технологического оборудования промышленных предприятий

Группа и оборудование	Величины предельных отклонений, мм			
	размера, формы	в плане	по высоте	от вертикальной
<i>1-я группа</i>				
Бумаго- и картоноделательные машины [11]: фундаментные шины, базовый вал, плоско- и круглосеточная часть, напорный ящик, прессовая часть, сушильная часть, машинный каландр, накат; размольное оборудование [33]; газотурбинные установки [12]; оборудование текстильной промышленности [10]	0,05–0,7	0,25–1	(0,03 – –0,05) на 1 м	0,03 на 1 м
<i>2-я группа</i>				
Сталеплавильные цехи [15]: миксеры, установки для подачи в конвертор, охладители конверторных газов, сталеплавильные печи, оборудование для повышения качества стали, машины непрерывного литья заготовок Прокатные цехи [16]: прокатные и трубопрокатные станы – рабочие клетки, передаточные устройства, ножницы и пилы, плавильные машины и моталки, столы, прессы и т.д. Доменные цехи [17]: вагоноопрокидыватели, вагон-весы, затворы, грохоты, весовые воронки, конвейер подачи шихты, система скиповой подачи шихты на колосник, загрузочные устройства, фурменные приборы, оборудование для разлива литья и т.д.; коксохимические заводы [43]: вагоноопрокидыватели, конвейеры, питатели, оборудование угольных башен, коксовые батареи и машины, загрузочно-разгрузочные, охлаждающие и прочие отсутствующие устройства основных и вспомогательных цехов Дробильное, сортировочное, обогащительное и агломерационное оборудование [18] Оборудование цветной металлургии, химической, цементной, горнорудной промышленности: вращающиеся пе-	(0,5–5) на 1 м	0,5–3	(0,1–0,5) на 1 м	(0,3–1) на 1 м

Группа и оборудование	Величины предельных отклонений, мм			
	размера, формы	в плане	по высоте	от вертикальной
чи, сушильные барабаны и т.п. [21], [24], [33] Теплообменные и выпарные аппараты [14]				
<i>3-я группа</i>				
Аппараты высокого давления [19]: горизонтальные и вертикальные сосуды диаметром 400–3000 мм и длиной не более 34 м Вертикальные цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов [41] Смазочные гидравлические и пневматические системы общепромышленного назначения [20]	(1–5) на 1 м	10–20	10–80	10–90

тами, не указаны в чертежах завода-изготовителя, но машиностроительные допуски не вызывают сомнений, проверены на производстве.

3. Ошибки измерений не регламентированы нормативными документами, не указаны в чертежах завода-изготовителя, справедливость и обоснованность допусков ставятся под сомнение опытом эксплуатации оборудования.

Рассмотрим установление точности во втором и в третьем случаях.

Для второго случая исходной величиной при расчете необходимой точности измерений будет наименьшее по абсолютной величине нижнее  $\delta x_{inf}$  или верхнее  $\delta x_{sup}$  предельное отклонение [39], которое обозначим  $\delta x_{min}$ . При симметричном расположении поля допуска относительно номинального размера геометрического параметра нижнее и верхнее предельные отклонения равны между собой по абсолютной величине.

Геодезический контроль должен быть организован таким образом, чтобы допустимые ошибки  $\sigma_{пред}$  измерения предельных отклонений геометрического параметра были бы пренебрегаемо малы. Для этого полагают при вероятности  $p = 0,997$  ( $t = 3$ )

$$\sigma_{пред} = \delta x_{min} / 3.$$

Средняя квадратическая ошибка измерения предельного отклонения

$$\sigma = \sigma_{пред} / 3 \approx 0,1 \delta_{min}. \quad (1)$$

Обычно такое соотношение незначают для особо ответственных агрегатов. В большинстве же случаев при  $p = 0,954$  ( $t = 2$ ) пользуются соотношением

$$\sigma = 0,2 \delta x_{\min}. \quad (2)$$

Основываясь на этой ошибке, рассчитывают ошибки отдельных видов измерений.

Для третьего случая, когда ошибки измерений не регламентированы, а опыт эксплуатации оборудования показывает нереальность допусков, назначение точности измерений приобретает особое значение. Из формул (1), (2) видно, что при небольших предельных отклонениях средние квадратические ошибки должны быть весьма малы. Так, например, при нормативном отклонении  $\delta x_{\min} = 3$  мм от прямолинейности осей крупногабаритных вращающихся печей [33], достигающих размеров 7x230 м, средняя квадратическая ошибка определения отклонения должна быть 0,3 мм. Поскольку для определения искривления оси печи необходимо сделать измерения минимум в трех точках, то достичь точности определения искривления оси печи в 0,3 мм довольно трудно. В то же время согласно последним теоретическим исследованиям [21] предельное отклонение  $\delta x_{\min}$  должно быть рассчитано для каждого агрегата в зависимости от марки стали корпуса и может существенно отличаться от нормативного. Опыт эксплуатации печей свидетельствует, что во многих случаях агрегаты работают нормально, хотя искривления их осей вращения превышают нормативные в два-три раза. Поэтому для вращающихся печей целесообразно точность измерений назначить так:

$$\sigma = (0,5 - 0,3) \delta x_{\min}. \quad (3)$$

Этим же соотношением нужно пользоваться и в других случаях, когда возникает сомнение в реальности предельных отклонений, предусмотренных нормативными документами. Окончательно точность измерений следует корректировать по мере накопления опыта геодезического контроля, новейших теоретических и конструкторских расчетов и появления более совершенной измерительной техники.

#### **§ 4. Влияние освещенности, вибрации и запыленности, сотрясений, температурных воздействий и других возмущающих факторов на методику и точность измерений в промышленных цехах**

Геодезические измерения при монтаже и эксплуатации промышленного оборудования приходится выполнять, как правило, в условиях недостаточной освещенности, запыленности и турбулентности воздуха, рефракции, резкого перепада температур, меняющейся влажности, влия-

ния электромагнитных полей, сотрясений и вибраций от работающих машин, воздействия физико-психических факторов на моральное состояние наблюдателя.

Средняя квадратическая ошибка визирования при плохой освещенности [23] может быть в три раза больше, чем при хорошей. Установлена ошибка взгляда в зависимости от освещенности [40] (в делениях головки плоскопараллельной пластинки)

$$m = (0,22 + 1,54 \frac{1}{E} - 0,68 \frac{1}{E^2}),$$

где  $E$  — освещенность, в люксах.

Установлено, что освещенность при геодезических работах должна быть не менее 30 лк.

Точность наведения на визирные цели значительно снижается при геодезическом контроле пространственного положения работающего оборудования. Она ухудшается при приближении визирного луча к агрегату, особенно в случае значительного перепада температуры вдоль агрегата, и зависит также от вибраций и колебаний фундаментов оборудования, пола цеха и других мест установки прибора.

В руководстве [31] приводятся полученные опытным путем формулы средней квадратической ошибки визирования при геодезическом контроле действующих крупногабаритных вращающихся цементных печей. Ошибку введения в створ подвижного визирного конуса при прохождении визирного луча на расстоянии около 1 м от агрегата и над верхом фундаментов, имеющих размах колебаний за один оборот печи до 3 мм, можно подсчитать по эмпирической формуле

$$m_i'' = 3,4 - 16/s_i,$$

где  $s_i$  — расстояние в метрах от теодолита до визирного конуса. Формула справедлива для  $s_i$  от 2 до 80 м.

Если визирная линия проходит в 3 м от агрегата, то ошибка визирования составит (при указанных выше условиях)

$$m_i'' = 2,6 + 0,02 s_i,$$

а на печах с колебаниями верха фундаментов в плане до 40 мм

$$m_i'' = 24,9 - 0,36 s_i.$$

Ошибки наведения на визирную цель в вертикальной плоскости при прохождении визирного луча на расстояниях около 1 м от агрегата и от поверхности фундаментов составили при колебании верха фундаментов в плане до 3 мм и до 40 мм соответственно

$$m_i'' = 4,3 - 0,03 s_i, \quad m_i''' = 5,7 - 0,01 s_i.$$

Установлено, что расположение визирной цели в непосредственной близости (0,1–0,2 м) к агрегату увеличивает ошибки наведения в три раза по сравнению с подсчитанными по вышеприведенным формулам.

Как видно, фактические ошибки визирования превышают в несколько раз ошибки, подсчитанные по известной формуле

$$m_i = 20''/v,$$

где  $v$  – увеличение зрительной трубы.

Точность измерения малых горизонтальных углов при наблюдениях на верхней плите работающего турбоагрегата понижается вследствие турбулентности воздуха в два–четыре раза по сравнению с измерениями в лабораторных условиях, а точность введения подвижной визирной марки в створ и совмещения биссектора с визирной целью в способе подвижной линии визирования – в три–пять раз [42]. Перемещение визируемого луча от турбулентности воздуха достигает  $10''$ . Средняя квадратическая ошибка взгляда при нивелировании увеличивается в два–три раза.

Боковая рефракция может служить также источником систематических ошибок при контроле оборудования в плане. При длине створа 300 м и температурном градиенте  $0,3^\circ/\text{м}$  визирный луч может отклоняться на величину до 5 мм [22].

Одной из наиболее существенных причин снижения точности визирования в промышленных цехах является вибрация основания, на котором устанавливается геодезический прибор.

На промышленных предприятиях имеют место низкочастотная (до 5 Гц) и высокочастотная (5–60 Гц) вибрации. Так, например, параметры вибрации упруго-податливых фундаментов вращающихся цементных печей, по данным автора, такие: в плане – вдоль оси агрегата частота 1–2,8 Гц, амплитуда 4–122 мкм; поперек оси печи частота 0,8–10,0 Гц; амплитуда 8–356 мкм; по высоте – частота 1,0–2,8 Гц, амплитуда 2–172 мкм. В работе [42] для турбогенераторов приводятся следующие параметры: частота около 50 Гц, амплитуда – в пределах 10–80 мкм.

Влияние вибрации на геодезические приборы и ошибки измерений приведены в табл. 3. В этой таблице для наглядности показана кратность увеличения ошибок измерений по сравнению с ошибками наблюдений без влияния возмущающихся факторов.

Самый неблагоприятный диапазон частот вибрации основания, на котором устанавливают геодезические приборы, – это диапазон частот от 20 до 60 Гц.

Ошибки измерения превышений нивелиром и углов теодолитом включают в этом случае систематическую часть и требуют специальных мер по демпфированию колебаний. Демпфирование достигается: 1) при

Таблица 3

Зависимость стабильности положения визирной оси труб геодезических приборов и средних квадратических ошибок измерений от параметров вибрации

№ п.п.	Вид смещения визирной оси и ошибок измерений	Параметры вибраций		Длина визирного луча, м	Смещение визирной оси трубы, ошибка отсчета	Кратность увеличения ошибки	Источник
		Частота, Гц	Амплитуда, мкм				
1	Ошибка взгляда при геометрическом нивелировании	49,1 – 50,1	20–40	2–15		1,2–3	[42]
2	Ошибка измерения малого угла (Theo 010, 1 прием)		20–50	10–36	5–8"	4–5	[42]
3	Ошибка измерения угла на полу цеха	50	10–60			1,2	[42]
4	Ошибки введения в створ подвижной визирной марки		20–40	15–30		5–6	[42]
5	Ошибка совмещения биссектора с визирной целью в способе подвижной визирной линии		20–40	15–30		4–5	[42]
6	Колебание визирной оси теодолита		До 60		40"		[42]
7	Угловое смещение зрительных труб уровенных нивелиров	20–60			160"		[42]
8	Динамический наклон линии визирования авторедукционных нивелиров				10–30"		[27], [42]
9	Изменение горизонта нивелира Ni-007	25	0,05		+0,6 мм		[27]
10	Ошибка контактирования в гидростатических нивелирах	50	20–50	0	0,02–0,03 мм		[42]
11	Ошибка отсчета уровня жидкости датчиком гидростатической системы	50±1	32,5–140		40 мкм–0,2 мм		[26]

Продолжение табл. 3

№ п.п.	Вид смещения визирной оси и ошибок измерений	Параметры вибрации		Длина визирного луча, м	Смещение визирной оси трубы, ошибка отсчета	Кратность увеличения ошибки	Источник
		Частота, Гц	Амплитуда, мкм				
12	Ошибка отсчета теодолитом Т30 по горизонтально расположенной линейке с миллиметровыми делениями	1–3,8	0,07–3,6		$m_i = 1,22A + 0,29$	3,5–7	Данные автора

Примечание. При амплитуде 40–60 мкм створные измерения выполнять практически невозможно;  $m_i$  – ошибка визирования в мм;  $A$  – амплитуда колебаний в мкм.

помощи подкладок из войлока, резины и другого упругого материала под ножки штативов, что погашает до 80 % энергии вибрации [42]; 2) применением штативов, устойчивых к возникновению вынужденных колебаний (например, штативы ШР-140 и ШР-1 более устойчивы, чем ШР-160 и ШР-120 [27]); 3) применением инерционных приставок, насадок [27, 34, 42], благодаря чему точность измерений повышается в три–четыре раза.

Установлено, что в условиях низкочастотной вибрации использование уровневых нивелиров более эффективно, чем авторедукционных. Эффективность повышается, если применять специальную методику наблюдений – наведение биссектора сетки нитей на касание с двумя соседними штрихами рейки [42].

В условиях высокочастотной вибрации авторедукционные нивелиры более предпочтительны. Так, производительность натуральных наблюдений с использованием нивелира Ni-007 выше в полтора-два раза по сравнению с наблюдениями нивелиром НА-1 [42]. Высказывается необходимость создания специальных комплектов нивелиров и штативов, устойчивых к действию вибрации [27].

Кроме вертикальной составляющей амплитуды вибрации, место установки прибора может иметь вертикальное смещение от передающихся полу цеха колебаний фундаментов вследствие работы с искривленной осью от переменных нагрузок перемещающегося материала и т.п. Так, пол цеха вращающихся цементных печей с упруго податливыми фундаментами за один оборот агрегата при частоте вращения  $1/60 \text{ с}^{-1}$  (1 об/мин) перемещается до 0,25 мм.

Следует учитывать неблагоприятное воздействие на работоспособность наблюдателя таких факторов, как частое перемещение по цехам предприятий, смена рабочего места работа в местах повышенной опасно-

сти (в районе действия подъемных кранов, вращающихся элементов агрегатов, воздушных и паровых выбросов, сквозняков и т.д.).

Установлено, что при работе на атомных электростанциях (АЭС) у наблюдателей в первые три-четыре месяца вследствие желания скорее завершить измерения бракованные результаты составляют 25–30 %. В дальнейшем наблюдатель убеждается в безопасности радиационной обстановки, и процент брака снижается до 3–5 % [42].

В целом, при организации геодезических работ по контролю за оборудованием промышленных цехов следует исходить из того, что средние квадратические ошибки визирования в среднем в три раза больше, чем в обычных полевых условиях.

Наиболее правильную оценку точности наблюдений можно сделать лишь после специальных исследований в тех условиях, в которых предполагается выполнять измерения.

### § 5. Учет влияния кривизны Земли при монтаже по высоте технологического оборудования значительной протяженности

Как указывалось ранее, опорные элементы оборудования при монтаже и ремонте выставляют по высоте либо от пунктов высотной основы, либо от какого-то узла, принятого за исходный. Если геодезическое обеспечение монтажа выполняется геометрическим или гидростатическим нивелированием, возникает ошибка в положении элемента вследствие кривизны Земли. Поясним сказанное.

Пусть, устанавливается в горизонтальное положение агрегат длиной  $L$  (линия 1 –  $n$  на рис. 4). Монтаж ведется от точки 1 к точке  $n$ . Вследствие того, что точку 2 устанавливают при помощи какого-либо прибора для измерения превышения не по линии 1 –  $n$ , а параллельно уровенной поверхности, она займет положение  $2^0$ , отличающееся от проектного на величину  $\Delta h_2$ . Точка с номером  $i$  отклонится от проектного положения уже на величину  $\Delta h_i$ . Смонтированный агрегат будет в конечном итоге расположен по ломаной 1,  $2^0, \dots, i^0, \dots, n^0$ , а не по прямой 1 –  $n$ .

Отклонения  $\Delta h_i$  (см. рис. 4) можно выразить так

$$\Delta h_i = s_i \operatorname{tg} v_i,$$

где  $s_i$  – расстояние от начала агрегата до точки  $i$ , угол  $v_i$  находится из зависимости

$$v_i = \varphi - \varphi_i^0/2; \quad \varphi = (L/2R)\rho; \quad \varphi_i^0 = (s_i/R)\rho,$$

$\varphi$  и  $\varphi_i^0$  – углы из центра Земли между направлениями на точку 1 и среднюю точку агрегата, и соответственно на точку 1 и  $i$ -ю точку, причем  $\rho = 206\,265''$ .

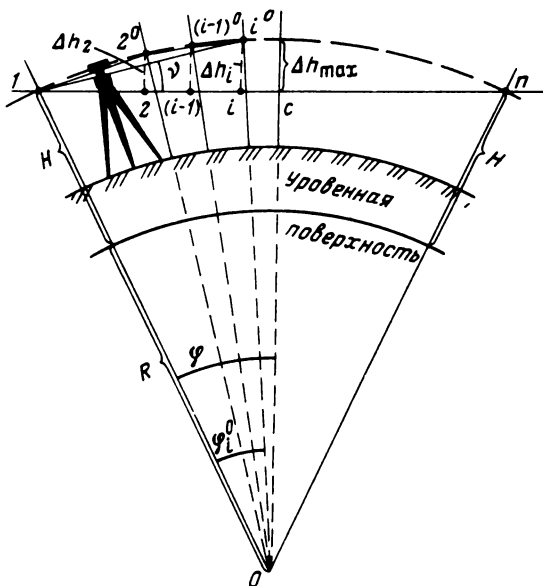


Рис. 4. Схема влияния кривизны Земли на высотное положение монтируемого агрегата

Тогда с учетом малости угла  $\nu_i$  можно окончательно записать  $\Delta h_i = (s_i / 2R) (L - s_i)$ .

Исследуя эту формулу на экстремум, видим, что она имеет максимум при  $s_i = L/2$  и

$$\Delta h_{\max} = L^2 / 8R.$$

Полученной величиной можно пренебречь, если она меньше допустимого отклонения от прямолинейности в четыре раза.

Отсюда поправку за кривизну Земли нужно учитывать, если

$$L \geq \sqrt{2R\delta x_{\min}}.$$

Например, для вращающихся печей при  $\delta x_{\min} = \pm 3$  мм имеем  $L = 190$  м, т.е. ее нужно вводить при монтаже и ремонте печей  $5 \times 185$  м и  $7 \times 210$  м.

Подобным образом нужно решать вопрос и о необходимости учета кривизны Земли при монтаже и ремонте других агрегатов.

## § 6. Особенности и задачи организации геодезических наблюдений за оборудованием при его эксплуатации

Геодезический контроль пространственного положения оборудования при его эксплуатации имеет ряд особенностей по сравнению с аналогичным контролем при монтаже.

Эти особенности обусловлены следующими двумя основными причинами:

1. Работающее оборудование имеет тепловые деформации, деформации из-за изменения режима технологического процесса, равномерный или неравномерный износ трущихся, скользящих одна по другой частей, деформации из-за неравномерных осадок фундаментов отдельных опорных узлов и т.п. Вследствие действия перечисленных деформаций ось работающего агрегата не остается неподвижной, а совершает постоянные перемещения в пространстве в некоторых пределах. Такие перемещения могут быть кратковременными, в течение одного цикла работы (например, за один оборот вращающихся агрегатов — вращающиеся печи, мельницы, бумаго- и картоноделательные машины и т.п.), за одно перемещение изделия по направляющим (конвейеры, мощные прессы, имеющие поступательное и возвратно-поступательное движения узлов, прокатные станы поточных линий и т.п.) и долговременные одного или переменных направлений.

Поэтому геодезический контроль должен проводиться на работающем агрегате, так как контроль и рихтовка остановленного агрегата [44] могут привести к нарушениям его работы или даже аварии.

2. Геодезические измерения выполняют в особо неблагоприятных, с точки зрения производства наблюдений, окружающих условиях, ограничены во времени, но должны дать необходимую и, как правило, достаточно обширную информацию о пространственном положении опорных узлов оборудования.

К этому следует добавить, что монтажные оси, закрепленные при установке оборудования, во время эксплуатации зачастую утрачиваются. Причин для этого много, и они достаточно хорошо известны (ремонтные работы, уборка помещения с использованием механических средств, перестановка отдельных механизмов, деталей и т.п.). В результате при эксплуатации зачастую невозможно восстановить монтажную ось и при рихтовке оборудования расположить его точно в исходном проектном положении. В ряде случаев это и нецелесообразно. Например, если технологическая линия не связана с другими линиями, а все фундаменты ее опорных узлов имеют равномерные осадки, то нормальная работа оборудования не будет нарушена и устанавливать оборудование вновь на проектную отметку не имеет смысла. Такое же замечание можно сделать и относительно любого другого смещения оси агрегата, если только оно

не влечет за собой нарушений связей с другими агрегатами, устойчивости фундаментов и технологического процесса.

Своеобразие условий работы оборудования и геодезических измерений требует и особого подхода к организации и проведению геодезического контроля за агрегатами в действующих промышленных цехах.

На современном этапе первоочередные задачи организации геодезического контроля на действующем промышленном предприятии следующие:

1. Обоснование и расчет точности измерений при геодезическом контроле положения работающего оборудования.

2. Исследование существующих и разработка новых программ створных наблюдений с учетом особенностей контроля действующих агрегатов.

3. Разработка программ, приспособлений, устройств, полуавтоматизированных и полностью автоматизированных систем геодезических измерений расстояний от створов и вспомогательных точек до поверхностей опорных узлов оборудования.

4. Разработка методики обработки результатов измерений и определения оптимального положения осей оборудования.

В последующих главах рассматриваются некоторые из перечисленных задач и приводится их решение.

## **Глава 2**

### **ПРОГРАММЫ СТОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИМЕНительно К ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ**

#### **§ 7. Особенности использования программ створных наблюдений в действующем цехе**

Геодезический контроль крупногабаритного промышленного оборудования значительной протяженности сводится к определению пространственного положения его опорных элементов.

В горизонтальном отношении контроль остановленных агрегатов выполняют, в основном, по различным программам створных измерений, в вертикальном — нивелированием, однако и в этом случае также находят применение программы створных наблюдений в горизонтальной или наклонной плоскости.

Как уже отмечалось ранее, условия работ по геодезическому контролю работающего оборудования существенно отличаются от условий при его монтаже.

Так как ось агрегата не остается абсолютно неподвижной во время пробных пусков при монтаже и тем более при эксплуатации, а постоян-

но меняет свое положение в некоторых пределах, то классическое решение задачи контроля оси инженерного объекта – построение каким-либо способом створа, совпадающего непосредственно с осью объекта или расположенного строго параллельно ему – в данном случае неприемлемо.

Следующая особенность, определяющая своеобразие программ створных наблюдений при контроле работающего оборудования, отсутствие во многих случаях прямой видимости вдоль агрегата в непосредственной от него близости. Сюда следует также отнести значительные перепады температуры, конвекцию воздушных потоков и боковую рефракцию.

В этих условиях применение известных программ полного створа, полуствора или частей створа, последовательных створов и т.п. [37] становится затруднительным, резко снижает точность наблюдений, а в ряде случаев просто невозможно. Поэтому возникает необходимость дальнейшего развития программ створных наблюдений, которое обеспечило бы возможность контроля работающего оборудования, обхода препятствий, перекрывающих прямую видимость вдоль контролируемого объекта, а также ослабление ошибок измерений от влияния возмущающих внешних факторов.

#### § 8. Створ, не параллельный оси агрегата

Способ, заключающийся в контроле путем построения створа, приблизительно параллельного оси объекта, был предложен в работах [25], [31].

Рассмотрим эту задачу в общем виде. Створ (рис. 5) закрепляют вблизи крайних точек агрегата  $l - n$  пунктами I и II. На одном конце створа (пункт I) устанавливают створный прибор (теодолит, алиниометр, лазерное устройство и т.п.), на другом (пункт II) – визирную цель (марку, экран, фотоприемное устройство и т.п.), в контролируемых пунктах ( $1, 2, \dots, i, \dots, n$ ) – прибор для определения нестворности. К таким приборам, как известно, относятся неподвижные или подвижные визирные марки, фотоприемные устройства и т.п. При значительной непараллельности исходного створа оси агрегата дополнительно используют горизонтальные штанги, рулетки и т.д.

В результате измерений находят  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Значения  $y_i$  нужно знать с высокой точностью. Их берут либо с чертежей, либо определяют путем простейших линейных промеров.

В системе прямоугольных координат  $xOy$  нестворность точки  $i$  относительно замыкающей  $l - n$  определяется по формуле

$$d_i = y_i \cos \epsilon + x_i \sin \epsilon - e,$$

где  $d_i$  – расстояние от точки  $i$  до прямой  $l - n$ , заданной нормальным уравнением;  $\epsilon, e$  – параметры нормального уравнения прямой;  $x_i, y_i$  – координаты определяемой точки  $i$ .

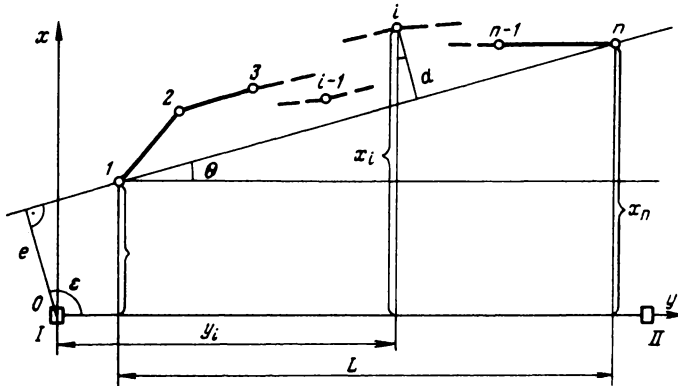


Рис. 5. Схема контроля прямолинейности способом створа, не параллельного оси агрегата

Величины  $d_i$ , расположенные слева от линии  $1 - n$ , имеют знак плюс, справа – знак минус.

Обозначив угол между линией  $1 - n$  и исходным створом  $\theta$  и учитывая, что

$$\epsilon = 90^\circ + \theta,$$

$$e = (x_i - y_i \operatorname{tg} \theta) \cos \theta,$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x_n - x_1}{y_n - y_1}.$$

Нестворность точки  $i$  будет

$$d_i = \cos \theta [x_i - x_1 - k_i (x_n - x_1)]. \quad (4)$$

Здесь

$$k_i = \frac{y_i - y_1}{y_n - y_1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_i}{L},$$

где  $l_i$  – расстояние между контролируемыми точками;  $L$  – длина линии  $(1 - n)$ , т.е. длина объекта.

Если расстояния между контролируемыми точками одинаковы, то

$$k_i = \frac{(i - 1)}{(n - 1)}.$$

Очевидно, что угол  $\theta$  должен учитываться не всегда. В большинстве случаев достаточно считать  $\cos \theta = 1$  и применять упрощенную формулу (см., например, формулу (1) в работе [31])

$$d_i' = x_i - x_1 - k_i (x_n - x_1). \quad (5)$$

Ошибка  $\Delta d_i$  от этого будет

$$\Delta d_i = \Delta d_i' - d_i = 2d_i' \sin^2 \theta / 2,$$

и она имеет максимальное значение при наибольших  $d_i'$  и  $\theta$ . Отсюда искомое критическое значение угла  $\theta_{\max}$ , при котором можно пользоваться формулой (5), находят из выражения

$$\sin \theta_{\max} / 2 = \sqrt{\frac{\Delta d_i}{2 d_i}}.$$

Обычно считают, что ошибкой  $\Delta d_i$  можно пренебречь при некотором заданном соотношении  $\Delta d_i = q m_{d_i}$ , где  $q$  — коэффициент, который выбирают в зависимости от конкретных условий и который колеблется в пределах 0,10–0,25.

В свою очередь, значение  $m_{d_i}$  связано с монтажным или эксплуатационным допуском на искривление оси агрегата  $\delta x_{\min}$  соотношениями (1)–(3), которое в общем виде можно записать так

$$m_{d_i} = \frac{1}{\zeta} \delta x_{\min},$$

где  $\zeta$  также зависит от конкретных условий и назначается обычно в пределах от 4 до 10.

Величину  $d_i'$  следует принять равной ее возможному максимальному значению  $\delta x_{\max}$ . Таким образом, имеем

$$\sin \theta_{\max} / 2 = \sqrt{\frac{q}{2\zeta}}.$$

Так, принимая  $q = 0,1$ ,  $\zeta = 10$ , найдем, что при  $\theta = 8^\circ$  и меньше можно пользоваться выражением (5).

Считая  $k_i$  в формуле (4) постоянным, найдем дифференциал  $d_i$

$$d(d_i) = \cos \theta \left[ \left( k_i - 1 + \frac{d_i \sin \theta}{y_n} \right) dx_1 + dx_1 - \left( k_i + \frac{d_i \sin \theta}{y_n} \right) dx_n \right].$$

При указанных выше условиях, приняв, например, для вращающихся печей  $4,5 \times 170$  м  $d_i = \delta x_{\max} = 3$  мм,  $y_n = 150$  м,  $\theta = 8^\circ$ , получим

$$\frac{(d_i \sin \theta)}{y_n} = 4 \cdot 10^{-5}.$$

Очевидно, что этим членом можно пренебречь. Полагая также  $\cos \theta = 1$ , запишем

$$d(d_i) = (k_i - 1)dx_1 + dx_1 - k_i dx_n. \quad (6)$$

Переходя от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам, будем иметь

$$m_{d_i}^2 = (k_i - 1)^2 m_{x_1}^2 + m_{x_1}^2 + k_i^2 m_{x_n}^2. \quad (7)$$

Здесь  $m_{d_i}$ ,  $m_{x_1}$ ,  $m_{x_i}$ ,  $m_{x_n}$  — средние квадратические ошибки величин  $d_i$ ,  $x_1$ ,  $x_i$ ,  $x_n$ . Поскольку из формулы (6) следует, что  $d(d_1) = d(d_n) = 0$ , то

$$m_{d_1} = m_{d_n} = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим действие ошибок определения искривлений оси объекта вследствие чисто геометрических свойств программы общего створа (при  $i \neq 1, n$ ).

Предварительно примем, что расстояния между контролируемыми точками одинаковы, а величины  $x_1$ ,  $x_i$  и  $x_n$  определяют по способу малых углов.

Полагаем, что наблюдения от точки 1 до  $n/2$  проводят из пункта I, а точек от  $n/2$  до  $n$  — из пункта II. Тогда абсциссы точек  $x_i$  ( $i = 1, n/2$ ) и  $x_j$  ( $j = n/2, n$ ) будут

$$x_i = (\xi_i / \rho) y_i, x_j = (\xi_j / \rho) (y_{II} - y_j), \quad (9)$$

где  $\xi_i$  и  $\xi_j$  — малые углы из точки I (соответственно из точки II) на наблюдаемые точки  $i$  и  $j$ .

Подсчет искривлений выполняют по формуле (5), а оценка точности при условии пренебрегаемости ошибками ординат точек (что обычно допустимо при определении нестворностей по способу малых углов [37]) из выражения

$$m_{d_i}^2 = (k_i - 1)^2 y_1^2 \left(\frac{m \xi_1}{\rho}\right)^2 + y_i^2 \left(\frac{m \xi_1}{\rho}\right)^2 + k_i^2 (y_{II} - y_n)^2 \left(\frac{m \xi_n}{\rho}\right)^2.$$

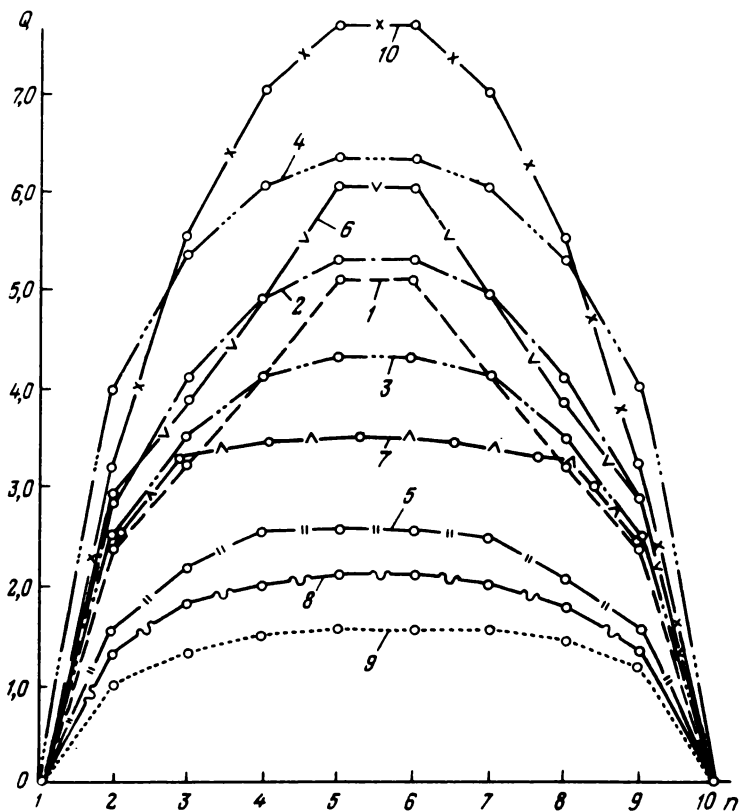


Рис. 6. График ошибок определения искривлений оси объекта, обусловленных геометрией программ створных наблюдений:

1 — общего створа; 2 — общий случай вспомогательных створов, опирающихся на замкнутый ход направлений; 3 — вспомогательных створов, опирающихся на замкнутый ход направлений с видимостью вдоль замыкающей; 4 — вспомогательных створов, опирающихся на разомкнутый ход направлений; 5 — вспомогательных створов, опирающихся на створ относимости, заданной двумя точками; 6 — вспомогательных створов при восстановлении направления закрытого створа; 7 — вспомогательных створов для двух пар соседних точек, наблюдаемых из вспомогательной точки, расположенной вблизи агрегата и опирающейся на закрытый створ относимости; 8 — независимых вспомогательных створов; 9 — последовательных створов; 10 — частных створов

Примем

$$\begin{aligned}y_1 &= l, \quad y_i = il, \quad y_{II-n} = l, \\m_{\xi_1} &= m_{\xi_i} = m_{\xi_n} = m_{\xi}, \\m_x &= l(m_{\xi}/\rho).\end{aligned}\tag{10}$$

После преобразований получим

$$m_{d_i} = \sqrt{(k_i - 1)^2 + i^2 + k_i^2} m_x \approx \sqrt{i^2 + 1} m_x = Qm_x.$$

Ошибка от упрощений составит

$$\Delta m = (k_i - 1)^2 + i^2 + k_i^2 - (i^2 + 1) = 2k_i(k_i - 1).$$

По результатам исследования этой ошибки на экстремум находим, что  $\Delta m_{\max} = 0,5$ . В то же время (с учетом того, что согласно формуле (6)  $m_{d_1} = m_{d_n} = 0$ ) минимальное значение  $i^2 + 1 = 5$  при  $i = 2$ . Поэтому ошибкой от упрощений вполне можно пренебречь.

Отметим, что полученная формула справедлива лишь для подсчета ошибок в точках от 2 до  $n/2$ . Ошибки для второй половины точек, т.е. для точек от  $n/2 + 1$  до  $n - 1$ , будут симметрично равны ошибкам первой половины створа. На основании полученных данных можно построить график (рис. 6). Более подробный анализ графиков точности в зависимости от геометрии створов будет дан в последующих разделах.

Наконец, отметим, что формулы (6) и (7) и выполненное их исследование справедливы и для случая створа, совмещенного с осью инженерного объекта или заданного строго параллельно этой оси. В первом случае  $m_{x_1}$  и  $m_{x_n}$  — это ошибки центрирования приборов в крайних точках створа, во втором — ошибки размещения крайних точек створа относительно оси объекта в перпендикулярном к ней направлении.

## § 9. Программа створных наблюдений путем построения вспомогательных створов параллельно общей плоскости относимости

При контроле работающего оборудования целесообразно отнести створ в сторону от объекта наблюдений для ослабления температурных и других воздействий. Однако это автоматически влечет увеличение ошибок измерения отстояний контролируемых точек от створа, а в случае использования способа подвижной визирной марки или способа малых углов делает эти способы непригодными для применения. Поэтому нужно применить способы, в которых основная плоскость относимости

располагалась бы в благоприятных условиях, а контролируемые точки наблюдали бы со вспомогательных станций, находящихся в непосредственной близости к ним.

### Общий случай

Основную плоскость относимости  $I - A$  (рис. 7) располагают примерно параллельно объекту на таком удалении от него, которое обеспечивает наиболее благоприятные условия для измерений, а для каждой пары ближайших контролируемых точек объекта (точки  $1, 2; 2, 3; \dots; i - 1, i; \dots, (j - 1), j; \dots; n - 1, n$ ) строят короткие вертикальные плоскости относимости, параллельные основной плоскости относимости.

Направление основной плоскости относимости при отсутствии непосредственной видимости даже между точками  $I$  и  $A$ , что довольно часто имеет место в реальных условиях, определяют проложением хода направлений  $I, II, \dots, I, \dots, J; \dots, W, I$  с короткими сторонами. Совместим последнюю сторону хода  $W - I$  с направлением  $I - A$  (в пределах до  $8^\circ$ , см. § 8) и примем дирекционный угол этой линии равным  $\alpha_0$ .

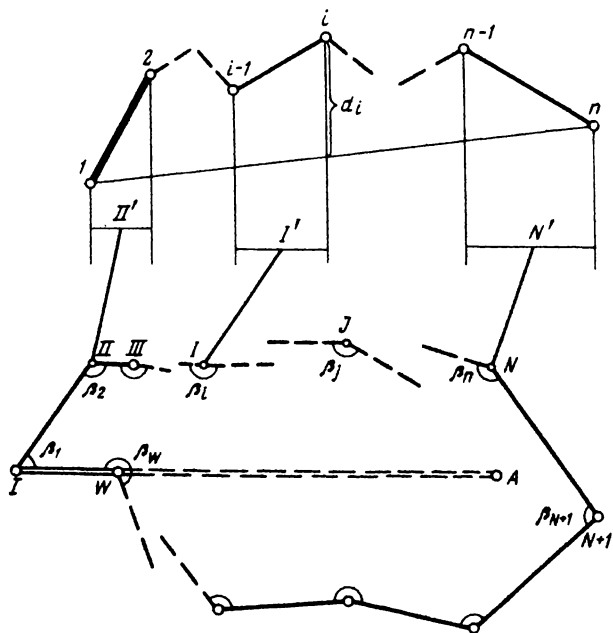


Рис. 7. Схема контроля агрегата построением плоскостей относимости параллельно основной плоскости относимости (общий случай)



между которыми нет видимости. Затем измерения продолжают в обычном порядке.

Искривление оси агрегата  $d_i$  — отстояние выверяемой точки  $i$  от замыкающей  $1 - n$  — вычисляют по формулам

$$d_i = k_i \sum_2^n x - \sum_2^i \Delta x, \quad (11)$$

$$\Delta x_j = x_{j-1}^{\Pi} - x_j^{\Pi};$$

$$x_{j-1}^{\Pi} = a_{j-1}^{\Pi} - \frac{\xi_j^{\Pi}}{\rho} s_j^{\Pi},$$

$$x_i^{\Pi} = a_j^{\Pi} + \frac{\xi_j^{\Pi}}{\rho} s_j^{\Pi}, \quad (12)$$

где  $s_j^{\Pi}$ ,  $s_j^{\Pi}$  — расстояние от точки  $J$  до точек  $(j-1)'$  и  $j'$ ;  $\rho'' = 206\,265''$ .

Углы  $\xi_j^{\Pi}$  и  $\zeta_j^{\Pi}$  находят так:

$$\zeta_j^{\Pi} = a_0 + 180^\circ - \alpha_{j-1}',$$

$$\xi_j^{\Pi} = a_0 - \alpha_{j-1}',$$

причем  $\alpha_{j-1}'$ ,  $\alpha_{j-1}'$  — дирекционные углы линий  $J' - (j-1)'$ ,  $J' - j'$ , подсчитываемые по формулам

$$\alpha_{j-1}' = a_0 + 180^\circ (j+1) - \sum_1^j \beta^{\Pi} - \gamma_j - \lambda_j^{\Pi},$$

$$\alpha_{j-1}' = a_n + 180^\circ (j+1) - \sum_1^j \beta^{\Pi} - \gamma_j - \lambda_j^{\Pi}.$$

Здесь

$$\beta_1^{\Pi} = \beta_1 + V_{\beta},$$

$$\beta_2^{\Pi} = \beta_2 + V_{\beta},$$

.....

(13)

$$\beta_j^{\Pi} = \beta_j + V_{\beta},$$

$$V_{\beta} = \frac{f_{\beta}}{\omega}.$$

Отметим, что  $f_\beta$  – угловая невязка;  $\omega$  – число углов в ходе направлений.

Используя полученные зависимости, запишем

$$\begin{aligned}\xi_j^\Pi &= \sum_1^j \beta^\Pi + \gamma_j + \lambda_j^\Pi - 180^\circ (j + 1), \\ \xi_j^\Pi &= \sum_1^j \beta^\Pi + \gamma_j + \lambda_j^\Pi - 180^\circ (j + 1).\end{aligned}\quad (14)$$

Искривления влево от линии 1– $n$  имеют знак плюс, вправо – минус.

Для оценки точности продифференцируем формулу (11) и приведем подобные члены

$$d(d_i) = (1 - k_i) \sum_{j=1}^{j=i} (dx_j^\Pi - dx_{j+1}^\Pi) - k_i \sum_{j=i+1}^{j=n} (dx_{j-1}^\Pi - dx_j^\Pi). \quad (15)$$

В свою очередь,

$$\begin{aligned}dx_j^\Pi - dx_j^\Pi &= da_{j-1}^\Pi - da_j^\Pi - \frac{\xi_j^\Pi}{\rho} ds_j^\Pi - \frac{\xi_j^\Pi}{\rho} ds_j^\Pi - \\ &- \frac{d\xi_j^\Pi}{\rho} s_j^\Pi - \frac{d\xi_j^\Pi}{\rho} s_j^\Pi.\end{aligned}\quad (16)$$

Полагая  $s_2^\Pi = s_2^\Pi = \dots = s_i^\Pi = s_i^\Pi = \dots = s$ ;  $\xi_2^\Pi = \xi_2^\Pi = \dots = \xi_i^\Pi = \xi_i^\Pi = \dots = \xi_n^\Pi = \xi_n^\Pi = \xi$ , запишем

$$\begin{aligned}d(d_i) &= (1 - k_i) \sum_{j=1}^{j=i-1} (da_j^\Pi - da_{j+1}^\Pi) - k_i \sum_{j=i}^{j=n-1} (da_j^\Pi - da_{j+1}^\Pi) + \\ &+ (k_i - 1) \left(\frac{\lambda}{\rho}\right) \sum_{j=2}^{j=i} (ds_j^\Pi + ds_j^\Pi) + k_i \left(\frac{\xi}{\rho}\right) \sum_{j=i+1}^{j=n} (ds_j^\Pi + \\ &+ ds_j^\Pi) + \frac{s}{\rho} [(k_i - 1) \sum_{j=2}^{j=i} (d\xi_j^\Pi + d\xi_j^\Pi) + k_i \sum_{j=i+1}^{j=n} (d\xi_j^\Pi + d\xi_j^\Pi)].\end{aligned}$$

С учетом формул (13) и (14)

$$d\xi_j^\Pi = \frac{\omega - j}{\omega} \sum_1^j d\beta - \frac{j}{\omega} \sum_{j+1}^\omega d\beta + d\gamma_j + d\lambda_j^\Pi,$$

$$d\xi_j^n = \frac{\omega - j}{\omega} \sum_1^j d\beta - \frac{j}{\omega} \sum_{j+1}^{\omega} d\beta + d\gamma_j + d\lambda_j^n.$$

Тогда после ряда преобразований выражение (15) представим

$$\begin{aligned} d(d_i) &= (1 - k_i) \sum_{j=1}^{j=i-1} (da_j^n - da_{j+1}^n) - k_i \sum_{j=i}^{j=n-1} (da_j^n - \\ &- da_{j+1}^n) + (k_i - 1) \left(\frac{\xi}{\rho}\right) \sum_{j=2}^{j=i} (ds_j^n + ds_j^n) + \\ &+ k_i \left(\frac{\xi}{\rho}\right) \sum_{j=i+1}^{j=n} (ds_j^n + ds_j^n) + \frac{2s}{\rho} \left\{ - \frac{(n-i)(i-1)}{2\omega} (d\beta_1 + \right. \\ &+ d\beta_2) + \frac{n-i}{2\omega(n-1)} \sum_{j=3}^{j=i} [2\omega(j-2) - (i-1)(n-1)] d\beta_j + \\ &+ \frac{n-i}{2\omega(n-1)} \sum_{j=i+1}^{j=n+1} [2\omega(n-j+1) - (n-i)(n-1)] d\beta_j + \\ &+ \left. \frac{(i-n)(i-1)}{2\omega} \sum_{j=n}^{j=\omega} d\beta_j \right\} + \frac{2s}{\rho} [(k_i - 1) \sum_{j=2}^{j=i} d\gamma_j + \\ &+ k_i \sum_{j=i+1}^{j=n} d\gamma_j] + \frac{s}{\rho} [(k_i - 1) \sum_{j=2}^{j=i} (d\lambda_j^n + d\lambda_j^n) + \\ &+ k_i \sum_{j=i+1}^{j=n} (d\lambda_j^n + d\lambda_j^n)]. \end{aligned}$$

Перейдем от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам соответствующих величин

$$m_{d_i}^2 = (1 - k_i)^2 \sum_{j=1}^{j=i-1} (m_{a_j}^2 + m_{a_{j+1}}^2) +$$

$$\begin{aligned}
& + k_i^2 \sum_{j=i}^{j=n-1} (m_{a_j}^2 + m_{a_{j+1}}^2) + (k_i - 1)^2 \left(\frac{\xi}{\rho}\right)^2 \sum_{j=2}^{j=i} (m_{s_j}^2 + \\
& + m_{s_j}^2 + k_i^2 \left(\frac{\xi}{\rho}\right)^2 \sum_{j=i+1}^{j=n} (m_{s_j}^2 + m_{s_j}^2) + \left(\frac{2s}{\rho}\right)^2 \times \\
& \times \left\{ \frac{(n-1)^2 (i-1)^2}{4\omega^2} (m_{\beta_1}^2 + m_{\beta_2}^2) + \frac{(n-1)^2}{4\omega^2 (n-1)^2} \sum_{j=3}^{j=i} [2\omega(j- \right. \\
& - 2) - (i-1)(n-1)]^2 m_{\beta_j}^2 + \frac{(i-1)^2}{4\omega^2 (n-1)^2} \sum_{j=i+1}^{j=n+1} [2\omega(n-j + \\
& + 1) - (n-i)(n-1)]^2 m_{\beta_j}^2 + \left. \frac{(i-n)^2 (i-1)^2}{4\omega^2} \sum_{j=n+2}^{j=\omega} m_{\beta_j}^2 \right\} + \\
& + \left(\frac{2s}{\rho}\right)^2 [(k_i - 1)^2 \sum_{j=2}^{j=i} m_{\gamma_j}^2 + k_i^2 \sum_{j=i+1}^{j=n} m_{\gamma_j}^2] + \\
& + \left(\frac{s}{\rho}\right)^2 [(k_i + 1)^2 \sum_{j=2}^{j=i} (m_{\lambda_j}^2 + m_{\lambda_j}^2 + \\
& + k_i^2 \sum_{j=i+1}^{j=n} (m_{\lambda_j}^2 + m_{\lambda_j}^2))] .
\end{aligned}$$

Приняв  $m_{a_1}^{\Pi} = m_{a_2}^{\Pi} = \dots = m_{a_{i-1}}^{\Pi} = m_{a_i}^{\Pi} = \dots = m_{a_{n-1}}^{\Pi} = m_{a_n}^{\Pi} = m_a$ ;  $m_{s_2}^{\Pi} = m_{s_2}^{\Pi} = \dots = m_{s_i}^{\Pi} = m_{s_i}^{\Pi} = \dots = m_{s_n}^{\Pi} = m_s$ ;  $m_{\beta_1} = m_{\beta_2} = \dots = m_{\beta_i} = \dots = m_{\beta_n} = \dots = m_{\beta_t} = m_{\beta}$ ;  $m_{\gamma_2} = m_{\gamma_3} = \dots = m_{\gamma_i} = m_{\gamma_n} = m_{\gamma}$ ;  $m_{\lambda_2}^{\Pi} = m_{\lambda_2}^{\Pi} = m_{\lambda_i}^{\Pi} = m_{\lambda_i}^{\Pi} = \dots = m_{\lambda_n}^{\Pi} = m_{\lambda_n}^{\Pi} = m_{\lambda}$ , и выполнив необходимые преобразования, получим окончательно

$$\begin{aligned}
m_{d_i}^2 & = \frac{2(n-i)(i-1)}{n-1} \left\{ m_a^2 + \left(\frac{\xi}{\rho}\right)^2 m_s^2 + 2\left(\frac{s}{\rho}\right)^2 [m_{\gamma}^2 + \right. \\
& + 0,5 m_{\lambda}^2 \left. \frac{(n-i)(i-1)}{3} m_{\beta}^2] \right\}. \tag{17}
\end{aligned}$$

Чтобы наглядно представить геометрическую характеристику способа, полагаем

$$\begin{aligned} m_a &= m_s = 0, \\ m_\lambda &= 2 m_\gamma = 2\sqrt{2} \cdot m_\beta, \\ 2\left(\frac{s}{\rho}\right) m_\beta &= m_x. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда формула (17) примет вид

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{(n-i)(i-1)}{n-1} \left[6 + \frac{(n-i)(i-1)}{3}\right]} \cdot m_x = Q m_x.$$

Подсчитанные по этой формуле  $Q$  при  $n = 10$  показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что рассмотренный способ при принятых выше соотношениях ошибок измерений по точности примерно равен точности способа полного створа. Предложенный способ более гибок, чем способ полного створа, и позволяет проконтролировать прямолинейность объекта в самых неблагоприятных условиях.

#### Частные случаи

Объем измерений сокращается и точность повышается, если имеется прямая видимость параллельно объекту на некотором от него расстоянии, т.е. когда есть видимость между точками  $I$  и  $N+1$  (см. рис. 7).

Угловые измерения в ходе выполняют лишь в точках  $I, II, \dots, N+1$ . Искривления оси агрегата подсчитывают по формулам (9)–(13), а точность оценивают по формуле

$$\begin{aligned} m_{d_i} &= \left(\frac{2\xi}{\rho}\right)^2 \frac{(n-i)(i-1)}{n-1} \left[ \frac{(n-i)(i-1)(n+7)}{12(n+1)} m_\beta^2 + \right. \\ &\left. + m_{\gamma_j}^2 + 0,5 m_\lambda^2 \right]. \end{aligned}$$

При выполнении условий (18) имеем

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{(n-i)(i-1)}{n-1} \left[6 + \frac{(n-i)(i-1)(n+7)}{12(n+1)}\right]} m_x = Q m_x.$$

Из графика  $Q$  для  $n = 10$  следует, что точность определения искривлений оси агрегата несколько выше, чем в предыдущем, общем случае (см. рис. 6).

Контроль прямолинейности может быть выполнен и с разомкнутого хода направлений. Допустим, что по условиям промышленной площадки (или по условиям требуемой точности) возможно проложение лишь разомкнутого хода, т.е. ход направлений (см. рис. 7) включает точки  $II, III, \dots, I, \dots, J, \dots, N$ . В остальном схема наблюдений не меняется.

Формулы подсчета искривлений остаются прежними [см. формулы (9)–(13)], за исключением того, что в выражениях (12) и (13) следует использовать измеренные, а не исправленные углы. Поскольку углы  $\beta$  в ходе остаются непроконтролируемыми, целесообразно наблюдения выполнять проложением двух независимых ходов.

Оценку точности при одном ходе направлений выполняют по формуле

$$m_{d_i}^2 = \frac{(n-i)(i-1)}{n-1} \left\{ 2 \left[ m_a^2 + 2 \left( \frac{\xi}{\rho} \right)^2 m_s^2 + \left( \frac{s}{\rho} \right)^2 (m_\gamma^2 + 0,5 m_\lambda^2) \right] + \left( \frac{2s}{\rho} \right)^2 \frac{ni(n-i)}{3(n-1)} \left( \frac{m_\beta}{\rho} \right)^2 \right\},$$

а при условиях (18)

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{n(i-1)(n-i)(0,1n^2+6)}{(n-1)^2}} m_x = Qm_x$$

Точность этой программы ниже точности для случая замкнутого хода направлений (см. рис. 6).

Все рассмотренные случаи, как общий, так и частные, упрощаются, если есть возможность совместить точки  $II$  и  $II'$ ,  $\dots$ ,  $I$  и  $I'$ ,  $\dots$ ,  $N$  и  $N'$  (см. рис. 7). Тогда из схемы измерений исключаются углы  $\gamma$ , а из формул оценки точности – их средние квадратические ошибки.

Существенного сокращения объема работ и повышения точности [31] можно достичь также в случае, когда есть прямая видимость вдоль объекта на некотором от него удалении (т.е. между точками  $I$  и  $N+1$  на рис. 7), возможность измерять углы  $\gamma$  непосредственно из точек  $I$  или  $N+1$  на точки  $II', III', \dots, I', \dots, J', \dots, N'$ .

Измерения на точках  $II', III', \dots, I', \dots, J', \dots, N'$  производятся согласно схеме рис. 8.

Вычисляют искривления по формулам (9) – (11), причем

$$\xi_j^{\text{II}} = \gamma_j + \lambda_j^{\text{II}} - 360^\circ, \quad \xi_j^{\text{I}} = \gamma_j + \lambda_j^{\text{I}} - 180^\circ.$$

Оценку точности проводят по формуле

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{2(n-i)(i-1)}{n-1} \left[ m_a^2 + \left( \frac{\xi}{\rho} \right)^2 m_s^2 + \left( \frac{s}{\rho} \right)^2 (2m_\gamma^2 + m_\lambda^2) \right]}.$$

Если принять условия (18), то

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{3(n-i)(i-1)}{n-1}} m_x = Qm_x,$$

причем  $m_x = 2(s/\rho)m_y$ .

Из графика  $Q$  при  $n = 10$  (см. рис. 6) следует, что эта программа значительно точнее, чем программа створных наблюдений с использованием разомкнутых или замкнутых ходов направлений.

В практике может встретиться случай, когда условия позволяют использовать программу полного створа в непосредственной близости от агрегата, но есть препятствие, перекрывающее видимость вдоль объекта. Кроме описанных выше программ, в такой ситуации могут быть применены и другие, наиболее рациональная из которых предложена в работе [8]. Рассмотрим ее применительно к контролю прямолинейности агрегата по способу малых углов (рис. 9). Отметим, что точки, расположенные слева от препятствия, наблюдают из пункта  $I$ , а справа — из пункта  $II$ . Совместим ось  $y$  с направлением створа  $I-II$ .

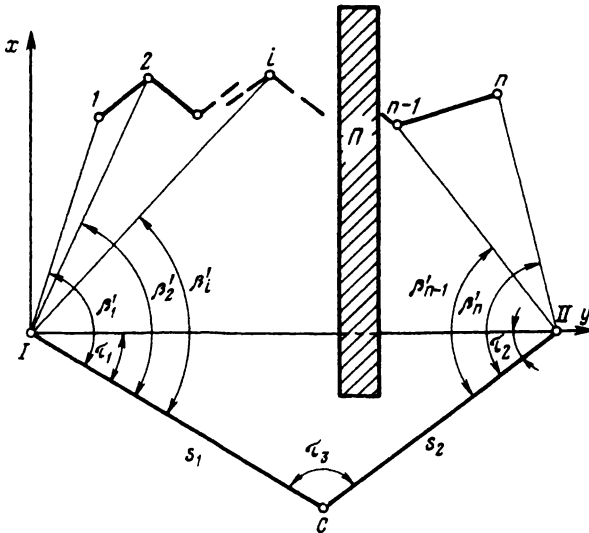


Рис. 9. Схема восстановления направления закрытого створа:

$I, 2, \dots, i, \dots, n$  — контролируемые точки агрегата;  $C$  — вспомогательная точка;  $\tau_3$  — горизонтальный угол, измеренный на ней;  $s_1, s_2$  — расстояния точки  $C$  от начального  $I$  и конечного  $II$  пунктов створа;  $\beta'_1, \beta'_2, \dots, \beta'_{n-1}, \beta'_n$  — малые углы между направлениями из пунктов  $I$  и  $II$  на точку  $C$  и направлениями на контролируемые точки;  $П$  — препятствие, закрывающее видимость вдоль створа

Абсциссы контролируемых точек вычисляются по формулам (9), причем

$$\beta_i = \beta'_i - \tau_1; \quad \beta_j = \beta'_j - \tau_2; \quad \tau_1 = \frac{s_2}{s_1 + s_2} (180^\circ - \tau_3);$$

$$\tau_2 = \frac{s_1}{s_1 + s_2} (180^\circ - \tau_3).$$

Затем, пользуясь выражением (5), найдем искривления оси агрегата.

Для оценки точности с учетом формул (6), (9) и записанных выше формул подсчета абсцисс контролируемых точек, пренебрегая ошибками ординат, получим при  $m_{d_i} = m_{d_n} = 0$  [см. формулы (6) и (7)],

$$m_{d_i}^2 = y_i^2 \left( \frac{m \beta_i}{\rho} \right)^2 + (k_i - 1)^2 y_1^2 \left( \frac{m \beta_1}{\rho} \right)^2 + k_i^2 y_n^2 \left( \frac{m \beta_n}{\rho} \right)^2 +$$

$$+ \frac{(B s_1 - A - s_2)^2}{(s_1 + s_2)^2} m_\tau^2 + \frac{(A + B)^2 (180^\circ - \tau_3)^2 (s_2^2 m_{s_1}^2 + s_1^2 m_{s_2}^2)}{(s_1 + s_2)},$$

$$\text{где } A = \frac{1}{\rho} [y_i + (k_i - 1)y_1],$$

$$B = \frac{1}{\rho} k_i y_n.$$

Причем условия (10) и, полагая, что

$$m_{\beta_1'} = m_{\beta_i'} = m_{\beta_n'} = m_\tau = m_\beta, \quad s_1 = s_2 = s, \quad m_{s_1} = m_{s_2} = m_s,$$

$$\frac{l (180^\circ - \tau_3)}{\rho} \cdot \frac{m_s}{s} = m_x,$$

после преобразований имеем

$$m_{d_i} = \sqrt{1,1 i^2 + 1,2 i + 1,4} \cdot m_x = Q m_x.$$

Полученная формула справедлива для точек, расположенных слева от препятствия. Средние квадратические ошибки искривлений для точек, находящихся справа от препятствия, равны ошибкам точек, симметрично расположенных относительно середины объекта, т.е.

$$m_{d_2} = m_{d_{n-1}}, \quad m_{d_3} = m_{d_{n-2}} \quad \text{и т.п.}$$

График  $Q$  при  $n = 10$  (см. рис. 6) свидетельствует, что точность этой программы ниже точности программ вспомогательных створов, параллельных основной плоскости относимости.

Если условия позволяют расположить точку  $C$  (см. рис. 9) в непосредственной близости к паре соседних контролируемых точек, т.е. совместить ее с точкой  $J'$  (см. рис. 8), то, выполнив измерения величин  $s_1^j, s_2^j, \tau_j, \lambda_j^{\Pi}, \lambda_j^{\Pi'}$ , найдем по формулам (12)  $x_{j-1}^{\Pi}$  и  $x_j^{\Pi}$ , причем

$$\xi_j^{\Pi} = \tau_1 + \tau_j^{\Pi} - 360^{\circ}, \quad \xi_j^{\Pi'} = \lambda_j^{\Pi'} - \tau_2.$$

Выполнив такие измерения во всех точках  $II', III', \dots, J', \dots, N'$  (напомним, что измерения из этих точек на пункты  $I$  и  $N+1$  могут быть выполнены и при отсутствии видимости вдоль линии  $I - (N+1)$ ), из выражения (11) получим искривления оси агрегата. Продифференцировав формулу (11) и перейдя от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам, после некоторых преобразований получим для оценки точности формулу

$$m_{d_i}^2 = I \left\{ 2m_a^2 + [2(x-a)^2 + II \cdot III] \left(\frac{1}{T}\right)^2 + II \cdot IV \left(\frac{m_{\tau}}{\rho}\right)^2 + V \left(\frac{m_{\lambda}}{\rho}\right)^2 \right\},$$

где  $x - a$  — разности  $x_{j-1}^{\Pi} - a_{j-1}^{\Pi}, x_j^{\Pi} - a_j^{\Pi}$  и т.п.;

$$I = \frac{(n-i)(i-1)}{n-1}; \quad II = \frac{L^2}{24(n-1)(n+1)^2}; \quad \frac{1}{T} = \frac{m_s}{s};$$

$$III = 3 \left(\frac{180^{\circ} - \tau_3}{\rho}\right) [2n^3 + i(i-n)(i+1,5n)];$$

$$IV = n[n^2 + 2(n-2i)^2]; \quad V = 0,5L^2.$$

Приняв  $m_a = 0$ ;  $x - a = 0$ , получим после некоторых допущений, незначительно (не более 25 %) увеличивших величину ошибки искривления,

$$m_{d_i}^2 = \frac{(n-i)(i-1)}{n-1} \left\{ \frac{l^2}{8} \left(\frac{180^{\circ} - \tau_3}{\rho}\right)^2 \left(\frac{1}{T}\right)^2 + 0,5l^2 \left[\left(\frac{m_{\tau}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{m_{\lambda}}{\rho}\right)^2\right] \right\}.$$

Первый член в фигурных скобках выражает влияние ошибок линейных

измерений, а второй – угловых на точность контроля прямолинейности объекта.

Поставив условие равенства этих влияний, найдем

$$\frac{1}{T} = \frac{2m_{\tau}}{180^{\circ} - \tau}$$

Отсюда можно рассчитать необходимую точность линейных измерений при заданной точности угловых измерений и величины угла  $\tau_{\beta}$ . Естественно, возможна и обратная задача. Например, при  $m_{\tau} = 10''$  и применении нитяного дальномера, т.е. при  $1/T \approx 1/400$   $180^{\circ} - \tau_{\beta} \approx 2^{\circ}$ , при  $1/T = 1/2000$  (при использовании стальной ленты)  $180^{\circ} - \tau_{\beta} \approx 11^{\circ}$  и т.д.

Поставив дополнительно условия (18) ( $m_{\tau} = m_{\lambda} = 2\sqrt{2} \cdot m_{\beta}$ ), найдем

$$m_{d_i} = 4 \sqrt{\frac{(n-i)(i-1)}{n-1}} \cdot m_x = Qm_x$$

Величины  $Q$  для этой программы створных наблюдений (при расположении вспомогательной точки около агрегата и при наблюдении с нее пары контролируемых точек и опорных пунктов основной плоскости относимости) показаны на рис. 6. Программа наблюдений по точности конечного результата  $m_{d_i}$  близка к другим программам створных наблюдений путем построения вспомогательных створов параллельно основной плоскости относимости.

С целью сопоставления программ створных наблюдений, рассмотренных в данной главе, с наиболее известными и описанными в литературе программами, даны графики  $Q$  при  $n = 10$  (см. рис. 6) для программы последовательных створов, как обеспечивающей наиболее точные результаты, и для программы частных створов, в наибольшей степени ослабляющей влияние возмущающих факторов окружающих условий, т.е. наиболее близкой по своей задаче к способам вспомогательных створов, параллельных основной плоскости относимости. Подсчет  $Q$  выполнен по формулам (VI.I.8) и (VI.I.13) работы [37], причем предполагалось, что крайние точки створа совпадают с крайними точками агрегата, а наблюдения невторостепенны – равноточные.

Графики  $Q$  (см. рис. 6) наглядно демонстрируют геометрическую характеристику всех упомянутых программ. Наибольшую точность, как и следовало ожидать, обеспечивает программа последовательных створов (хотя, естественно, допущение о равноточности измерения преуменьшает  $Q$ ), наименьшую – программа частных створов. Напомним, что обычные программы створных наблюдений, включая и программы последовательных и частных створов, могут быть применены лишь ограниченно для контроля технологического оборудования при эксплуатации, в то время как программы створных наблюдений путем построения вспомога-

ных створов, параллельных основной плоскости относимости, дают возможность контролировать прямолинейность объектов практически в любых условиях.

*Пути совершенствования программ створных измерений при построении вспомогательных створов, параллельных основной плоскости относимости*

Дальнейшего повышения точности рассмотренных программ створных измерений можно достичь, если будут созданы рациональные способы автономного построения вспомогательных створов для каждой пары (или группы) наблюдаемых точек. Тогда отпадает необходимость проложения ходов направлений, за счет чего уменьшится объем измерений и, как следствие, повысится точность определения искривления оси объекта.

Предположим, что каким-либо способом в точках  $II', III', \dots, J', \dots, N'$  (см. рис. 7, 8) определены азимуты направлений из точек стояния на контролируемые точки. Азимут основной плоскости относимости выбирается произвольно, обозначим его через  $\psi_0$  (на рис. 8 показано лишь направление меридиана, а азимуты отсчитываются, как обычно, от его северного конца по ходу часовой стрелки до данного направления). Напомним, что  $\psi_0$  может отличаться от азимута замыкающей объекта  $l - n$  до  $8^\circ$  (см. § 8).

Тогда подсчет искривлений оси объекта будет проводиться по формулам (11) и (12), причем

$$\xi_j^I = \psi_0 + 180^\circ - \psi_{J' - (j-1)'},$$

$$\xi_j^{II} = \psi_0 - \psi_{J' - j'},$$

где  $\psi_{J' - (j-1)'}$  и  $\psi_{J' - j'}$  — азимуты направлений из точки  $J'$  на точки  $(j-1)'$  и  $j'$ .

Используя формулы (15) и (16), переходя от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам, пишем

$$m_{d_i}^2 = \frac{2(i-1)(n-i)}{n-1} \left[ m_a^2 + \left( \frac{s}{\rho} \right)^2 m_\psi^2 \right].$$

Здесь  $m_\psi$  — средняя квадратическая ошибка азимута направления из точки стояния прибора на наблюдаемую точку.

Примем  $m_a = 0$ ,  $\frac{sm_\psi}{\rho} = m_x$  и получим

$$m_{d_i} = \sqrt{\frac{2(i-1)(n-i)}{n-1}} \cdot m_x = Qm_x.$$

Для  $n = 10$  график  $Q$  также представлен на рис. 6, из которого следует, что при принятых выше соотношениях эта программа по точности ближе других к точности программы последовательных створов.

Из реально существующих способов определения азимутов направлений для целей прикладной геодезии следует упомянуть измерения при помощи гиротеодолитов (В.А. Середович [32] для двух эталонных створов длиной 27 м с применением гиротеодолита ГИ-Б2 достиг точности определения нестворностей 0,15 мм) и астроопределения средней точности [47]. Определение азимута по Полярной можно выполнить с точностью  $\pm 8''$  (однако при этом требуется точная (до 2–3'') фиксация положения оси вращения прибора), по Солнцу – с точностью около 4'', по парам звезд в первом вертикале – с точностью около 3''.

Окончательные рекомендации, однако, можно дать лишь после апробирования названных способов в условиях промышленной площадки.

### Глава 3

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РАБОТАЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ И ИХ ФУНДАМЕНТОВ

### § 10. Общие сведения и задачи измерений

При эксплуатации технологического оборудования возникает необходимость определения относительных смещений его фундаментов в плане и по высоте. Можно разделить эти смещения на кратковременные, с возвращением фундамента в первоначальное положение за один цикл работы агрегата, и долговременные, без такого возвращения.

Задача выявления долговременных смещений сводится к определению деформаций и осадок фундаментов оборудования путем геодезических наблюдений фиксированных точек на фундаментах через определенные промежутки времени (см. [37], [23], [45], а также гл. 6).

Кратковременные смещения фундаментов зависят от типа фундаментов и оборудования и в основном могут быть вызваны нарушениями в структуре основания, недопустимыми деформациями фундаментов и узлов агрегатов. Кратковременные смещения фундаментов не остаются постоянными, а меняются с изменением технологического режима, гидрологических и других окружающих условий.

Из практики хорошо известны трудности с эксплуатацией мостовых кранов, когда в результате деформаций и осадок несущих подкрановых колонн и их оснований верх колонн перемещается при движении крана. Измерение этих смещений позволяет правильно проанализировать состояние колонн и разработать ремонтные мероприятия.

Кратковременные деформации за один цикл работы оборудования особенно ярко проявляются на тихоходных агрегатах. Так, например, при строительстве крупногабаритных вращающихся печей на цементных заводах и предприятиях химической промышленности имеет место сооружение не только жестких опор, но и опор, верх которых за счет изгиба стоек упруго податлив в поперечном к оси печи направлении. Эти запроектированные в небольших пределах перемещения позволяют существенно ослабить внутренние напряжения в системе печь — фундаменты.

Проверить фактические перемещения верха опор при эксплуатации агрегатов можно геодезическими методами. Данные измерений, кроме того, позволяют скорректировать методику расчета фундаментов.

Поскольку основные выводы из данной главы иллюстрируются результатами исследований на вращающихся цементных печах, ниже дается краткое описание этих агрегатов.

Вращающиеся печи — основной тип печей для обжига клинкера. Они составляют главную часть технологического оборудования цементных заводов и определяют их производственную мощность. Вращающиеся печи имеют применение также в химической промышленности, на алюминиевых заводах, на заводах по производству огнеупорных материалов. В настоящее время в мире эксплуатируется более 2600 вращающихся печей.

Конструкции, размеры и типы вращающихся печей весьма разнообразны. Различие печей определяется способом обжига клинкера, конструкциями устройств для использования тепла отходящих газов, геометрическими размерами корпусов. Первые печи имели производительность от 3 до 5 т/ч.

За послевоенный период производительность вращающихся печей возросла до 50—70 т/ч. Это произошло в основном благодаря укрупнению печных агрегатов, т.е. увеличению их диаметра и длины. Так, вращающаяся печь 4,5х170 м имеет производительность 50 т/ч, а печь 5х185 м — 72—75 т/ч. В настоящее время построена печь для мокрого способа производства 7х230 м. Ее производительность достигает 3000 т/сут.

В будущем все больше будет строиться печей для сухого способа производства. В нашей стране уже действуют технологические линии с печами 5х75 м производительностью 1600 т/сут и с печами 6,4х95 м производительностью 3000 т/сут. Проектируется печь мощностью 3000 т/сут, в которой благодаря использованию реактора-декарбонатора габариты агрегата уменьшены до 4,5х80 м. Реально создание печи мощностью 5000 т/сут размером 5х100 м.

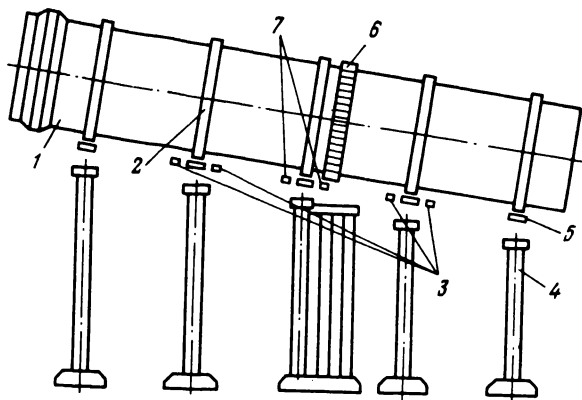


Рис. 10. Схема вращающейся печи

Масса вращающихся печей довольно значительна. Так, масса печи 4,5x170 м составляет около 2800 т.

Вращающаяся печь (рис. 10) — это цилиндрический корпус 1, обычно сварной, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом. Печи, у которых диаметр корпуса не является постоянным, называются печами с пережимом. На корпус надеты бандажы 2 прямоугольного сечения. Корпус печи состоит из отдельных колец обечаяек. Подбандажные обечайки называются опорными, к опорным обечайкам привариваются металлические пластины — подбандажные накладки. Между бандажными и подбандажными накладками имеется диаметральный зазор. Посредством бандажей масса корпуса и находящегося в нем материала передается опорными роликами 5. Опорные ролики установлены на металлических фундаментных рамах 4, которые при помощи анкерных болтов жестко связываются с железобетонными фундаментами и заливаются цементом. Число фундаментов бывает до девяти.

Вращение печи осуществляется электродвигателем через редуктор и укрепленную на корпусе венцовую шестерню 6. Частота вращения печи при работе агрегата составляет  $(0,5 - 1/60)^{-1}$  об/мин).

На опоре с редуктором установлены упорные ролики 7, препятствующие смещению корпуса в направлении оси печи. Для предотвращения аварии в случае срыва упорного ролика на опорах, соседних в редукторной, установлены прочные упорные приспособления. Они состоят из двух неподвижных упоров 3 с одной и другой стороны бандажя 2. Ось печи и опорных роликов имеет одинаковый наклон.

Температура газового потока в печи достигает 1600 °С в зоне спекания, постепенно падая к концам печи. Несмотря на значительную толщину футеровки, корпус печи снаружи может нагреваться до температуры выше 300 °С.

Конструкции печей постоянно совершенствуются. Так, перспективным считается внедрение вварных пустотелых бандажей трапецидального сечения, подшипники скольжения заменяются подшипниками качения, для автоматической регулировки осевых перемещений печи применяются гидроупоры, созданы гидравлические и механические роликоопоры.

Положение корпуса печи без влияния внешних воздействий и перемещения фундаментов можно определить двумя характеристиками. Первая – ось ненапряженного корпуса печи, под которой понимается ломаная линия, соединяющая центры тяжести опорных обечаек корпуса, находящегося в невесомом состоянии. Вторая характеристика – ось ложа печи. Под осью ложа печи следует понимать ломаную линию, соединяющую воображаемые центры тяжести опорных обечаек, положение которых определяется лишь положением установленных при монтаже опорных роликов. При этом следует полагать корпус печи невесомым и не оказывающим силовых воздействий на роликоопоры.

Во время работы ось ложа не остается постоянной. Она все время изменяется в результате взаимодействия печи и ее фундаментов.

При вращении печи центры тяжести опорных обечаек и бандажей описывают некоторый замкнутый контур. Поэтому под осью печи будем подразумевать некоторую ломаную линию, соединяющую центры криволинейных контуров, описанных при работе агрегата центрами тяжести опорных обечаек корпуса.

В дальнейшем вместо выражения "центры криволинейного контура, описанного центром тяжести бандаж или опорной обечайки" будем говорить просто "центр бандаж" и "центр обечайки".

## **§ 11. Струнный способ измерения горизонтальных колебаний верха высоких фундаментов**

### *Формулы подсчета горизонтальной составляющей смещения верха фундаментов*

Для измерения кратковременных смещений верха фундаментов оборудования применяются как геодезические (способ подвижной марки; малых углов; отсчета вертикальной нитью трубы теодолита по рейке, укрепленной на верхней части фундамента, т.е. способом, аналогичным способу бокового нивелирования; использования цилиндрических уровней геодезических приборов или электронных уровней и т.п. [37]), так и фотограмметрические способы (фотографирование при помощи фото-теодолита через определенные промежутки времени марок на фундаменте). Как правило, эти измерения дискретны, в ряде случаев не обеспечивают требуемой точности, иногда излишне громоздки и трудноприменимы.

Использование струнного способа устраняет многие из перечисленных недостатков.

Измерения, основанные на принципе фиксации изменений длин при помощи экстензометров [6], [45], заключаются в следующем. За верх сооружения закрепляется струна (в точке  $A$ , рис. 11), которая пропускается через блок радиуса  $p$ , к ней подвешивается груз  $G$ . Струна имеет угол наклона  $\nu$ . Если точка  $A$  сместилась и заняла новое положение  $A'$  (горизонтальная составляющая перемещения  $\Gamma$ , вертикальная —  $h$ ), то струна будет иметь наклон  $\nu'$ , груз переместится на фиксируемую соответствующим образом величину  $h_{\Gamma}$ .

Интересующая нас горизонтальная составляющая  $\Gamma$  смещения может быть выражена так

$$\Gamma = s_A - s_{A'}$$

где  $s_A$  и  $s_{A'}$  — горизонтальные расстояния от точек  $A$  и  $A'$  до центра блока.

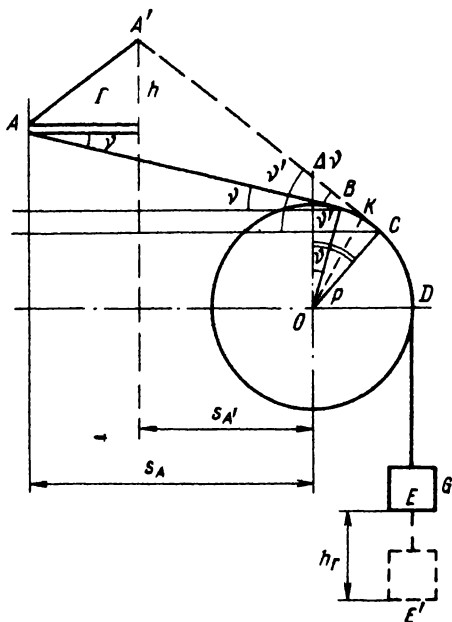


Рис. 11. Схема струнного способа определения горизонтального смещения верха фундамента

Обозначив точки касания струны к блоку через  $B$  (первое положение струны) и  $C$  (второе положение струны), можем записать следующее соотношение

$$AB + \cup BC + \cup CD + \cup DE = A'C + CD + DE + h_{\Gamma}$$

или

$$\frac{s_A}{\cos \nu} + p g \nu = \frac{s_{A'}}{\cos \nu'} + p \operatorname{tg} \nu' - \cup BC + h_{\Gamma}. \quad (19)$$

Дальнейшее преобразование формулы (19) выполняют при следующих условиях: горизонтальная составляющая  $\Gamma$  незначительна по сравнению с длиной струны (например, даже для вращающихся печей на упругоподатливых фундаментах это смещение лишь в отдельных случаях достигает 50 мм при длине струны 15 м, а для большинства фундаментов величины смещений значительно меньше); величина  $\Delta \nu' = \nu' - \nu \approx (h + 0,5\Gamma \sin \nu) / s_A$ ;  $\nu \approx \nu' \leq 45^\circ$ ;  $h \leq 2$  мм;  $p = 25$  мм;  $s_A \approx 10$  м.

Тогда имеем

$$\Gamma = \frac{h_{\Gamma}}{\cos \nu} + \frac{h \operatorname{tg} \nu}{\cos^2 \nu} - \frac{h \Gamma^2 \operatorname{tg} \nu}{s_A}. \quad (20)$$

Вторым и третьим членами формулы (20) можно пренебречь при

$$\operatorname{tg} \nu \leq (q\xi)/k,$$

где  $q$  — коэффициент, определяющий часть допускаемой при этом ошибки относительно всей средней квадратической ошибки  $m_{\Gamma}$  определения величины  $\Gamma$ ;

$$\xi = m_{\Gamma} / h_{\Gamma}; \quad k = h / h_{\Gamma}.$$

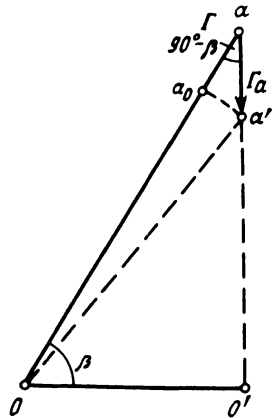
Поэтому в случае выполнения приведенного соотношения можно пользоваться упрощенным выражением

$$\Gamma = h_{\Gamma} / \cos \nu. \quad (21)$$

Обычно  $\xi = 0,1$ ;  $q = 0,25$ , а  $k$  зависит от характера смещения верха фундамента. Так, для вращающихся печей  $4,5 \times 170$  м для упругоподатливых фундаментов  $k = 0,02-0,17$  ( $\nu = 51^\circ - 8^\circ$ ), а для усиленных фундаментов  $k = 0,21-0,91$  ( $\nu = 7^\circ - 2^\circ$ ).

В практике может встретиться случай, когда невозможно расположить струну по направлению измеряемого смещения (рис. 12).

Рис. 12. Схема измерения при расположении струны под углом к направлению смещения



Если точка  $A$  переместилась в новое положение  $A'$  (на рис. 12 показаны проекции  $a$  и  $a'$  этих точек на горизонтальную плоскость), то определив  $\beta$  – угол между струной и перпендикуляром к направлению измеряемого смещения, можно найти горизонтальную составляющую смещения по формуле

$$\Gamma_a = \Gamma / \sin \beta .$$

С учетом формулы (21) после необходимых действий, полагая также точность определения углов  $\nu$  и  $\beta$  одинаковой, запишем формулу для оценки точности

$$m_{\Gamma_a}^2 = \frac{1}{\cos^2 \nu \sin^2 \beta} m_{h\Gamma}^2 + (\Gamma_a)^2 (\operatorname{tg}^2 \nu + \operatorname{ctg}^2 \beta) \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2 .$$

Здесь через  $m$  обозначены средние квадратические ошибки величин, записанных индексами при  $m$ .

Например, для вращающихся печей при максимальных значениях входящих в формулу величин, т.е. при  $\nu \approx \beta = 45^\circ$ ,  $m_{h\Gamma} = 0,1$  мм,  $\Gamma_a = 50$  мм,  $m_\nu = 0,5^\circ$ , получим  $m_{\Gamma_a} = 0,7$  мм, чего вполне достаточно при измерениях  $\Gamma_a$ .

Точность определения  $\Gamma_a$  струнным способом будет зависеть во многом также от колебаний окружающей температуры и коэффициента линейного расширения материала, из которого изготовлена струна. Конкретная точность определяется по результатам натуральных исследований.

### *Технические средства для дискретных и непрерывных измерений горизонтальных перемещений*

Изменение расстояния от места закрепления струны до места установки блока (см. рис. 11) можно измерить при помощи различного типа экстензометров (см., например, [6 гл. III, § 13], а также [45, разд. 8.3.4, 8.4.2.5, 8.4.3.3.4]). Известные экстензометры позволяют выполнить дискретные наблюдения при длине струны  $S$  от 1 до 80 м с точностью  $5 \cdot 10^{-6} S - 5 \cdot 10^{-5} S$ , а автоматические системы с использованием инварной струны и емкостных датчиков — с точностью до нескольких микрометров. Наибольшее влияние на точность измерений оказывает изменение температуры окружающей среды, поэтому принимаются различные меры для ослабления этого влияния. Указанные выше экстензометры используются в основном в геофизике для контроля деформаций скальных пород, грунта и в строительстве плотин, туннелей, при монтаже строительных конструкций и т.п. Они имеют небольшой диапазон измерений в пределах от долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Выбор типа экстензометра зависит от специфических условий объекта и решаемых задач.

Так, например, для дискретных измерений колебаний верха фундаментов крупногабаритных вращающихся печей можно применить:

шкалу, укрепленную на струне в районе блока, и индекс, закрепленный на блочном устройстве и служащий для отсчета по перемещающейся вместе со струной шкале. При размахе колебаний от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров точность составляет 0,3–0,5 мм;

индикатор часового типа [31]. На фундаментах соседней печи, которая в момент измерений не работает, устанавливается на штативе индикатор часового типа (рис. 13). Штифт индикатора 10 упирается в подковообразное металлическое приспособление 7. От одного конца этого приспособления протягивается струна 6 на фундамент, колебания которого определяют и закрепляется за какую-нибудь деталь. От другого конца приспособления струна пропускается через блок 8, и к ней подвешивается груз 9 массой 10 кг. При колебаниях фундамента груз 9 поднимается и опускается, перемещая приспособление 7 и штифт индикатора 10. При определенном положении печи по индикатору берут отсчеты. Разность отсчетов дает смещение верха фундамента в горизонтальном направлении.

Следует подчеркнуть, что хотя по индикатору можно делать отсчет с точностью до 0,01 мм, колебание и смещение струны вызывают постоянное перемещение указателя и зафиксировать его положение точнее 0,1 мм не удастся. По разностям двойных измерений точность определения колебаний оказалась 0,2 мм;

датчики с автоматической записью. Поскольку датчики такого рода промышленность не выпускает, для их изготовления приходится

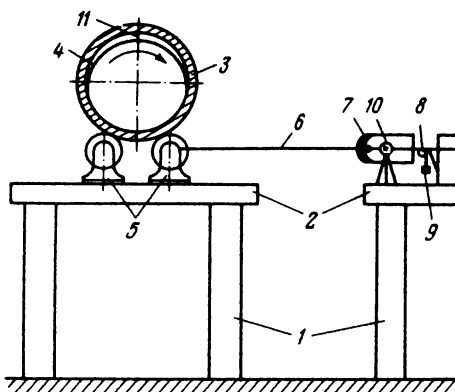


Рис. 13. Схема измерений поперечных перемещений при колебаниях верха фундаментов вращающихся печей до 3 мм:

1 – стойки фундаментов; 2 – верхние фундаментные плиты; 3 – бандаж; 4 – корпус; 5 – роlikоопоры; 6 – струна; 7 – подковообразное приспособление; 8 – блок; 9 – груз; 10 – индикатор; 11 – диаметральный зазор

использовать отдельные элементы серийных приборов другого назначения. Например, при наблюдениях колебаний верха фундаментов вращающихся печей 4,5х170 м с величиной перемещений до 50 мм были применены датчики и записывающие устройства. Суть измерений заключается в следующем (рис. 14): от фундамента 4 протягивается стальная проволока  $\delta$  диаметром 0,8 мм к датчику 9, установленному на полу цеха на штативе. Датчик (рис. 15) представляет собой реохорд 4 – калиброванное сопротивление из манганиновой проволоки в виде спирали. Манганиновая проволока наматывается на медную основу, изолированную металвином. Реохорд крепится на диске из пресс-порошка. Сопротивление реохорда меняется в зависимости от положения контактного ползунка 2, укрепленного на одной оси 3 с роликом датчика. Ролик датчика находится на обратной стороне металлической пластины 1 (см. рис. 15), на которой смонтированы, кроме того, еще два ролика 1 и 3 (рис. 16). Струна, идущая от опоры, имеет на конце тросик 5 диаметром 2 мм и длиной 1,5 м. Тросик соединен со струной зажимом. Вначале тросик идет через направляющий ролик, затем обертывается вокруг ролика датчика и через блок проходит вниз, где к нему подвешивается груз 6.

Пластина 4 с укрепленными на ней роликами 1, 2, 3 датчика может быть наклонена в вертикальной плоскости, для того чтобы оси роликов лежали по направлению измерительной струны (см. рис. 16).

Колебания в точке 10 (см. рис. 14) через смещение струны вызывают угловое смещение ролика 2 датчика, связанного с ним контактного ползунка, и, тем самым, изменение сопротивления реохорда. Реохорд

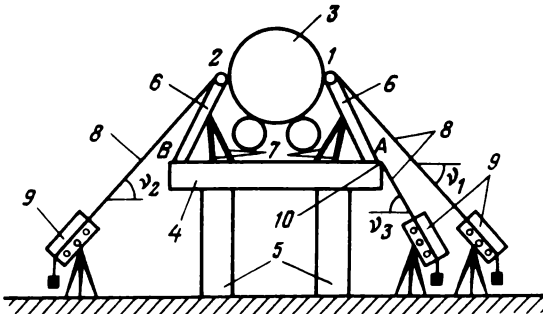


Рис. 14. Схема измерения деформаций и поперечных перемещений при колебаниях верха фундаментов до нескольких сантиметров:

1, 2 – оси с роликами; 3 – бандаж; 4 – верхняя фундаментная плита; 5 – стойки фундамента; 6 – раздвижные штанги; 7 – растяжки; 8 – струны; 9 – датчики

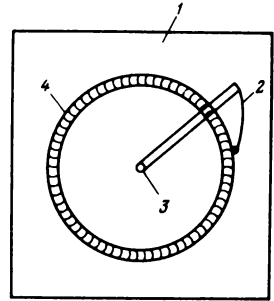


Рис. 15. Схема датчика для измерения поперечных перемещений деталей вращающейся печи

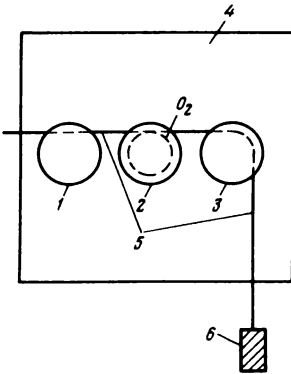


Рис. 16. Схема роликов датчика измерения поперечных перемещений деталей вращающейся печи

и ползунок соединены проводами с записывающим устройством КСМ-4, которое обычно широко применяется в производстве для записи показаний датчиков температуры. Все изменения сопротивления реохорда непрерывно фиксируются на ленточной диаграмме.

Устройство КСМ-4 имеет различные скорости продвижения ленты. Для измерений нужно использовать скорость 7200 мм/ч, т.е. в этом случае длина диаграммы за один оборот печи составит около 12 см. Перед измерениями датчики следует тарировать. Для этого многократно задаются перемещения струны, которые фиксируются с точностью до 0,1 мм на приспособлении типа суппорта и одновременно через датчик записываются на диаграмме.

Во время наблюдений эклиметром с точностью до 0,5° определяют

Рис. 17. Схема реохорда датчика:

1 – пластина; 2 – реохорд; 3 – ролик; 4 – ползунок

угол наклона струны. По формуле (21) вычисляют горизонтальную составляющую смещения края фундамента.

При подготовке датчиков и приборов записи следует учесть, что они имеют разные параметры. Так, реохорд может менять сопротивление от 0 до 30 Ом, а прибор КСМ-4 записывает измерение сопротивления в пределах от 0 до 11,29 Ом. Поэтому нужно подобрать такой диаметр ролика датчика (ролик 2, см. рис. 16), чтобы при максимальном размахе колебаний фундаментов ползунок перемещался по реохорду с изменением сопротивления не более 11 Ом. В линейной мере, при общей длине реохорда, несколько большей 400 мм, рабочая часть должна быть не более 160 мм. Другое условие, диктующее выбор диаметра ролика датчика, заключается в ограничении разрешающей способности реохорда за счет толщины витков манганиновой проволоки (30 витков в 1 см).

Обозначив радиус реохорда  $r$ , а радиус ролика  $r_p$  (рис. 17), можем записать

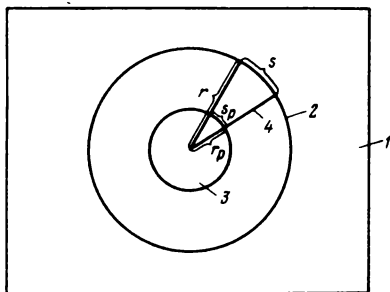
$$r_p = \frac{r}{s} s_p, \quad s = \frac{r}{r_p} s_p,$$

где  $s_p$  – линейное перемещение точки на ролике при смещении его вследствие перемещения струны;  $s$  – линейное перемещение ползунка по реохорду.

При размахе колебаний верха фундаментов до  $s_p = 3$  мм,  $r = 73,5$  мм,  $s = 160$  мм получим  $r_p = 1,5$  мм.

В то же время один виток реохорда отстоит от другого на расстоянии около 0,3 мм. Выдвинув требование, чтобы такое перемещение на реохорде соответствовало линейному смещению точки на 0,1 мм на внешней окружности ролика, т.е. приняв  $s_p = 0,1$  мм;  $s = 0,3$  мм, получим, что  $r_p = 25$  мм. Поэтому радиус ролика следует взять равным 25 мм. При размахе колебаний до 3 мм ползунок сместится на 9 мм, при размахе колебаний до 50 мм – на 150 мм. Таким образом, выбор диаметра ролика датчика диктуется разрешающей способностью реохорда. Так как ширина диаграммы на КСМ-4 равна 250 мм, что соответствует смещению ползунка реохорда на 160 мм, то при размахе колебаний фундаментов до 3 мм они запишутся на диаграмме полосой 15 мм, а при колебаниях до 50 мм запись займет практически всю полезную ширину диаграммы.

Ошибки измерений зависят как от амплитуды колебаний опор и ве-



личин деформаций бандажа, так и от вибраций и нерегулярных сотрясений фундаментов. Последние трудно учесть, хотя они и влияют решающим образом на точность метода. В среднем ошибки измерений составляют 10–20 % от величин деформаций, достигая в редких случаях 35 % [31].

## § 12. Измерение кратковременных вертикальных перемещений

### *Измерение перемещений верха высоких фундаментов*

Величины перемещения верхней части фундаментов за один цикл работы агрегата, как правило, небольшие, поэтому для их определения требуются точные способы измерений. Общая величина перемещения включает перемещение вследствие крена фундамента и собственно вертикального смещения. Последнее обусловлено кратковременной деформацией основания фундамента, а также упругими деформациями самого фундамента. При необходимости их можно определить раздельно, если организовать одновременные измерения кратковременных деформаций основания и верха фундамента.

Рассмотрим организацию измерений общей величины вертикального перемещения фундаментов на примере вращающихся печей.

На исследуемом фундаменте (рис. 18) устанавливают штативы с укрепленными на них линейками длиной в несколько дециметров. Толщина штрихов на линейках должна быть около 0,3 мм, поскольку деления меньшей толщины при длине визирного луча 10–15 м бывают плохо видны. На расположенной рядом опоре соседней печи, которая в момент измерений не работает, устанавливают два нивелира типа Н2. Штативы с линейками помещают с двух сторон фундамента. Трубу одного нивели-

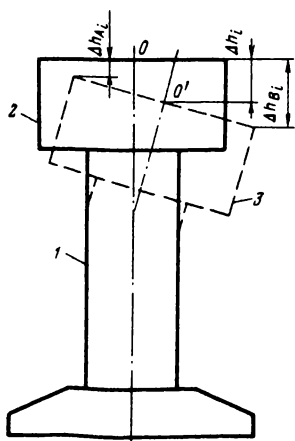


Рис. 18. Схема измерения перемещения верха фундамента по высоте:

1 – стойка фундамента; 2 – верхняя фундаментная плита; 3 – положение верхней фундаментной плиты после вертикального перемещения фундамента и изгиба стойки

ра наводят на одну линейку, трубу другого – на другую линейку. При определенном положении печи наводят биссекторы на выбранные штрихи линейек. Разность отсчетов даст смещение краев фундамента. Измерения выполняют дважды. Вертикальное смещение середины фундамента  $O$  и  $O'$  (см. рис. 18) можно найти по формуле

$$\Delta h_i = (\Delta h_{A_i} + \Delta h_{B_i})/2,$$

где  $\Delta h_i$  – вертикальное смещение точки  $O$  в точку  $O'$  при  $i$ -м положении печи относительно 1-го положения;  $\Delta h_{A_i}$  и  $\Delta h_{B_i}$  – вертикальные смещения противоположных краев фундамента при  $i$ -м положении печи относительно 1-го положения.

Оценку точности можно провести по формуле

$$m_{\Delta h} = m\sqrt{2},$$

где  $m_{\Delta h}$  – средняя квадратическая ошибка измерения перемещения верха фундамента;  $m$  – средняя квадратическая ошибка отсчета по линейке на штативе.

Использование указанной методики позволило установить вертикальные перемещения фундаментов вращающихся печей 4,5x170 м до 0,6 мм при средней квадратической ошибке около 0,1 мм.

#### *Исследование вертикальных перемещений мест закладки осадочных марок на фундаментах оборудования и колебаний пола цеха*

Нивелирование с целью определения осадок фундаментов оборудования выполняют в сложных условиях действующих цехов. Поскольку в цехе, как правило, имеется несколько технологических линий, нивелирные работы приходится проводить во время работы как минимум одной, а то и всех линий. Поэтому перед составлением проекта наблюдений необходимо выполнить натурные измерения возможных кратковременных перемещений мест заложений осадочных марок и установки прибора и учесть эти перемещения при разработке методики наблюдений.

Рассмотрим способы измерения таких вертикальных перемещений.

В первом случае, когда в непосредственной близости от фундамента нельзя установить нивелир вне зоны колебаний пола цеха, используют приспособление (рис. 19); которое представляет собой сваренную из уголка переносную металлическую раму 1, устанавливаемую на фундаменте посредством двух распорных винтов 2 со штурвалами и упора 3. На металлической пластине 4 закрепляют станovým винтом нивелир типа Н2. Зрительную трубу ориентируют вдоль оси печи и при восьми

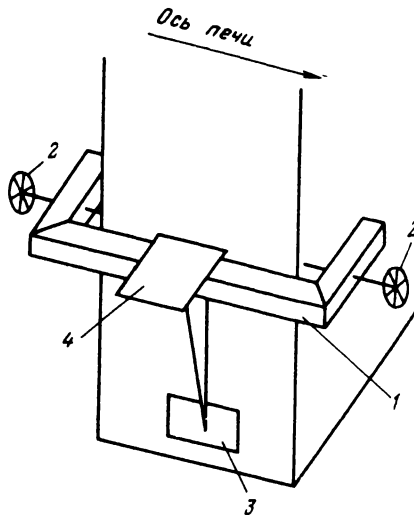


Рис. 19. Схема приспособления для измерения перемещений фундаментов вращающейся печи на уровне закрепления осадочных марок

положениях печи (большее число отсчетов за один оборот агрегата сделать трудно) берут отсчеты по концу пузырька уровня. Затем трубу располагают поперек оси агрегата и измерения повторяют. Зная цену деления уровня и расстояния между осадочными марками, можно подсчитать относительные изменения превышений между ними. Так, для вращающихся печей 4,5x170 м на упругоподатливых опорах было зафиксировано максимальное изменение превышений до 3 мм между осадочными марками, находящимися на соседних фундаментных стойках. Средняя квадратическая ошибка, найденная по разностям двойных измерений, оказалась 0,02 мм.

Вторая методика заключается в том, что на фундаменте неподвижно укрепляют нивелирную реечку, а на расстоянии, где действие колебаний фундаментов на стабильность пола цеха не сказывается, устанавливают нивелир типа Н2. При различных положениях агрегата за один его оборот берут отсчеты по реечке. По отсчетам можно рассчитать вертикальное смещение края фундамента. Было выполнено исследование перемещения края одного из фундаментов вращающейся печи 4,5x170 м на высоте около 1 м над уровнем пола цеха за один оборот агрегата. Нивелир находился на расстоянии 8 м от фундамента. Перемещение носило синусоидальный характер, максимальный размах составил 0,9 мм. Средняя квадратическая ошибка измерения смещения по разностям двойных наблюдений оказалась 0,1 мм. Из корреляционного анализа результатов измерения смещений осадочной марки  $\Delta h_i$  (мм) и деформации опорного

узла агрегата (см. § 13) установлена зависимость  $\Delta h_i = 0,096 - 0,009 c_i^Г - 0,057 c_i^В$ , где  $c_i^Г$ ,  $c_i^В$  – горизонтальное и вертикальное смещения центра бандажа вращающейся печи при  $i$ -м положении агрегата относительно первого положения.

При разработке программы измерения осадок по этой формуле можно заранее рассчитать возможные кратковременные смещения осадочных марок для однотипных фундаментов по проектным величинам смещений центра бандажа и учесть их в методике наблюдений.

На методику нивелирования может существенно влиять и перемещение по высоте пола цеха. Так, в цехе четырех вращающихся печей 4,5хх170 м определены относительные вертикальные колебания пола цеха в местах установки прибора при измерении осадок. Наблюдения выполнены при помощи нивелира НА-1, и изготовленного легкого металла и шарнирно закрепляемого на двух штативах вспомогательного устройства (рис. 20). Измерения заключались во взятии отсчетов по уровню при восьми положениях ближайшего агрегата.

Чтобы получить колебания пола цеха относительно точки, не подверженной влиянию деформаций, прокладывались ходы  $A, B, C, \dots, E$  (см. рис. 20) от середины цеха в направлении, перпендикулярном к продольным осям агрегатов, до точек, где отсутствовали отклонения пузырька уровня (пять-шесть установок). В результате зафиксированы колебания пола цеха до 0,25 мм при точности их измерения 0,06 мм. Об учете вертикальных перемещений пола при геодезических наблюдениях сказано в гл. 6.

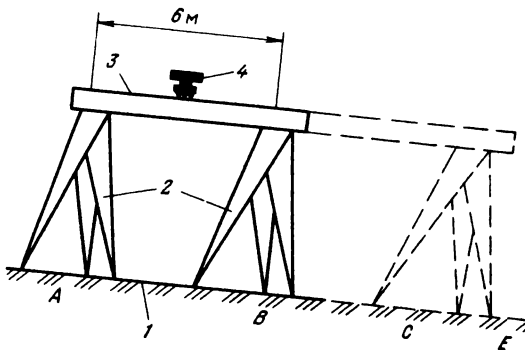


Рис. 20. Схема определения колебаний пола промышленного цеха:

1 – пол; 2 – штативы; 3 – вспомогательное устройство; 4 – нивелир

### § 13. Определение деформаций элементов вращающихся агрегатов во время их работы

#### Цели и задачи

В различных частях промышленного оборудования применяются вращающиеся детали, положение и форма которых в ряде случаев решающим образом определяют качество работы агрегата.

Имеются крупногабаритные вращающиеся агрегаты, геодезический контроль за которыми особенно сложен организационно и технически. Сложность усугубляется и тем, что деформации опорных узлов переменны от цикла к циклу работы оборудования и меняются в течение всего времени эксплуатации.

На величины деформаций отдельных элементов и опорных узлов вращающихся агрегатов имеются вполне определенные нормативные допуски. Из практики, однако, хорошо известно, что фактические величины деформаций зачастую значительно превышают нормативные. Поэтому с целью корректировки расчета агрегатов и для правильной организации контроля их пространственного положения необходимо выполнять натурные исследования различных деформаций деталей работающего оборудования.

Эти деформации можно определить либо непосредственным обмером деталей в различные моменты времени, либо измерением смещений отдельных их точек.

Относительно небольшие по размерам детали обмеряются машиностроительными средствами (см., например, табл. 1, п 1, а; 2, б; 1, в; 2; 3, д).

Когда контролируют крупногабаритные детали оборудования, машиностроительные способы становятся либо чересчур громоздкими, либо вообще не могут быть применены, например, при контроле работающих агрегатов. Тогда эти задачи решают геодезическими способами.

Рассмотрим суть определения таких важных характеристик деформации вращающихся элементов, как овальность и смещение центра их поперечного сечения во время работы оборудования.

Предположим, что от двух вспомогательных вертикальных плоскостей  $AA'$  и  $BB'$  (рис. 21) измерены расстояния  $B_1^{\Pi}$  и  $B_1^{\Gamma}$  до отвесных касательных к элементу вращения. После поворота элемента на некоторый угол горизонтальная проекция первоначального диаметра  $D_1$  в результате остаточных деформаций или силовых воздействий изменится и будет  $D_i$ , а его центр  $O$  сместится в точку  $O'$ . Горизонтальная проекция этого смещения будет  $c_i^{\Gamma}$ .

Согласно рис. 21 можем записать

$$b_1^{\Pi} + D_1 + b_1^{\Pi} = b_i^{\Pi} + D_i + b_i^{\Pi}$$

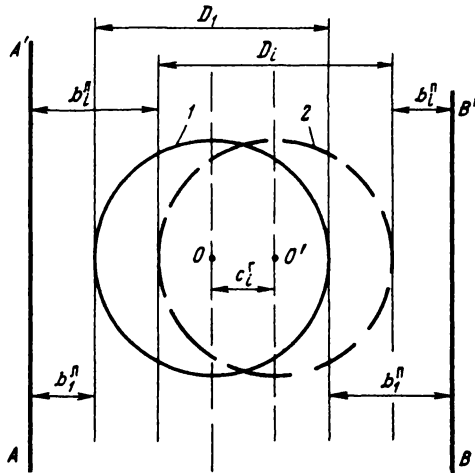


Рис. 21. Схема определения деформаций элементов вращающихся агрегатов

$$b_1^{\pi} + \frac{D_1}{2} + c_i^r + \frac{D_i}{2} + b_i^{\pi} = b_1^{\pi} + \frac{D_1}{2} - c_i^r + \frac{D_i}{2} + b_i^{\pi},$$

где  $b_i^{\pi}$  и  $b_i^{\pi}$  — расстояния от плоскостей  $AA$  и  $BB$  до отвесных касательных к элементу при его  $i$ -м положении.

Отсюда овальность  $\Delta D_i$  и смещение центра элемента будут

$$\Delta D_i = D_i - D_1 = (b_1^{\pi} - b_i^{\pi}) + (\phi_i^{\pi} - b_i^{\pi}), \quad (22)$$

$$c_i^r = \frac{1}{2} [(b_1^{\pi} - b_i^{\pi}) + (b_i^{\pi} - b_1^{\pi})]. \quad (23)$$

С точки зрения силовых взаимодействий опорных элементов представляет также интерес изменение диаметра поперечного сечения элемента вращения после поворота его ровно на  $180^{\circ}$ .

С учетом формулы (22) можем записать

$$\begin{aligned} \Delta D_i'_{+180^{\circ}} &= D_i - D_{i+180^{\circ}} = \Delta D_i - \Delta D_{i+180^{\circ}} = \\ &= (b_{i+180^{\circ}}^{\pi} - b_i^{\pi}) + (b_i^{\pi} - b_{i+180^{\circ}}^{\pi}), \end{aligned} \quad (24)$$

причем  $b_{i+180^{\circ}}^{\pi}$  и  $b_i^{\pi}$  — расстояния от плоскостей  $AA'$  и  $BB'$  до отвесных касательных к телу вращения после поворота его из  $i$ -го положения на  $180^{\circ}$ .

Аналогичные соотношения можно составить и для деформаций в вертикальной или любой другой плоскости.

Средние квадратические ошибки величин  $\Delta D_i$ ,  $c_i^\Gamma$  и  $\Delta D_{i+180^\circ}$  выг-  
лядят так

$$m_{\Delta D} = m_{\Delta D'} = 2m, \quad m_{c^\Gamma} = m,$$

где  $m$  – средняя квадратическая ошибка измерения смещения края вращающегося элемента.

### *Способы дискретного определения овальности тел вращения и смещений центров их поперечных сечений*

Из приведенного выше видно, что определение овальности и смещения центра поперечного сечения вращающегося элемента предполагает измерение расстояний от вспомогательных плоскостей до параллельных им плоскостей, касательных к внешнему контуру исследуемого элемента.

Механический способ заключается в измерении указанных расстояний шулами, линейками (для небольших деталей) или индикаторами. Последние закрепляют около вращающегося элемента на штативах, кронштейнах или других специальных приспособлениях.

Для определения смещения низа бандажей вращающихся печей по высоте под бандажами на штативе устанавливают индикатор часового типа [31]. В штifte индикатора укрепляется ролик.

При вращении печи штифт индикатора перемещается соответственно изменениям положения по высоте низа бандажа. По индикатору при определенном положении печи берут отсчет с точностью 0,1 мм. Измерения выполняют дважды, из результатов берут среднее. Полное смещение низа бандажа по вертикали получают суммированием вертикальных перемещений верха фундамента и низа бандажа. Точность измерений пересчитанных смещений равна 0,1 мм при максимальных смещениях до 2 мм [31].

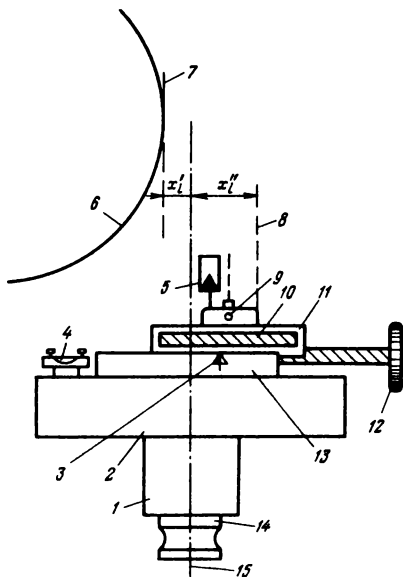
Механический способ пригоден для таких тел вращения, которые по производственным условиям позволяют устройство приспособлений для установки индикаторов и взятие отсчетов по ним.

Однако для крупногабаритных деталей при размерах их 5 м и более механический способ может быть применен ограниченно, например, лишь для измерения смещения низа детали. Поэтому его заменяют другими, например оптическими. Хорошо зарекомендовали себя в практике измерений приборы вертикального проектирования.

Примером использования подобных приборов в геодезическом контроле технологического оборудования служит применение прибора ПЦК (рис. 22) для измерения поперечных перемещений бандажей вращающихся печей [31]. Этот прибор представляет собой комбинацию подвижного оптического центрира и подвижного визирного конуса. К оси 1, вмонтированной в теодолитную баксу 14, прикреплена металлическая

Рис. 22. Схема подвижного оптического центра и визирного конуса (ПЦК):

1 – ось; 2 – пластина; 3 – индекс для отсчитывания; 4 – уровень; 5 – визирный конус с экраном; 6 – бандаж; 7 – отвесная касательная к бандажу; 8 – створ; 9 – оптический центр; 10 – линейка с миллиметровыми делениями; 11 – верхняя часть суппорта; 12 – винт; 13 – нижняя часть суппорта; 14 – бакса; 15 – ось вращения прибора



пластина 2. На металлической пластине 2 установлены взаимно перпендикулярно два цилиндрических уровня 4 (на рис. 22 виден только один уровень) и нижняя часть суппорта 13. Верхняя часть суппорта 11 с укрепленным на ней оптическим центром 9 от теодолита при помощи винта 12 может перемещаться в пределах 40 мм. На верхней, подвижной части суппорта укреплен отрезок линейки 10 с миллиметровыми делениями и черный визирный конус 5 с белым экраном. На нижней, неподвижной, части суппорта имеется индекс 3. Расстояние  $x_i'$  от оси вращения прибора до отвесной линии, касательной к бандажу, можно вычислить по формуле

$$x_i' = (b_1 - b_2)/2. \quad (25)$$

Отсчет  $b_1$  делают при наведении сетки нитей на бандаж при возрастании надписи по направлению от печи, отчет  $b_2$  – при повороте центрира вокруг оси на  $180^\circ$ . Если край бандажа находится слева от оси вращения прибора (как это имеет место на рис. 22), то  $x_i'$  имеет знак плюс, если справа – знак минус.

Расстояние  $x_i''$  от оси вращения прибора до вспомогательного створа (базовой линии), который строят при помощи теодолита и визирной марки, будет определяться по формуле

$$x_i'' = b_2' - b_1'/2, \quad (26)$$

где  $b_1'$  — отсчет по линейке в момент введения визирного конуса в створ;  $b_2'$  — аналогичный отсчет, но после поворота прибора вокруг оси на  $180^\circ$ .

Если прибор находится слева от створа, то  $x_i''$  — будет положительным, если справа — отрицательным. Для измерения поперечных перемещений краев бандажей необходимо наводить вертикальную нить прибора на край бандажа. Специальными исследованиями установлено, что ошибка наведения на край бандажа зависит от контрастности проекции бандажа на небо. Наблюдатель в окуляре прибора видит край бандажа в виде линии, которая рассматривается на фоне неба. На эту линию и наводят вертикальную нить сетки, ошибка наведения —  $0,2-0,4$  мм.

Перед измерениями поперечных перемещений системы печь — фундаменты корпус печи на каждой опоре размечают мелом на восемь частей (при большем числе делений наблюдатель не успевает брать отсчеты). Справа и слева на фундаменте от печи устанавливают штативы с теодолитными подставками, в которые вставляются ПЦК. При восьми положениях печи измеряют отрезки  $b_i^{\text{п}}$  и  $b_i^{\text{п}}$  (см. рис. 21) — расстояния от осей вращения ПЦК до отвесных касательных к бандажу при  $i$ -м положении печи. При каждом повороте печи диаметр бандажа в горизонтальном направлении изменяется в результате пластичных деформаций бандажа (овальность) и упругих деформаций, возникающих при вращении печи. Одновременно происходит смещение центра бандажа. Овальность и смещение центра бандажа относительно фундамента подсчитывают по формулам (22)–(24). Так, на печах с поперечными смещениями верха фундаментов до 3 мм были зафиксированы максимальные величины овальности 4,3 мм (точность 0,4 мм), упругих деформаций бандажа 3,9 мм (точность 0,4 мм) и смещения центра бандажа относительно фундамента 6,3 мм (точность 0,2 мм).

Заметим, что полное смещение центра бандажа в горизонтальном направлении будет складываться из перемещений центра бандажа относительно фундамента и перемещения верха фундамента. В описываемых исследованиях максимальное полное смещение центра бандажа составило 8 мм при средней квадратической ошибке около 0,2 мм.

Смещение краев крупногабаритной вращающейся детали можно определить также по способу малых углов (рис. 23). Эту методику применяют тогда, когда есть возможность установить теодолит вне зоны деформаций. Для вращающихся печей такая возможность существует для крайних бандажей. Теодолит располагают на небольшом (8–15 м) расстоянии от бандажа. Наводят среднюю нить на низ (верх) бандажа, затем вертикальную нить — на его левый (правый) край. Наведение и отсчеты делают при соответствующих положениях объекта. Таким образом измеряют смещения  $\Delta v_{\text{в}}$ ,  $\Delta v_{\text{н}}$ ,  $\Delta \beta_{\text{л}}$  и  $\Delta \beta_{\text{п}}$  наблюдаемых точек в угловой мере. Определив с соответствующей невысокой точностью прямо или косвенно расстояния  $s_{\text{в}}$ ,  $s_{\text{н}}$ ,  $s_{\text{л}}$  и  $s_{\text{п}}$ , можно подсчитать интересующие нас деформации. Так, с использованием двух теодолитов Т2 были определены деформации

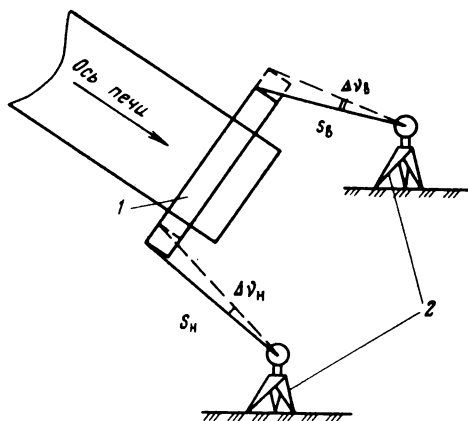


Рис. 23. Схема измерения вертикальных перемещений верха и низа бандажа вращающейся печи по методу малых углов:

1 – бандаж; 2 – прибор

одного бандажа вращающейся печи 4,5x170 м в вертикальной и горизонтальной плоскостях (табл. 4).

Расстояния от теодолитов до бандажа не превышали 9 м, измеряли их металлической рулеткой. Средние квадратические ошибки деформаций подсчитывали по разностям двойных измерений. Смещение центра бандажа при девяти положениях агрегата показано на рис. 24.

Рассмотренная методика проста и удобна, однако она применима только вне зоны действенного влияния на теодолит вибраций и сотрясений.

Таблица 4

Максимальные величины деформаций бандажа вращающейся печи 4.5x170 м, определенные по способу малых углов

№ п.п	Вид деформации	В вертикальной плоскости, мм	Средняя квадратическая ошибка, мм	В горизонтальной плоскости, мм	Средняя квадратическая ошибка, мм
1	Овальность	7,4	1,2	17,0	2,4
2	Упругие	7,2	1,2	14,0	2,4
3	Смещение центра бандажа $c^B$ , $c^Г$	5,8	0,6	47,5	1,2
4	Смещение верха опоры	—	—	42,0	0,3

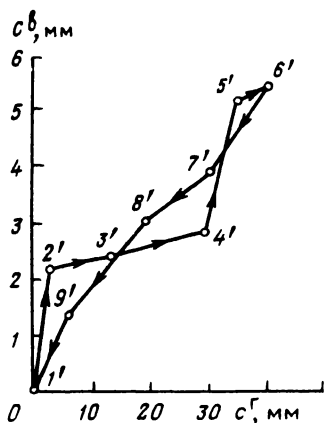


Рис. 24. График смещения центра бандажа вращающейся печи по горизонтали  $c^Г$  и вертикали  $c^В$  (1', 2', ..., 9' — положения агрегата)

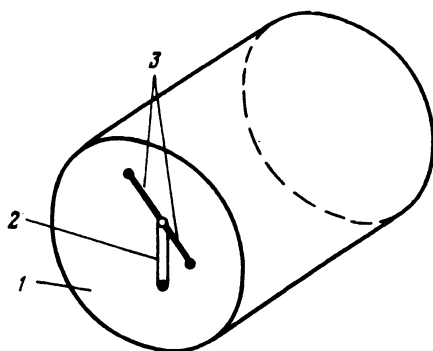


Рис. 25. Схема установки прибора ШЦ-12 в полый цилиндрический элемент

Во время остановки крупногабаритных вращающихся агрегатов на ремонт можно определить форму поперечного сечения исследуемого элемента посредством установки внутри этого элемента прибора типа ШЦ-12 [24]. Принцип измерений виден из рис. 25.

Внутри элемента 1 при помощи растяжек закрепляют стойку 2 (см. рис. 25), длина которой может меняться в зависимости от диаметра исследуемого сечения. Верх стойки снабжен визирной мишенью, позволяющей совместить центр верха стойки с продольной осью агрегата. Коромысло 3 имеет регулируемые шупы и служит для измерения расстояний от стойки до внутренней поверхности элемента. В процессе наблюдений коромысло поворачивается на назначенный угол. По результатам измерений строят конхоиду — кривую малого масштаба: вычерчивают окружность произвольного радиуса и от нее откладывают отклонения измеренных радиусов поперечного сечения от номинального. Полученная фигура характеризует форму поперечного сечения, а координаты центра тяжести ее — пространственное положение центра поперечного сечения.

#### *Непрерывная запись смещений отдельных точек тел вращения*

Непрерывное определение деформаций тел вращения основано на записи смещений отдельных точек с привлечением механофизических способов измерений. Поясним сказанное на примере измерений деформаций на некоторых типах вращающихся печей.

Процесс измерений заключается в следующем: на исследуемой опоре с двух сторон бандажа (см. рис. 14) устанавливают раздвижные трубчатые штанги *A* и *B*. Верх каждой штанги имеет ось с двумя роликами, которые прижимаются к бандажу (точки 1 и 2 на рис. 14). Штанги закрепляют на опоре растяжками. От верха штанг (точки 1 и 2) протягивают стальную струну диаметром 0,8 мм соответственно к датчикам  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , установленным на полу цеха на штативах. Записанные на диаграмме смещения по формуле (21) преобразуют в горизонтальные составляющие  $c_i$  и  $d_i$ , которые дают возможность вычислить изучаемые деформации

$$\Delta D_i = - (b_i^{\text{п}} + b_i^{\text{л}}),$$

$$\Delta D'_{i+180^\circ} = (b_{i+180^\circ}^{\text{п}} - b_i^{\text{п}}) + (b_{i+180^\circ}^{\text{л}} - b_i^{\text{л}}),$$

$$c_i^{\text{г}} = (b_i^{\text{п}} - b_i^{\text{л}})/2.$$

По результатам двойных измерений на вращающейся печи 4,5x170 м зафиксированы овальность бандажей в пределах 0,9–40,4 мм (точность 0,1–2,5 мм), упругие деформации 5,2–24,2 мм (точность 0,5–4,8 мм), смещения центров бандажей 4,2–46,0 мм (точность 0,3–3,5 мм).

Непрерывную запись смещений точек корпуса вращающихся печей выполняют при помощи контурографа (рис. 26) [35].

Прибор устанавливают на переходных площадках. Штангу 2 с роликом на конце приставляют к корпусу 1. Второй конец штанги может поворачиваться на подставке 3. На подставке 3 имеется также вертикальная стойка 4, на которой располагается тяга 5 с пером самописца 6, вычерчивающим на круглом бланке приводного диска 7 кривую перемещений точки контакта ролика штанги и корпуса. Приводной диск вращает малогабаритным электродвигателем. Точность фиксации смещений составляет 1,3 мм. Способ, однако, может быть применен при условии стабильности мест установки прибора и небольших расстояниях (в пределах нескольких метров) от прибора до объекта.

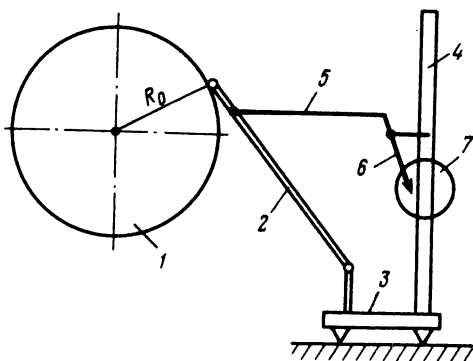


Рис. 26. Схема контурографа

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТАЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ**

**§ 14. Назначение минимального числа положений агрегата для геодезического контроля**

Целью геодезического контроля оборудования является определение искривленности осей агрегатов. Эта задача, в большинстве случаев однозначно решаемая при монтаже, несколько по-иному решается при контроле работающего оборудования. Действительно, для большинства агрегатов при их монтаже достаточно обеспечить и проконтролировать установку опорных узлов в соответствии с их проектными координатами в одном и том же, неизменном, состоянии агрегата. Даже когда такую проверку рекомендуется проводить при нескольких положениях агрегата [33], то и в этом случае за окончательное положение берут средние из всех найденных искривлений. Однако такой подход может быть

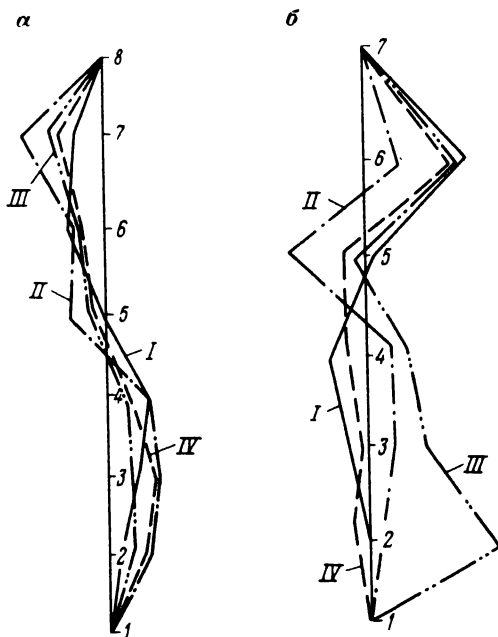


Рис. 27. Схема искривления осей вращающихся печей в плане при четырех положениях агрегата: I, II, III, IV

правильным не всегда. Поясним сказанное на примере геодезического контроля вращающихся печей Чернореченского цементного завода. Проверяли прямолинейность на ходу двух цементных печей 4,5x170 м с разными типами упругоподатливых фундаментов. Одна из этих печей имеет восемь фундаментов с максимально возможными колебаниями верха фундаментов поперек оси печи до 3 мм, вторая – семь фундаментов, на которых зарегистрированы фактические перемещения верха фундаментов до 40 мм. Перед измерениями корпуса печей в поперечном сечении размечали на четыре части, смещенные на 90° относительно друг друга. Контроль выполняли при каждом из таких четырех (*I, II, III, IV*) условных положений агрегатов (рис. 27). Хорошо видно, что картина искривлений для первой печи (рис. 27, *а*) примерно повторяется для каждого положения печи, что же касается второй печи (рис. 27, *б*), то здесь заметно симметричное изменение искривленности оси агрегата для положений *I* и *III* и соответственно для положений *II* и *IV*. Такое явление объясняется тем, что фундаменты первой печи более жесткие, чем фундаменты второй, и печь вынуждена “вписываться” в ось ложа агрегата за счет деформации корпуса. Для второй же печи ослабление внутренних усилий в системе агрегат – фундаменты происходит в большей степени вследствие изгиба стоек фундамента. Поэтому организация и проведение контрольных измерений должны учитывать особенности работы оборудования: если для первой печи вполне допустимо осреднить результаты и считать их за окончательное положение оси вращения агрегата, то для второй результаты измерений должны быть показаны для нескольких ее положений, чтобы, кроме определения оси вращения, можно было в целом судить и об искривленности оси ненапряженного корпуса.

Таким образом, с точки зрения контроля работающего оборудования следует различать три случая.

Первый, когда жесткость фундаментов значительно выше балочной жесткости корпуса агрегата. Корпус агрегата при работе деформируется и укладывается по оси ложа.

Второй, когда жесткость фундаментов соизмерима с жесткостью корпуса. При работе агрегата возникают незначительные взаимные упругие деформации.

Третий случай, когда жесткость фундаментов значительно ниже балочной жесткости корпуса. В рабочем состоянии агрегата имеют место незначительные упругие деформации корпуса и значительные упругие деформации фундаментов. Отмеченные особенности работы системы агрегат – фундаменты во многом определяют и методику геодезического контроля.

Так, при контроле вращающихся агрегатов (первый и второй случаи) для определения оси вращения, прежде всего, необходимо отыскать центр тяжести кривых, описываемых центрами тяжести опорных сечений. Обычно за положение центра тяжести таких кривых принимается среднее

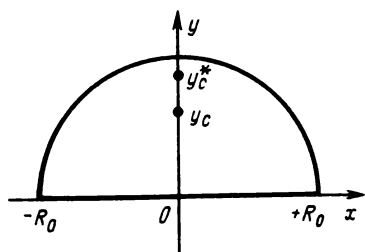


Рис. 28. Схема определения центра тяжести замкнутой кривой

арифметическое из нескольких координат центра тяжести опорного узла соответственно по оси  $x$  и по оси  $y$  [24, 33]. Система координат располагается в поперечном к продольной оси агрегата направлении. Покажем на простом примере, что среднее арифметическое из нескольких координат перемещающегося центра тяжести по замкнутой кривой не является в общем случае центром тяжести этой кривой.

Предположим, что центр тяжести опорного узла за один оборот агрегата описывает полукруг и прямую линию (рис. 28). Известно, что координаты центра тяжести замкнутой кривой находят по формулам

$$x_c = \frac{\int_a^b x (\sqrt{1 + (y_1')^2} + \sqrt{1 + (y_2')^2}) dx}{U}, \quad (27)$$

$$y_c = \frac{\int_a^b y (\sqrt{1 + (y_1')^2} + \sqrt{1 + (y_2')^2}) dy}{U},$$

где  $y_1 = f_1(x)$  и  $y_2 = f_2(x)$  — уравнение верхней и нижней частей контура,  $U$  — длина всего контура.

В нашем примере

$$y_1 = \sqrt{R_0^2 - x^2}, \quad y_2 = 0,$$

и координаты центра тяжести кривой будут

$$x_c = \frac{\int_{-R_0}^{+R_0} x \left( \sqrt{1 + \frac{x^2}{R_0^2 - x^2}} + 1 \right) dx}{\pi R_0 + 2R_0} =$$

$$= \frac{1}{\pi R_0 + 2R_0} \left( -R_0 \int_{-R_0}^{+R_0} \frac{x dx}{\sqrt{R_0^2 - x^2}} + \int_{-R_0}^{+R_0} x dx \right) =$$

$$= \frac{1}{\pi R_0 + 2R_0} \left( -R_0 \sqrt{R_0^2 + x^2} + \frac{x^2}{2} \right)_{-R_0}^{+R_0} = 0,$$

$$y_c = \frac{\int_{-R_0}^{+R_0} (\sqrt{R_0^2 - x^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{R_0^2 - x^2}} + 0) dx}{\pi R_0 + 2R_0} =$$

$$= \frac{R_0 \int_{-R_0}^{+R_0} dx}{\pi R_0 + 2R_0} = \frac{2R_0}{\pi + 2}.$$

Если же определять координаты центра тяжести кривой в нашем примере по формулам

$$x_c^* = (\Sigma x)/n; \quad y_c^* = (\Sigma y)/n,$$

то при достаточно большом числе точек  $n$  справедливо выражение

$$x_c^* = \frac{\Sigma x \frac{2R_0}{n}}{2R_0} \rightarrow \frac{\int_{-R_0}^{+R_0} x dx}{2R_0} = 0,$$

$$y_c^* = \frac{\Sigma y \frac{2R_0}{n}}{2R_0} \rightarrow \frac{\int_{-R_0}^{+R_0} y dx}{2R_0} = \frac{\int_{-R_0}^{+R_0} \sqrt{R_0^2 - x^2} dx}{2R_0} =$$

$$= \frac{1}{2R_0} \left[ \frac{1}{2} (x\sqrt{R_0^2 - x^2} + R_0^2 \arcsin \frac{x}{R_0}) \right]_{-R_0}^{+R_0} = \frac{\pi R_0}{4}.$$

Из приведенного примера видно, что координата  $x_c = x_c^*$  вследствие вида кривой, а координата  $y_c$  существенно отличается от  $y_c^*$ . Найдем их разность

$$\Delta y_c = y_c - y_c^* = \frac{2R_0}{\pi + 2} - \frac{\pi R_0}{4} = 0,4 R_0.$$

Очевидно, что эта разность значительна и для определения центра тяжести контура, описываемого центром тяжести опорного узла работающего агрегата, следует пользоваться формулами (25). В частном случае, когда заранее известно, что центр тяжести описывает круг, параметры этого круга ( $x_c, y_c, R_0$ ) можно определить при геодезическом контроле агрегата в трех его положениях. Координаты центра круга и будут координата-

ми центра тяжести контура, описываемого центром тяжести опорного узла. Если есть основания считать, что центр тяжести опорного узла описывает эллипс, то контроль следует выполнять при пяти положениях агрегата, а координаты центра эллипса будут координатами искомого центра тяжести контура.

В общем, если нам известно аналитическое задание кривой, описываемой центром тяжести опорного сечения при работе агрегата, а вид кривой  $f(x, y, a_1, \dots, a_n) = 0$  зависит от параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , то положение кривой однозначно определяется  $n$  точками. Поэтому необходимо установить координаты центра тяжести опорного сечения при  $n$  положениях агрегата (точки  $M_1(x_1, y_1), M_2(x_2, y_2), \dots, M(x_n, y_n)$ ), а параметры кривой определить из системы уравнений

$$f(x_1, y_1, a_1, a_2, \dots, a_n) = 0,$$

$$f(x_2, y_2, a_1, a_2, \dots, a_n) = 0,$$

.....

$$f(x_n, y_n, a_1, a_2, \dots, a_n) = 0.$$

Если кривая имеет сложный вид и уравнение ее трудно или практически невозможно установить, то для определения координат центра тяжести кривой нужно пользоваться интегральной суммой подсчета  $x_c$  и  $y_c$ , которая получается из формулы (25) при параметрическом задании кривой. Запишем  $x_c$  и  $y_c$  в виде

$$x_c = \frac{\int_a^b x(t) \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt}{\int_a^b \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt},$$

$$y_c = \frac{\int_a^b y(t) \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt}{\int_a^b \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt}.$$

Заменив дифференциалы на приращения соответствующих величин, запишем

$$x'(t) = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{\Delta t}; \quad y'(t) = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{\Delta t}; \quad dt = \Delta t,$$

и тогда

$$x_c^0 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{n-1},$$

$$y_c^0 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} y_i \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{n-1}.$$

По этим формулам можно найти координаты центра тяжести сложного контура, описываемого центром тяжести поперечного сечения опорного узла. Минимальное число членов интегральной суммы следует определять для каждого агрегата из специальных исследований. Исследования заключаются в том, что  $x_c$  и  $y_c$  определяют вначале при максимально возможном числе положений агрегата. Затем, постепенно уменьшая число положений агрегата, находят такое их число, при котором координаты центра контура отличаются от координат при максимальном числе положений агрегата не более чем на неперед заданную величину, например  $0,1 \delta x_{\min}$  ( $\delta x_{\min}$  допускаемое отклонение оси агрегата от прямолинейности).

Отметим, что  $x_c^0$  и  $y_c^0$  также отличаются от  $x_c^*$  и  $y_c^*$ . Покажем это на примере результатов определения смещения центра бандажа на одной из опор вращающейся печи  $4,5 \times 170$  м. Из наблюдений были получены координаты (в миллиметрах) центра бандажа при восьми положениях агрегата  $M_1(0; 0)$ ,  $M_2(1,3; 0,3)$ ,  $M_3(15,9; 1,4)$ ,  $M_4(16,2; 0,8)$ ,  $M_5(15,8; 0,3)$ ,  $M_6(5,0; 0,9)$ ,  $M_7(4,0; 2,0)$ ,  $M_8(4,3; 1,0)$ . Подсчитанные по этим данным координаты центра тяжести замкнутого контура оказались  $x_c^0 = 8,5$  мм;  $y_c^0 = 0,3$  мм, а  $x_c^* = 9,3$  мм,  $y_c^* = 0,5$  мм. Как видно, эти координаты отличаются друг от друга, особенно абсциссы, на величину, превышающую указанный выше допуск  $0,1 \delta x_{\min} = 0,1 \cdot 3 = 0,3$  мм. Поэтому определение координат центра тяжести замкнутого контура, описываемого центром тяжести опорного узла, должно выполняться по формулам (25) или по формулам интегральных сумм для  $x_c^0$  и  $y_c^0$  ( $x_c^0 = x_c^*$ ,  $y_c^0 = y_c^*$ ) при равном отстоянии точек на контуре. Положение центра тяжести контура еще не дает характеристики пространственного положения опорного узла. Так, центр тяжести контура может находиться на прямой, являющейся осью вращения, но центр тяжести опорного узла может отклоняться от оси вращения на значительную величину, тем боль-

шую, чем больше деформация агрегата в этом месте. Поэтому вначале надо определять искривленность оси агрегата при всех наблюдаемых положениях и уже затем находить ось вращения по координатам центров тяжести замкнутых контуров, описанных центрами тяжести опорных узлов.

Для случая, когда жесткость фундаментов значительно ниже балочной жесткости корпуса агрегата, число положений при контроле должно быть не менее четырех. Это дает возможность выявить места наибольших деформаций корпуса. Например, на рис. 27, б хорошо видно, что наибольшие пластические деформации корпуса имеют место в районах фундаментов 2, 4, 5 (противоположные знаки искривлений в положениях агрегата I—III и II—IV). В то же время в районах фундаментов 5 и 6, где температура максимальна (наружная температура корпуса до 300 °С), налицо упругие деформации корпуса (искривления оси вращения повторяют искривления оси ложа агрегата).

Кроме сказанного, следует учесть, что в опорном узле могут быть смещения одной детали относительно другой за счет сил трения. Во вращающейся печи центр поперечного сечения корпуса может иметь смещение относительно центра поперечного сечения бандажа (рис. 29).

Смещение центра поперечного сечения корпуса относительно центра поперечного сечения бандажа найдем из следующих условий: внутренняя поверхность бандажа и наружная поверхность подбандажной обечайки являются кругами, названные поверхности касаются друг друга в одной точке А.

Ввиду малости угла  $\omega$ , определяемого коэффициентом трения  $f$ , можно записать

$$x_{O''} = \Delta R \sin \omega; \quad \Delta y_{O''} = \Delta R \cos \omega = \Delta R \left(1 - \frac{\omega^2}{2\rho^2}\right),$$

где  $\Delta R = R_{\text{б}} - R_{\text{к}}$ , в свою очередь  $R_{\text{б}}$  и  $R_{\text{к}}$  — внутренний радиус бандажа и наружный радиус подбандажной обечайки. Для вращающейся печи  $f = \sin \omega = 0,1$ , тогда при  $\Delta R = 10$  мм  $x_{O'} = 1$  мм,  $y_{O'} \approx \Delta R = 10$  мм. Поэтому величины  $x_{O'}$  и  $y_{O'}$  следует учитывать в результатах контроля. Величину  $x_{O'}$  можно не принимать во внимание лишь тогда, когда либо  $\Delta R \leq 3$  мм, либо когда  $\Delta R$  на всех опорах одинакова и будет исключена при вычислениях искривлений оси печи [см. формулу (5)]. Значение  $y_{O'}$  всегда учитывают при контроле вращающихся печей по высоте и находят обычно как половину диаметрального зазора (см. рис. 13), который измеряется либо на остановленной печи, либо при ее вращении. В последнем случае карандашом делают метку на подбандажной обечайке и против нее метку на бандаже. После оборота печи линейкой измеряют смещения меток и делят это смещение на  $\pi = 3,14$ . Диаметральные зазоры целесообразно также измерять на ходу при помощи специального устройства [24].

В целом контроль агрегата при его эксплуатации представляет собой сложный комплекс измерений, повторяющийся в различных модификациях на различных стадиях работы оборудования. Особенно ярко это видно на примере геодезических измерений при подготовке вращающихся печей к ремонту, во время ремонта и после него. Перечислим основные этапы таких работ.

1. Измерение поперечных деформаций системы агрегат – фундаменты с целью установления фактических величин деформаций опорных узлов агрегата и фундаментов, сравнение их с проектными данными.

2. Геодезический контроль оси вращения работающего агрегата, составление графиков искривлений оси вращения при различных положениях агрегата и среднего графика оси вращения (в случаях, когда жесткость фундаментов выше или соизмерима с балочной жесткостью фундаментов). Эти графики (см. рис. 27, б) дают четкое представление о пластических деформациях корпуса (корпус в районе опор 2, 4, 5) и наибольших искривлениях оси ложа (в районе опор 5 и б). Полученные данные позволяют перейти к последующим работам по рихтовке корпуса и выпрямлению оси ложа печи [2, 21] после остановки печи и ее охлаждения.

3. Установка роликоопор по данным контроля оси вращения.

4. Контроль оси корпуса изнутри [21, 24] аналогично контролю при монтаже.

5. Окончательное определение мест максимальных искривлений оси корпуса, разметка клиньев для вырезки участков корпуса.

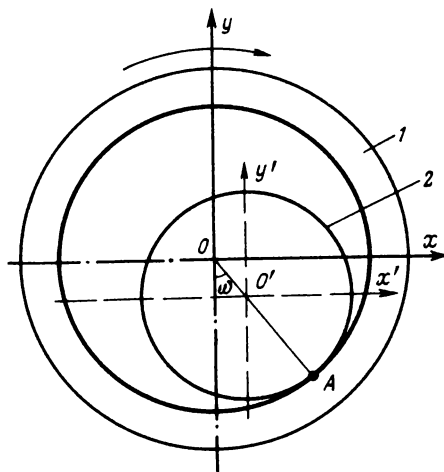


Рис. 29. Схема смещения центра поперечного сечения корпуса вращающейся печи относительно бандажа:

1 – бандаж; 2 – корпус

6. Разрезка корпуса в намеченных местах (при обязательном условии касания бандажей опорных роликов, если до разрезки имели место отрывы бандаж от роликов).

7. Контроль оси вращения после разрезки корпуса, т.е. при ослаблении внутренних усилий в системе агрегат — фундаменты.

8. Установка опорных роликов, т.е. оси ложа печи по данным контр-роля в п. 7.

9. Контроль корпуса изнутри.

10. Расчет новых клиньев, вырезание клиньев, стяжка корпуса в местах разреза.

11. Контроль корпуса изнутри.

12. Сварка корпуса.

13. Контроль прямолинейности корпуса изнутри.

14. Контроль оси вращения после пуска агрегата.

Как видно, геодезические измерения — это составная часть технологии ремонта агрегата, они во многом обуславливают качество ремонта и производительность.

## § 15. Измерение диаметров крупногабаритных вращающихся агрегатов

Диаметры вращающихся агрегатов измеряют с целью определения величин их фактических деформаций и износа, кроме того, результаты измерений используют при контроле прямолинейности и соосности опорных элементов.

Измерению диаметров деталей в машиностроении всегда уделялось большое внимание. По мере увеличения размеров деталей машиностроительные способы заменяются геодезическими, а при измерениях на работающих агрегатах, особенно при наличии больших пластических и упругих деформаций, геодезические способы во многих случаях становятся единственно пригодными для измерений. Ранее уже были описаны способы изучения изменения диаметров опорных сечений. Рассмотрим теперь геодезические способы измерения самих диаметров при работе агрегатов на примере вращающихся печей.

С учетом конкретных условий в концах агрегата (под агрегатом или над ним) строят два базиса  $a_1$  и  $a_n$  приблизительно перпендикулярно к его продольной оси (рис. 30). В длины базисов, измеренных рулеткой, вводят поправку за негоризонтальность и температуру. Линии  $AB$  и  $CD$  представляют собой створы, задаваемые теодолитом и визирной маркой на таких расстояниях от агрегата, которые обеспечивают минимальное воздействие боковой рефракции и конвекции воздушных потоков (см. § 4). На фундаменте, где определяют диаметр опорного элемента агрегата, от этих створов до опорного элемента измеряют отрезки  $b^II$  и  $b^I$  одним из известных способов (способом малых углов, подвижного



Оценку точности выполняют по формуле

$$m_{D_i}^2 = (1 - 2k_i + 2k_i^2)m_a^2 + 2m_b,$$

где  $m_{D_i}$ ,  $m_a$  и  $m_b$  — средние квадратические ошибки определения  $D_i$  и измерений  $a_1, a_n, b^I$  и  $b^II$ . При  $k_i = 0,5$ ;  $m_a = 1$  мм;  $m_b = 0,3$  мм [31] имеем  $m_{D_i} = 0,5$  мм, что вполне достаточно для определения диаметров бандажей вращающихся печей. Описанный способ применим и для других агрегатов, имеющих форму тел вращения.

### § 16. Контроль с двух сторон вращающихся агрегатов

Измерения диаметров трудоемки и, кроме того, являются источником дополнительных ошибок в определении искривленности оси вращения агрегата. Если не ставится задача определения фактических размеров диаметров и их деформаций, то можно использовать методику, которая позволяет найти искривление оси вращения агрегата без измерения диаметров поперечных опорных сечений. Методика поясняется на примере геодезического контроля прямолинейности вращающихся печей.

Для контроля агрегата строят в плане два вспомогательных створа  $AB$  и  $CD$ , расположенные справа и слева от него. От этих створов измеряют расстояния до отвесных касательных к  $1, 2, \dots, i, \dots, n$  бандажам с радиусами соответственно  $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$  (рис. 31).

Вследствие боковой рефракции визирный луч отклоняется в сторону агрегата и поэтому измеряются не действительные расстояния от правого  $AB$  и левого  $CD$  створов, а соответственно отрезки  $x_1^{II}, x_2^{II}, \dots, x_i^{II}, \dots, x_n^{II}$  и  $x_1^I, x_2^I, \dots, x_i^I, \dots, x_n^I$  от искривленных визирных лучей правого и левого створов до отвесных касательных к бандажам. Влияние рефракции для правого и левого створов выразится отрезками соответственно  $p_1^{II}, p_2^{II}, \dots, p_i^{II}, \dots, p_n^{II}$  и  $p_1^I, p_2^I, \dots, p_i^I, \dots, p_n^I$ .

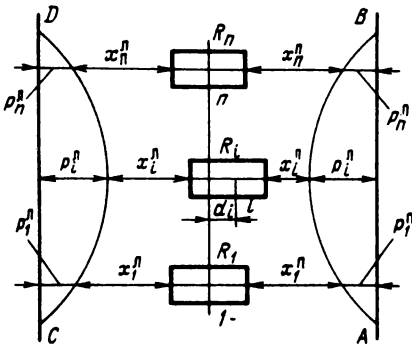


Рис. 31. Схема контроля агрегата в плане с двух сторон

Если контроль проводят одновременно две бригады с обеих сторон агрегата, то температуру бандажей определять не нужно. В случае, если контроль делается последовательно, сначала с одной, а затем с другой стороны, следует определять температуру бандажей, так как эта температура за время между измерениями с разных сторон может измениться. С учетом того, что контроль проводится неодновременно с обеих сторон агрегата, можно записать (см. рис. 31), что расстояния  $x_i^П$  от правого створа  $AB$  и  $x_i^Л$  от левого створа  $CD$  до центров бандажей будут

$$x_i^П = p_i^П + x_i^П + R_i [1 + \alpha(t_i^П - t_0)],$$

$$x_i^Л = p_i^Л + x_i^Л + R_i [1 + \alpha(t_i^Л - t_0)],$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения стали;  $t_i^П, t_i^Л$  — температуры  $i$ -го бандажа при контроле справа и слева;  $t_0$  — температура, при которой ранее определяли диаметр бандажа.

В соответствии с формулой (5) можно записать для подсчета искривления оси вращения  $d_i^П$  на  $i$ -й опоре при контроле с правой стороны агрегата

$$d_i^П = p_1^П + x_1^П + R_1 [1 + \alpha(t_i^П - t_0)] - p_i^П - x_i^П - R_i [1 + \alpha(t_i^П - t_0)] + k_i \left\{ p_n^П + x_n^П + R_n [1 + \alpha(t_n^П - t_0)] - p_1^П - x_1^П - R_1 [1 + \alpha(t_1^П - t_0)] \right\}.$$

По результатам контроля агрегата с левой стороны можно аналогично подсчитать искривление  $d_i^Л$

$$d_i^Л = p_i^Л + x_i^Л + R_i [1 + \alpha(t_i^Л - t_0)] - p_1^Л - x_1^Л - R_1 [1 + \alpha(t_1^Л - t_0)] + k_i \left\{ p_n^Л + x_n^Л + R_n [1 + \alpha(t_n^Л - t_0)] - p_n^П - x_n^П - R_n [1 + \alpha(t_n^П - t_0)] \right\}.$$

Из записанных формул получим среднее значение

$$d_i^Ср = \frac{1}{2} (d_i^П + d_i^Л) = \frac{1}{2} \left\{ (1 - k_i) (p_1^П - p_1^Л) + (1 - k_i) (x_1^П - x_1^Л) - (p_i^П - p_i^Л) - (x_i^П - x_i^Л) + k_i (p_n^П - p_n^Л) + k_i (x_n^П - x_n^Л) + (1 - k_i) R_1 \alpha (t_1^П - t_1^Л) - R_i \alpha (t_i^П - t_i^Л) + k_i R_n \alpha (t_n^П - t_n^Л) \right\}. \quad (28)$$

Для вычисления трех последних поправок в формуле (28) радиусы поперечных сечений бандажей достаточно знать приближенно, например, можно использовать их проектный размер  $R_{пр}$ .

Ввиду коротких расстояний от теодолита и вспомогательной марки до первой и последней опор

$$p_1^{\Pi} = p_1^{\Pi} \approx 0, \quad p_n^{\Pi} = p_n^{\Pi} \approx 0.$$

Поэтому формулу (28) можно записать

$$d_i^{\text{ср}} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - k_i) (x_1^{\Pi} - x_1^{\Pi}) - (x_i^{\Pi} - x_i^{\Pi}) + k_i (x_n^{\Pi} - x_n^{\Pi}) - (p_i^{\Pi} - p_i^{\Pi}) + R_{\text{нр}} \alpha [(1 - k_i) (t_1^{\Pi} - t_1^{\Pi}) - (t_i^{\Pi} - t_i^{\Pi}) + k_i (t_n^{\Pi} - t_n^{\Pi})] \right\}.$$

Отсюда следует, что для определения отклонения  $d_i^{\text{ср}}$  в плане оси вращения агрегата от замыкающей 1 - n при контроле с двух сторон агрегата не требуется измерять диаметры бандажей.

При одновременном контроле двумя бригадами с двух сторон агрегата и при одинаковых внешних условиях с обеих сторон

$$p_i^{\Pi} = p_i^{\Pi}; \quad t_1^{\Pi} = t_1^{\Pi}; \quad t_i^{\Pi} = t_i^{\Pi}; \quad t_n^{\Pi} = t_n^{\Pi}.$$

Тогда

$$d_i^{\text{ср}} = \frac{1}{2} [(1 - k_i) (x_1^{\Pi} - x_1^{\Pi}) - (x_i^{\Pi} - x_i^{\Pi}) + k_i (x_n^{\Pi} - x_n^{\Pi})].$$

В этом случае полностью отпадает необходимость в знании радиусов бандажей и, кроме того, практически исключается влияние боковой рефракции.

Оценку точности производят по формуле

$$m_{d_i^{\text{ср}}}^2 = \frac{1}{2} [(1 - k_i)^2 m_{x_1}^2 + m_{x_i}^2 + k_i m_{x_n}^2],$$

где  $m_{x_1}$  - средние квадратические ошибки отрезков  $x_1^{\Pi}$  и  $x_1^{\Pi}$ ;  $m_{x_i}$  - средние квадратические ошибки  $x_i^{\Pi}$  и  $x_i^{\Pi}$ ;  $m_{x_n}$  - средние квадратические ошибки  $x_n^{\Pi}$  и  $x_n^{\Pi}$ . При равенстве

$$m_{x_1} = m_{x_i} = m_{x_n} = m \quad m_{d_i^{\text{ср}}} = (1 - k_i + k_i^2) m^2.$$

Из сравнения полученной формулы с выражением (8) видно, что точность определения контроля прямолинейности агрегата с двух сторон в  $\sqrt{2}$  точнее, чем с одной стороны, кроме того, точность повышается благодаря исключению ошибок радиусов опорных сечений.

Рассмотрим контроль печи по высоте (рис. 32, показаны опорные узлы 1-й, i -й опор).

Искривление по высоте по результатам неодновременного контроля

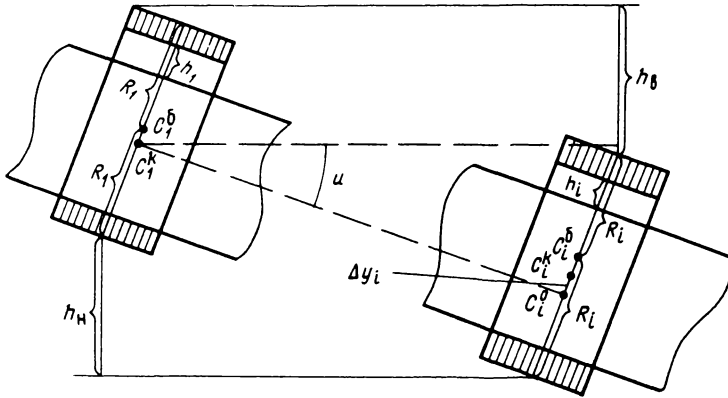


Рис. 32. Схема контроля по высоте вращающейся печи с двух сторон агрегата:  $C_1^k C_1^o$  – проектная ось печи, имеющая проектный угол  $\alpha$ ;  $C_1^k$  – центр поперечного сечения подбандажной обечайки на первой опоре;  $C_i^o$  – проектное положение центра поперечного сечения подбандажной обечайки на  $i$ -й опоре;  $C_1^o$  и  $C_i^o$  – центры поперечных сечений на 1-й и  $i$ -й опорах;  $C_i^k$  – фактическое положение центра подбандажной обечайки на  $i$ -й опоре;  $h_1$  и  $h_i$  – диаметральные зазоры на 1-й и  $i$ -й опорах;  $h_i^B$  и  $h_i^H$  – измеренные сверху и снизу превышения  $i$ -го бандажа над 1-м;  $h_i^{PP}$  – проектное превышение, равное произведению уклона на расстояние между бандажами на момент контроля

сверху  $\Delta y_i^B$  и снизу  $\Delta y_i^H$  (см. рис. 32) подсчитывают по формулам

$$\Delta y_i^B = h_i^B - h_i^{PP} + R_1 [1 + \alpha(t_1^B - t_0)] - R_i [1 + \alpha(t_i^B - t_0)] + \frac{h_1 + h_2}{2},$$

$$\Delta y_i^H = h_i^H - h_i^{KP} + R_i [1 + \alpha(t_i^H - t_0)] - R_1 [1 + \alpha(t_1^H - t_0)] + \frac{h_1 + h_i}{2}.$$

Взяв среднее из этих формул и учитывая, что для введения поправки за тепловое расширение бандажа достаточно знать его проектное значение, получим:

$$\Delta y_i^{CP} = \frac{1}{2} (\Delta y_i^B + \Delta y_i^H) = \frac{h_i^B + h_i^H}{2} - h_i^{PP} + \frac{R}{2} \alpha [(t_1^B - t_1^H) + (t_i^H - t_i^B)] + \frac{h_1 - h_i}{2}.$$

Как и при контроле в плане, наблюдения с двух сторон агрегата по высоте исключают измерения диаметров бандажей.

При одновременном контроле агрегата сверху и снизу  $t_1^B = t_1^H$ ,  $t_i^B = t_i^H$  имеем

$$\Delta y_i^{cp} = \frac{h_i^B + h_i^H}{2} - h_i^{пр} + \frac{h_1 - h_i}{2}.$$

Если  $h_i^{пр}$  принять за безошибочную величину, то оценка точности может быть выполнена по формуле

$$m_{\Delta y_i^{cp}}^2 = 0,5(m_h^2 + m_{h_i}^2),$$

где  $m_h$  — средняя квадратическая ошибка  $h_i^B$  и  $h_i^H$ ;  $m_{h_i}$  — средняя квадратическая ошибка диаметрального зазора.

Контроль по высоте с двух сторон уменьшает влияние ошибки превышения в  $\sqrt{2}$  по сравнению с тем же влиянием при контроле с одной стороны.

Следовательно, контроль вращающегося агрегата с двух сторон позволяет определять искривления оси вращения без измерения диаметров опорных элементов, что сокращает объем работы, сводит к минимуму влияние боковой рефракции и повышает точность контроля.

## § 17. Восстановление утраченных осей жестких элементов агрегатов

При эксплуатации промышленных предприятий вынесенные и закрепленные при монтаже оси очень часто в силу объективных и субъективных причин утрачиваются. Поэтому, как правило, за базовую линию при геодезическом контроле принимают ось какой-либо части агрегата, например ось рамы, ось вала привода и т.п., а положение всех остальных частей агрегата проверяют относительно этой линии. Дальнейший процесс контроля при эксплуатации большей части оборудования призван контролировать соблюдение соответствующих допусков и производится теми же способами и с такой же точностью измерений, что и при монтаже. Однако при контроле агрегатов, находящихся в стесненных условиях, есть ряд особенностей, которые будут рассмотрены ниже на примере наклонного пластинчатого конвейера.

Пластинчатые конвейеры служат для перемещения кусковых материалов (камня, щебня, клинкера и т.п.) горизонтально или под углом до  $45^\circ$  (рис. 33).

Металлические пластины образуют настил, выполняющий несущие функции. Настил передвигается при помощи приводного устройства 4. Натяжение настила регулируется натяжным устройством 5. Весь агрегат

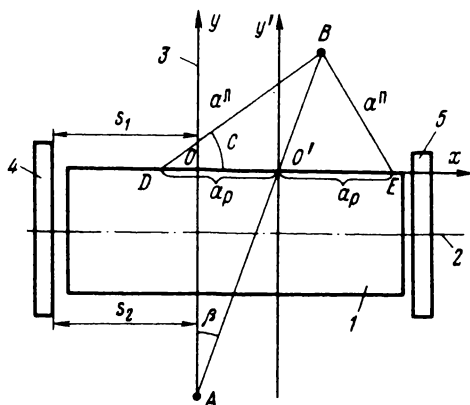


Рис. 33. Схема восстановления поперечной оси конвейера:

1 – рама; 2 – продольная ось; 3 – восстановленная поперечная ось; 4 – приводное устройство; 5 – натяжное устройство

монтируется на опорной станине-раме 1, на которой располагаются направляющие рельсы. По этим рельсам перемещается настил, имеющий ходовые колеса. Приводное устройство работает через редуктор от электродвигателя.

Настил (рабочее полотно) выполняется из плоских волнистых или коробчатых металлических пластин.

Тяговая часть выполняется либо из цепей, либо сам настил представляет собой тяговый орган.

Ширина полотна находится в пределах 800–2400 мм, а высота борта настила – 100–320 мм. Производительность конвейеров равна 47–600 м<sup>3</sup>/ч. Рекомендуется разгружать на них самосвалы грузоподъемностью 5–40 т.

Пластинчатые конвейеры бывают горизонтальные, наклонные или с чередующимися горизонтальными и наклонными участками. Приемные отверстия имеют размеры 250x900 – 150x2100 мм. Скорость движения 0,026–0,156 м/с. Как правило, эксплуатация этих агрегатов происходит в стесненных условиях, затрудняющих доступ к опорным элементам. В то же время отсутствие систематического контроля за их пространственным положением может привести к тому, что возможные недопустимые деформации не будут обнаружены и возникнет аварийная ситуация. Так, у наклонного пластинчатого конвейера 1с = 24 = 120 щековой дробилки цементного завода вследствие неравномерной осадки фундамента произошел сдвиг ходовой части в направлении крена фундамента. В результате боковая стенка рамы более чем на половину была стерта пластинами, и возникла угроза аварии. Контроль положения конвейера способами,

применяемыми при монтаже, оказался невозможным из-за того, что отсутствовали знаки закрепления осей и видимость вдоль продольной оси агрегата.

Поэтому возникла задача восстановления поперечной оси агрегата, решение которой позволило выполнить контроль конвейера в плане.

Методика контроля заключалась в том, что на высоте 30 см над рамой конвейера  $l$  натягивается проволока  $AB$  (см. рис. 33), приблизительно перпендикулярно к продольной оси  $2$  рамы. С одной стороны, в точке  $A$  проволока закрепляется неподвижно, с другой – в точке  $B$  она пропускается через блок и натягивается при помощи груза 10 кг. С проволоки опускаются два отвеса. Первый отвес располагают в непосредственной близости около рамы, второй – около блока  $B$ . Против отвеса карандашом или напильником делают метку  $O'$ . По обе стороны от метки  $O'$  вдоль ребра рамы откладывают два равных отрезка  $a_p$  и наносят метки  $D$  и  $E$ . Затем измеряют рулеткой от меток  $D$  и  $E$  расстояния  $a^I$  и  $a^II$  до второго отвеса. Отрезки  $a_p$ ,  $a^I$  и  $a^II$  следует выбирать такими, чтобы угол  $DBE$  был бы около  $90^\circ$ .

Необходимо следить также за тем, чтобы отрезки  $a^I$  и  $a^II$  лежали в плоскости, образованной верхней поверхностью рамы. Перемещая блок вдоль рамы, откладывая каждый раз заново отрезки  $a_p$ , необходимо добиться путем последовательных приближений, чтобы отрезки  $a^I$  и  $a^II$  были равны. Чтобы ускорить процесс приближений, можно рассчитать величину сдвигки блока в точке  $B$  (или струны в точке  $A$ ).

Обозначим  $a^II = a^I + \Delta a^I$ ,  $2a = 1,4a^I + \Delta a_p$ . Тогда для отрезка  $BO'$ , являющегося медианой треугольника  $BED$ , можно записать известное выражение

$$BO' = \sqrt{\frac{2[(a^I)^2 + (a^II)^2 - 4[a_p]^2]}{2}} = \sqrt{(a^II)^2 - (a_p)^2 - 2a_p a^I \cos \beta_D}.$$

После некоторых преобразований с учетом записанных выше обозначений получим

$$\cos \beta_D = 0,7 + \frac{0,5 \Delta a_p - 0,71 a^I}{a^I}.$$

Согласно рис. 33, абсцисса точки  $B$  в системе координат  $xOy'$  будет

$$x'_B = a^I \cos \beta - a_p$$

или после ряда преобразований

$$x'_B = -0,71 \Delta a^I.$$

В свою очередь,

$$y_B' \approx a^{\text{II}} \sin \beta_D,$$

а после соответствующих подстановок получим

$$y_B' \approx 0,71 a^{\text{II}}.$$

Тогда угол разворота проволоки  $AB$  относительно оси  $Oy$  будет найден из выражения

$$\operatorname{tg} \beta = x_B' / y_B' = 1 - (a^{\text{II}} / a^{\text{I}}).$$

Искомое смещение точки  $B$  будет  $s = AB \operatorname{tg} \beta$ . Смещая точку  $B$  и повторяя измерения (отложение отрезков  $a_p$ , измерение  $a^{\text{I}}$  и  $a^{\text{II}}$ ), убеждаемся в равенстве отрезков  $a^{\text{I}}$  и  $a^{\text{II}}$ , а в случае его невыполнения, вновь рассчитываем  $s$  и выполняем новое приближение. После достижения равенства  $a^{\text{I}}$  и  $a^{\text{II}}$  измеряем отрезки  $s_1$  и  $s_2$  от проволоки, являющейся восстановленной поперечной осью агрегата, до промежуточного вала приводного устройства. Затем вычисляем неперпендикулярность этого вала к продольной оси агрегата по формуле

$$u = s_1 - s_2 / L,$$

где  $L$  — длина вала.

Аналогично определяют и неперпендикулярность вала натяжного устройства к продольной оси агрегата. Выражая  $s_1$  и  $s_2$  в миллиметрах, а  $L$  — в метрах, получим  $u$  в миллиметрах на метр.  $m_u$  — средняя квадратическая ошибка величины  $u$  — получена при следующих условиях: угол  $D\hat{B}E$  близок к  $90^\circ$ ; измерение отрезков  $a^{\text{I}}$ ,  $a^{\text{II}}$ ,  $s_1$  и  $s_2$  выполняется с приблизительно одинаковой средней квадратической ошибкой  $m$ ; средние квадратические ошибки отрезков  $a_p$  в  $\sqrt{2}$  меньше ошибок вышеуказанных отрезков и являются ошибками исходных данных при оценке точности линейной засечки; корреляция между "исходными" пунктами  $D$  и  $E$  в линейной засечке отсутствует [22]; общая ошибка положения точки  $B$  разделена на  $\sqrt{2}$ , поскольку нас интересует лишь составляющая ошибки вдоль оси  $x$ ; определение перекаса  $u$  выполняется  $n$  независимыми приемами. Используя формулы (V.92) и (V.95) работы [22], получим среднюю квадратическую ошибку в положении точки  $B$  в виде  $m_b = \sqrt{1,5} \cdot m$ . Дифференцируя формулу подсчета  $u$ , переходя к средним квадратическим ошибкам и полагая, что  $m_\beta$  полностью войдет в ошибку измерения отрезка  $s_1$ , получим

$$m_u = \sqrt{3,5/n} \cdot m / L.$$

Выполнение контроля конвейера по описанной методике показало, что перекося промежуточного вала привода к продольной оси рамы составил  $u = 18$  мм/м при допуске 0,5 мм/м. Вал натяжного устройства перпендикулярен к продольной оси рамы. Кроме того, нивелированием была проверена горизонтальность валов приводного и натяжного устройств. Негоризонтальность промежуточного вала приводного устройства составила 4,9 мм/м, а вала натяжного устройства – 0,75 мм/м. Из результатов следует, что вал натяжного устройства имеет незначительное отклонение от допустимой негоризонтальности, а промежуточный вал приводного устройства имеет неперпендикулярность к продольной оси рамы, превышающую допуск в 36 раз, а негоризонтальность – в 10 раз. Средняя квадратическая ошибка определения перекося при  $m = 1$  мм,  $n = 3$  составила  $m_a = 0,5$  мм/м, т.е. оказалась равной допуску на неперпендикулярность оси приводного и натяжного устройств к продольной оси рамы. Однако большая точность при эксплуатации и не требуется, а монтажные допуски следует признать для случая эксплуатации завышенными, о чем уже говорилось ранее. Ремонтные работы, выполненные по результатам геодезического контроля, позволили устранить нарушения в пространственном положении осей агрегата и его дальнейшая эксплуатация, сопровождаемая последующими геодезическими наблюдениями, происходит нормально.

## **§ 18. Способы геодезического контроля в плане работающих агрегатов**

Геодезический контроль в плане на ходу действующего оборудования выполняют при помощи створных измерений. В свою очередь, створные измерения состоят из работ, связанных с непосредственным заданием створа или определения положения плоскости относимости из косвенных построений, и работ по измерению нестворностей, т.е. отстояний отдельных контролируемых точек до створа. Нестворность можно измерить непосредственно или сначала измерить нестворность вспомогательного прибора или устройства относительно створа и расстояния от этого прибора до контролируемой точки (см. § 13 и рис. 21).

Следует отметить, что непосредственное измерение нестворности выполняют лишь при расположении створа на минимальном удалении от объекта наблюдений, а на работающем оборудовании это возможно лишь при использовании программы построения параллельно основной плоскости относимости коротких плоскостей относимости для двух или нескольких соседних точек.

В гл. 2 были приведены пояснения к программам построения створов применительно к геодезическому контролю работающего технологического оборудования. Рассмотрим методику задания створов.

Струнный и струнно-оптический способы, широко используемые при монтаже оборудования, невозможно или затруднительно применить при эксплуатации вследствие вибрации и сотрясений фундаментов, пола и стен цехов. Особенно сильное воздействие на положение струны оказывает конвекция воздушных потоков. Эффективным средством борьбы с конвекцией является расположение струны в изолирующей трубе, однако это связано со значительными затратами, с загромождением и без того насыщенного различными трубопроводами и другими коммуникациями рабочих помещений, и такой способ применяется крайне редко.

К наиболее простым и эффективным средствам следует отнести построение оптического створа вдоль всего контролируемого объекта. Поэтому во всех случаях, когда такое построение возможно и оправдано, необходимо широко прибегать к этому способу построения плоскости относимости. Теория и практика общего створа хорошо известны из геодезической литературы [22], [37]. При контроле работающего оборудования следует лишь учитывать фактические ошибки визирования. Дополнительное развитие способа – построение общего створа под некоторым углом к оси изучаемого объекта приведено в гл. 2. Однако рекомендации гл. 2 относятся к программе общего створа и не затрагивают общеизвестной методики использования приборов. Напомним лишь, что оптический створ задается теодолитом (или специальным створным прибором), устанавливаемом на одном конце створа, и визирной маркой, находящейся на другом его конце. С учетом современного уровня приборного обеспечения промышленных предприятий оптический способ построения створа наиболее распространенный и эффективный. Он в полной мере пригоден для контроля работающего оборудования по программам построения створов, параллельных общей плоскости относимости (см. гл. 2).

В практику геодезических работ все шире внедряются лазерные геодезические приборы. О возможности их использования указано в табл. 1, подробные классификация и сведения о методике работы с приборами приводятся в работах [6] и [45]. Использование лазерных приборов при монтаже и эксплуатации оборудования ограничено пока отсутствием серийных приборов соответствующей точности. Отечественные насадки типа ПЛ-1 пока еще мало пригодны для этих целей, хотя и обеспечивают точность построения створа с использованием простейших средств фиксации положения лазерного луча с точностью, соизмеримой с точностью оптического визирования технических теодолитов и нивелиров. Автором были проведены исследования ошибки фиксации лазерного луча в лабо-

раторных условиях на расстоянии 20 м, в городских условиях на максимальном расстоянии 160 м (в десяти равномерно отстоящих одна от другой точках), на фундаментах вращающейся печи 4,5x170 (в пяти точках при максимальном удалении 83,4 м) и в полевых условиях на геодезическом полигоне (в шести точках при максимальном удалении 100 м). Приставку ПЛ-1 укрепляли на нивелире Н-3, фиксирование лазерного луча осуществлялось наведением на центр пятна луча подвижной визирной марки с матовым стеклом с нанесенными на нем вертикальными нитями, образующими систему биссекторов. В каждой точке делали по 30 наведений, отсчеты брали с точностью 0,1 мм, ряды наблюдений исследовали на нормальность распределения. Установлено, что все наблюдавшиеся ряды подчиняются нормальному распределению, средние квадратические ошибки фиксирования центра лазерного пятна  $m$  зависят от диаметра пятна и в большей степени от расстояния. В лабораторных условиях получена средняя квадратическая ошибка 0,2 мм, а уравнения регрессии в зависимости от расстояния  $s$  для городских и полевых условий позволяют вычислить точность однократной фиксации центра лазерного пятна соответственно по формулам  $m = 0,14 + 0,005s$  (при значимом коэффициенте корреляции  $r_{m,s} = +0,53$ ) и  $m = 0,40 + 0,01(s - 66,3)$  (при значимом коэффициенте корреляции  $r_{m,s} = +0,74$ ).

Корреляционная зависимость точности фиксации центра лазерного пятна от расстояния в производственных условиях отсутствует, средние квадратические ошибки по сравнению с ошибками для одних и тех же расстояний в среднем в три раза больше. Проведенные исследования в основном подтверждают данные исследований других авторов о возможностях использования приставки ПЛ-1, однако приставка имеет недостаток — ненадежность и плохое качество юстировочных устройств по совмещению лазерного луча с визирной осью трубы. Кроме того, неудобство в работе вызывает трудность обнаружения лазерного пятна при увеличении расстояния. С целью устранения этих недостатков на самой приставке при помощи специального держателя и юстировочных винтов (в районе окуляра и объектива) укрепляли трубу теодолита ТТ-50. Лазерный луч, попав в окуляр трубы, выходил из нее приблизительно параллельно визирной оси нивелира. Это условие обеспечивается измерением расстояния между центром окуляра и центром поперечного сечения лазерной трубки. На расстоянии 40 м на листе бумаги по вертикали намечают полученное расстояние, пересечение нитей сетки нивелира наводят на нижнюю метку, а пятно луча перемещением юстировочных винтов трубы теодолита — на верхнюю метку. Такое простое приспособление и методика позволяют при рассматривании через трубу нивелира наблюдаемой марки быстро и удобно устанавливать ее так, чтобы лазерное пятно проектировалось на матовое стекло. Естественно, что подобную возможность целесообразно предусмотреть в комплекте приставки.

В специальной литературе отмечается также целесообразность использования электронных тахеометров для створных наблюдений. По результатам исследований тахеометра ЕОТ 2000 [46] установлены средние квадратические ошибки определения нестворностей для полевых условий на расстояниях от 24 до 960 м. Суть измерений заключалась в следующем. На одном конце створа устанавливали тахеометр, на другом – отражательное устройство. В промежуточных точках располагали устройство, позволяющее перемещать желз (диаметром 10 или 19 мм) в горизонтальном или вертикальном направлениях. Уменьшение интенсивности отраженного от отражателя луча фиксировалось в приборе при помощи подачи специального звукового сигнального приспособления. Установлено отсутствие корреляции ошибок фиксации положения лазерного луча и расстояния, доверительные интервалы при  $p = 0,95$  для расстояния до 528 м имеют вид  $0,4 \text{ мм} < m < 0,6 \text{ мм}$ , для участка 960 м –  $1,1 \text{ мм} < m < 1,4 \text{ мм}$  для жезла-прерывателя диаметром 10 мм и  $1,7 \text{ мм} < m < 2,2 \text{ мм}$  для жезла диаметром 19 мм. Средняя квадратическая ошибка фиксации лазерного луча по высоте при тех же условиях находится в пределах  $0,5 < m < 1 \text{ мм}$ . Подчеркивается, что достигнутая точность определена по внутренней сходимости, фактические же ошибки будут больше. Тем не менее, использование электронных тахеометров для створных наблюдений перспективно.

#### *Способы непосредственного контроля*

При использовании программы общего створа оптическим способом визирный луч располагают в условиях, обеспечивающих минимальное воздействие на него возмущающих факторов. Непосредственное определение нестворностей контролируемых точек работающего агрегата относительно этого створа, как правило, затруднительно или невозможно (например, непосредственное измерение расстояния от створа до центра тяжести кривых, описанных центрами тяжести поперечных опорных сечений). Поэтому нестворность большей частью определяется как сумма двух отрезков: нестворности оси вращения вспомогательного прибора и отстояния оси вращения прибора до контролируемой точки. Последняя может измеряться бесконтактным и контактными способами.

Рассмотрим методику измерений на примере контроля прямолинейности вращающихся печей.

Определить расстояния  $x_i$  от створа до центров тяжести фигур, описываемых центрами бандажей за оборот агрегата, можно путем измерения расстояний от створа до отвесных касательных к наружному контуру бандажей (непосредственный способ) и контроля расположения опорных роликов относительно створа (косвенный способ).

Отметим, что речь пойдет о методике раздельного контроля прямолинейности оси напряженного корпуса или оси ложа агрегата в плане

и по высоте. Чтобы определить положение оси вращения агрегата, надо исследовать вид контурной кривой, описываемой центрами тяжести опорных сечений (см. § 14) и для вычислений использовать координаты центра тяжести этого контура.

Условимся также, что диаметральные зазоры во всех опорных сечениях приблизительно одинаковы, и поправку за смещение центра подбандажной обечайки в плане (см. § 14) вводить не нужно.

Для контроля печи в плане непосредственным бесконтактным способом с использованием подвижного визирного конуса (см. рис. 22) створ строится так, чтобы он находился приблизительно в отвесной плоскости, касательной к бандажам, и проходил на высоте около 1 м над фундаментами.

На каждой опоре измеряют расстояние  $x_i$  от вспомогательного створа до отвесной касательной к бандажу (см. рис. 22)

$$x_i = x_i' + x_i'',$$

где величины  $x_i'$  и  $x_i''$  находятся по формулам [25] и [26]. Наблюдения выполняют при четырех положениях печи. Искривления оси печи подсчитывают по формуле с учетом разностей диаметров бандажей

$$d_i = (x_1 - x_i + \Delta R_i + k_i (x_n - x_1 - \Delta R_n)),$$

где  $\Delta R_i = R_1 - R_i$ ;  $\Delta R_n = R_1 - R_n$ ;  $R_1, R_i$  и  $R_n$  — радиусы бандажей на 1-й,  $i$ -й и  $n$ -й опорах.

Для уменьшения погрешностей визирования и перемены фокусировки трубы контроля на опорах от 1-й до  $n/2$ -ой проводится при установке теодолита в точке I и марки в точке II (см. рис. 5), при контроле на опорах ( $n/2$ ) —  $n$  теодолит и марку меняют местами.

Величина искривления оси печи на  $i$ -й опоре получается со средней квадратической ошибкой

$$m_{d_i}^2 = m_{x_i}^2 + (2k_i^2 + 1)m_{x_1}^2 + 2(k^2 + 1)m_R^2, \quad (29)$$

где  $m_R$  — средние квадратические ошибки определения радиусов бандажей.

Подсчет средней квадратической ошибки искривления оси печи на  $i$ -й опоре выполним при следующих условиях. Наибольшая ошибка, обусловленная геометрией программы створа, не параллельного оси агрегата, будет в середине агрегата (опора 5). Величины  $x_i'$  и  $x_i''$  наблюдаются для каждого положения агрегата при двух положениях вертикального круга теодолита и прибора ПЦК. Для наблюдений используют технический теодолит типа Т30. Максимальное расстояние от теодолита до ПЦК 80 м. Средние квадратические ошибки визирования и наведения

на край бандаж находят по формулам § 4,  $m_R = 0,5$  мм. Подсчитанная при этих условиях величина  $m_{d_5} = 1,5$  мм. Такой точности вполне достаточно при контроле вращающихся печей. Выполняя контроль с двух сторон агрегата, можно повысить точность в  $\sqrt{2}$ , исключая дополнительно влияние ошибок измерения радиусов бандажей и максимально ослабляя действие боковой рефракции.

После вычислений строят графики искривлений при каждом из четырех положений печи. В случае, когда жесткость фундаментов выше балочной жесткости корпуса или соизмерима с ней, находят среднее из искривлений на каждой опоре. Найденные искривления будут характеризовать степень непрямолинейности оси печи.

Для печей с колебаниями опор до 40 мм наиболее подходящим является непосредственный контактный способ малых углов. Разумеется, этот способ полностью пригоден и для печей с небольшими поперечными смещениями.

При контроле в плане строят справа или слева от печи вспомогательный створ теодолитом типа Т2 и визирной маркой.

Теодолит и визирную марку необходимо устанавливать в устойчивых местах на наружных частях зданий шламо- и топливподготовительного отделений в холодном и горячем концах печи. Желательно сооружать специальные площадки для установки геодезических приборов, ограждая их от воздействия теплового излучения и постоянных порывов ветра из-за большого перепада температуры вдоль печей.

Если редуктор помещается по обе стороны печи и до высоты 3 м над фундаментами делает прямую видимость вдоль агрегата невозможной, вспомогательный створ следует поднять на высоту 4–5 м.

Для контроля используют специальное приспособление. Раздвижная трубчатая штанга 1 (рис. 34), длина которой может меняться в пределах 3–5 м, укрепляется на опоре растяжками 2. На верху штанги имеется ось 3 длиной 30 см, несущая два ролика диаметром 50 мм. На этой же оси находится штанга 4 длиной 3 м из легкого металла, которая устанавливается в горизонтальное положение при помощи упора 5. Упор имеет трубку, посредством которой он закрепляется на штанге в нужном положении. При сильных порывах ветра штанга закрепляется дополнительно растяжками. Штанга несет визирный конус 6, за которым помещается экран 7. Экран можно устанавливать с двух сторон конуса в зависимости от того, с какой стороны проводится наблюдение.

Малые углы между направлением на визирную марку и визирным конусом измеряют теодолитом при двух положениях вертикального круга, в каждом из четырех положений печи.

На печах с большими поперечными перемещениями (до 40 мм) делают четырехкратные измерения.

Измеряют расстояния  $s_i$  от теодолита до визирного конуса и вычисляют отклонения  $x_i'$  от вспомогательного створа

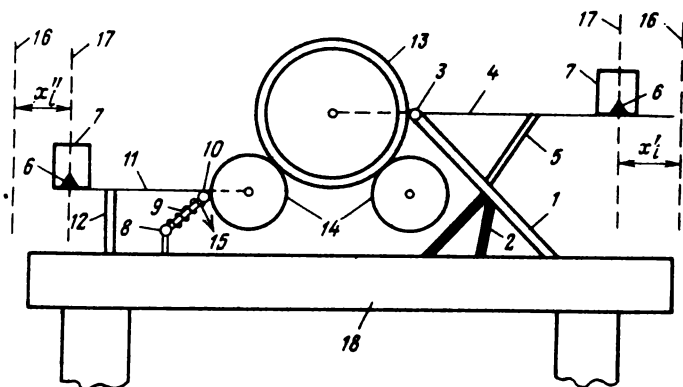


Рис. 34. Схема приспособления для контроля печи по способу малых углов:

1 – телескопическая штанга; 2 – растяжки; 3 – ось с двумя роликами; 4 – штанга; 5 – упор; 6 – визирный конус; 7 – экран; 8 – штанга постоянной длины; 9 – телескопическая штанга; 10 – ролик; 11 – горизонтальная штанга; 12 – телескопическая стойка; 13 – бандаж; 14 – роликоопоры; 15 – направление действия пружины; 16 – створ; 17 – ось визирного конуса; 18 – верхняя фундаментная плита

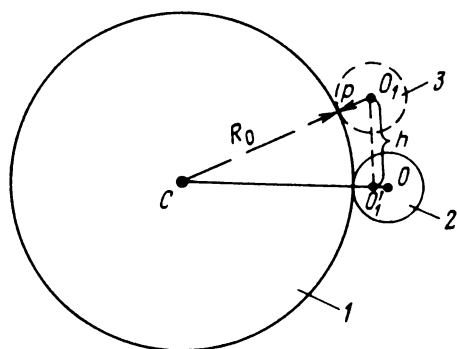


Рис. 35. Схема смещения в плане центра приставного ролика из-за ошибки установки его по высоте:

1 – бандаж вращающейся печи;  
2 – правильное положение ролика;  
3 – смещенное положение ролика

$$\chi'_i = \frac{\beta_i''}{\rho''} s, \quad \text{где } \rho'' = 206265''.$$

Измеряют температуру бандаж и воздуха на наблюдаемой опоре для введения поправки за температуру в радиус бандаж и длину штанги. Подсчитывают искривления оси агрегата, причем для печей со значительными поперечными перемещениями – для каждого из четырех положений агрегатов.

Оценку точности проводят по формуле (29) с учетом эмпирических зависимостей точности визирования от расстояния. В среднюю квадрати-

ческую ошибку отрезков  $x_1, x_i$  и  $x_n$  войдет, кроме того, ошибка за установку оси 3 роликов (см. рис. 34) в горизонтальной плоскости, проходящей через центр бандажа.

Как видно из рис. 35, эта ошибка будет

$$OO'_1 = R_0 + p - \sqrt{(R_0 + p)^2 - h^2},$$

где  $R_0$  и  $p$  — радиусы бандажа и ролика;  $h$  — смещение ролика по высоте от правильного положения.

Ввиду малости  $h$  по сравнению с  $R_0 + p$  можем записать

$$OO'_1 = h^2 / [2(R_0 + p)].$$

Устанавливая верх раздвижной штанги на глаз в точке касания отвесной плоскости к бандажу, допускаем ошибку, не превышающую 5 см (эта величина найдена из специальных исследований). Поэтому для печей  $4,5 \times 170$  м по записанной выше формуле имеем  $OO' = 0,5$  мм. С учетом этой ошибки найдем, что в наиболее слабом месте  $m_{d_5} = 1,5$  мм.

Непосредственный бесконтактный способ контроля вращающейся печи по бандажам может быть применен с использованием методики построения плоскостей относимости для каждой пары соседних бандажей. Рассмотрим этот способ для случая, когда основная плоскость относимости задана двумя точками  $A$  и  $B$  (рис. 36, см. также рис. 7 и 8).

Напомним, что поставленная цель достигается размещением основной плоскости относимости  $AB$  примерно параллельно печи на таком удалении от нее, которое обеспечивает наиболее благоприятные условия для измерений, а для каждой пары близлежащих контролируемых точек печи (точки  $1, 2; 2, 3; \dots, i-1, i; j-1, j; \dots, n-1, n$ ) строят короткие вертикальные плоскости, параллельные основной плоскости относимости. Например, для точек  $1$  и  $2$  такая короткая плоскость относимости строится в точке  $C$ . Короткие вертикальные плоскости относимости строят посредством двух теодолитов, первый из которых установлен в одной из точек основной плоскости относимости (точка  $A$  на рис. 36), а второй — в точке построения короткой плоскости относимости (например, точки  $C, D$ , и т.д.). Вторым теодолитом откладывают горизонтальный угол  $\beta_j$ , равный накрест лежащему горизонтальному углу между линиями  $AC, AD$  и т.п., соединяющими точки стояния теодолитов с направлением плоскости относимости  $AB$ , причем этот угол измеряют теодолитом в точке  $A$ .

Затем по способу малых углов измеряют расстояния от коротких плоскостей относимости до контролируемых точек. При измерении от плоскости, построенной в точке  $C$ , это будут расстояния  $x_1$  и  $x_2$ ; при измерении расстояний от плоскости, построенной в точке  $D$  —  $x'_2$  и  $x_3$  и т.д.

Очевидно, что короткие плоскости относимости можно строить при установке теодолита как в точке  $A$ , так и в точке  $B$ .

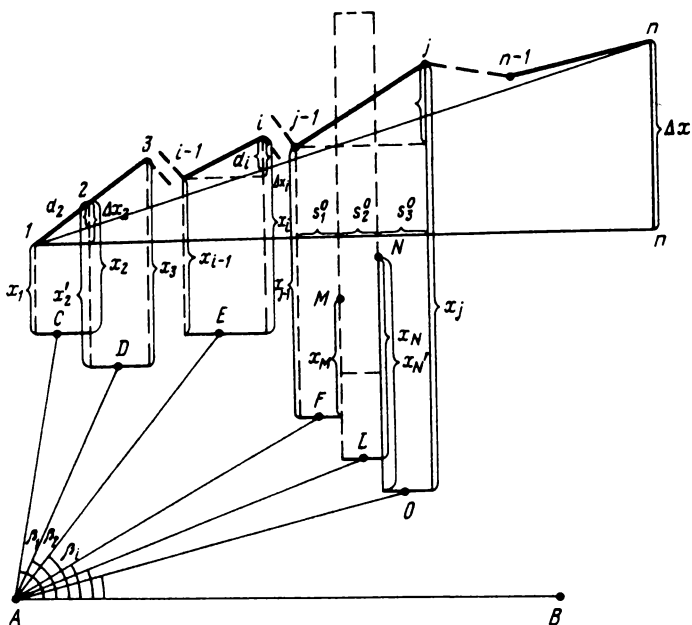


Рис. 36. Схема контроля вращающейся печи в плане построением вспомогательных плоскостей относимости, параллельных основной плоскости относимости, заданной двумя точками

Выражения для величин  $\Delta x_i$ , которые являются аналогией превышений при геометрическом нивелировании, записаны формулами (11).

Если препятствие  $P$  (как правило, это редуктор) перекрывает видимость между контролируемыми точками, например, между  $j-1$  и  $j$ , то, используя одну или несколько вспомогательных точек (на рис. 36 это точки  $M$  и  $N$ ), можно найти интересующее нас

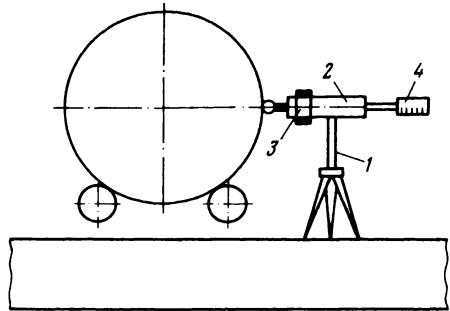
$$\Delta x_j = (x'_{j-1} - x_M) + (x'_M - x_N) + (x'_N - x_j).$$

Тогда искривление оси печи в точке  $i$  относительно линии  $(1-n)$  можно подсчитать по формуле (11), где  $k_i$  вычисляется по формуле, данной в § 8, причем (см. рис. 36)

$$s_j = s_1^0 + s_2^0 + s_3^0.$$

Представляет интерес контактный способ непрерывного слежения за смещениями центра бандажа, предложенный в работе [15]. Суть его заключается в том, что на каждом фундаменте на стойке  $l$  (рис. 37)

Рис. 37. Схема приспособления для непрерывного контроля положения бандажа вращающейся печи в плане



стационарно устанавливают штангу 2 с индуктивным датчиком 3 и шкалой 4 в виде отрезка нивелирной рейки. Шкала предназначена для расположения всех стоек на одной прямой вдоль агрегата.

Смещения бандажа передаются на ролик датчика, упирающийся в бандаж, и фиксируются цифровым прибором. Аналогичное устройство располагается под каждым бандажом для контроля положения бандажа по высоте. Авторы, однако, не приводят точностных характеристик способа. Практическая реализация, кроме того, затрудняется на крупногабаритных печах, так как высота стоек должна быть значительной, а на печах с упруго-податливыми опорами требуется дополнительный непрерывный контроль за их пространственным положением. Тем не менее описанный способ наглядно показывает возможность механизации процесса контроля за технологическим оборудованием в действующих цехах.

### Способы косвенного контроля

При этих способах положение исследуемого опорного элемента определяется не непосредственно, а путем контроля положения других опорных элементов, работающих в контакте с исследуемым. Поясним сказанное вначале на примере контроля положения бандажа вращающейся печи, опирающегося на два ролика.

Как и при всех способах контроля, цель измерений заключается в определении расстояния  $x_i$  от центра бандажа до створа (рис. 38).

Это расстояние при приблизительно одинаковых радиусах опорных роликов ( $p_{ли} - p_{ни}$ )  $\leq 10$  мм можно найти из выражения [31]

$$x_i = x_i^0 + 0,50s_i^y - 0,13(p_{ли} - p_{ни} - 0,87h_p - 0,00034[(p_{ли} - p_{ни}) - h_p]\Delta S_i,$$

где  $s_i^y$  — расстояние между осями роликов, взятое как среднее из измерений с двух торцов роликов;  $x_i^0$  — кратчайшее расстояние от правого

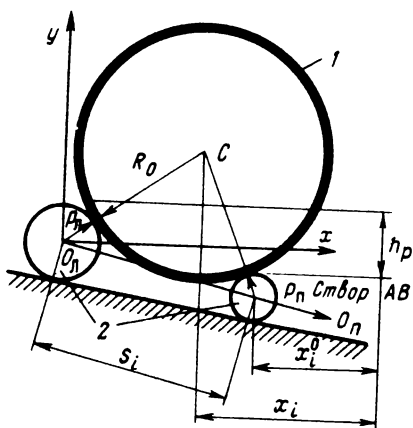


Рис. 38. Схема определения расстояния от створа до центра бандажа вращающейся печи при контроле по роликоопорам:

1 – бандаж; 2 – роликоопоры

ролика (при построении створа справа от печи) до вспомогательного створа, взятое как среднее из расстояний  $x_{iв}$  и  $x_{iн}$  – расстояний от вспомогательного створа соответственно до концов оси ролика со стороны холодного и горячего концов печи;  $p_{лi}$  и  $p_{пi}$  – радиусы левого и правого роликов;  $h_p$  – превышение левого ролика над правым, полученное из нивелирования;  $\Delta s_i$  – разность фактического и проектного расстояний между роликами.

При  $\Delta s_i \leq 30$  мм последним членом формулы можно пренебречь. Отстояние от вспомогательного створа до оси ролика определяется так. Приблизительно в створе  $AB$  устанавливают штатив с теодолитной подставкой на одном уровне с осевыми метками роликов, вынесенными на их щитки. Эту установку достаточно выполнить на глаз. В теодолитную подставку вставляют баксу от теодолита, имеющую в центре насечку или просверленное отверстие. От центра ролика до насечки на баксе измеряют расстояние  $x_i'$  прокомпарированной рулеткой с введением поправки на температуру. Натяжение проводится от руки.

Точное измерение нестворности теодолитной подставки (отклонение ее от створа  $AB$ ) выполняют при помощи подвижной марки или визирного конуса прибора ПЦК.

Расстояние  $x_i^0 = x_i' + x_i''$ . Для нивелирования роликов на каждом фундаменте с левой и правой сторон берут по две вспомогательные точки [31]. Они связываются нивелированием между собой и с одноименными точками соседних опор. Создается таким образом несколько полигонов.

Поскольку нивелир устанавливают на фундаментах, то нивелирование пары точек следует делать дважды при одинаковом неравенстве плеч, чтобы исключить влияние непараллельности визирной оси и оси уровня прибора.

Длина визирного луча при таких работах не превышает 30 м и для

повышения точности отсчитывания по рейке на ней целесообразно иметь 1-, 2- или 5-миллиметровые деления. Промышленность не выпускает такие рейки, поэтому на производстве обычно на деревянном бруске или на обычной рейке натягивается и закрепляется рулетка с миллиметровыми делениями. При длине визирного луча до 10–12 м по рейке можно выполнить отсчеты с точностью до 0,1 мм, при большей длине шкалу рулетки раскрашивают через 2 или 5 мм. Используя технический нивелир типа Н-3 или НС-4, можно получить превышения со среднеквадратическими ошибками 0,3–0,5 мм.

От вспомогательных точек передают отметки высот на ролики, причем нивелирование роликов выполняют на ходу агрегата. Для нивелирования роликов на ходу агрегата изготавливают приспособление типа люнета [31], позволяющее перемещать нивелир в вертикальном направлении и наводить среднюю нить на наивысшую точку ролика. Это приспособление состоит из суппорта, одна часть которого крепится к головке штатива.

На подвижной части суппорта имеется винт, на который навинчивается технический нивелир с самоустанавливающейся линией визирования. Перемещение прибора осуществляется вращением винта. Величину перемещения можно отсчитать по верньеру с точностью 0,1 мм.

Учитывая, что для передачи отметки с левого ролика на правый нужно сделать минимум три станции, среднюю квадратическую ошибку определения  $x_i$  можно подсчитать по формуле [31]

$$m_{x_i}^2 = 0,25 m_s^2 + 0,03 m_p^2 + m_{x_i^0}^2 + 2,27 m_{h_p}^2,$$

где  $m_s$ ,  $m_p$ ,  $m_{x_i^0}$ ,  $m_{h_p}$  – средние квадратические ошибки определения расстояния между осями роликов, радиусов роликов, расстояния от створа АВ до оси правого ролика и превышения левого ролика над правым.

Средняя квадратическая ошибка подсчета искривления находится по формуле (7).

С учетом данных табл. 10.2 работы [31] при  $m_{x_i'} = 0,5$  мм;  $m_{x_i''} = 0,8$  мм;  $m_s = 1$  мм;  $m_p = 1$  мм;  $m_{h_p} = 0,5$  мм получаем, что  $m_{d_5} = 1,6$  мм. Такая точность, как уже указывалось, достаточна при контроле вращающихся печей.

На печах с большими поперечными колебаниями фундаментов целесообразно применять способ малых углов, для чего изготавливается приспособление, показанное на рис. 34.

Примерно параллельно опорному ролику устанавливается трубчатая штанга, которую закрепляют к деталям станины ролика струбцинами.

Вдоль штанги перемещается трубчатая раздвижная штанга с пружиной, которая прижимает эту штангу к ролику (на рис. 34 стрелкой показано направление действия пружины). Штанга оканчивается роликом

диаметром 50 мм, на оси которого укрепляется другая штанга длиной 3 м. Эта штанга имеет визирный конус с экраном и удерживается в горизонтальном положении раздвижной стойкой.

По указанной в "Способах непосредственного контроля" методике определяется  $x_i$ . Отрезки  $x_i$  на каждом опорном ролике измеряют с двух концов ролика для вычисления угла разворота оси ролика по отношению к оси печи. Это замечание справедливо и по отношению приведенных ранее способов.

Определив взаимное превышение левого и правого опорных роликов на фундаменте, расстояние между осями, диаметры бандажей и опорных роликов по одной из описанных выше методик, можно вычислить расстояние от вспомогательного створа до центра бандажа, а по формуле (7) – искривление оси печи. Точность способа такая же, что и вышеупомянутых.

Объем работ при контроле искривления оси печи косвенными способами больше, чем объем работ при контроле непосредственными способами, однако косвенные способы имеют преимущество, так как ими определяется фактическое положение опорных роликов. Последнее весьма важно при разработке ремонтных мероприятий.

## **§ 19. Геодезический контроль по высоте работающих агрегатов**

Для контроля работающего агрегата по высоте необходимо отнивелировать вспомогательные точки на фундаментах и затем передать с них превышение на изучаемый опорный элемент. Используя определенные геометрические связи между отнивелированными опорными элементами, вычисляют искривление оси агрегата.

### *Нивелирование при контроле по высоте работающего агрегата*

Метод и точность нивелирования определяются требованиями к точности контроля прямолинейности агрегата, конкретными условиями и наличием приборов. Обычно используют высокоточное и точное нивелирование, тригонометрическое нивелирование, реже – гидростатическое. Непосредственно нивелирование соседних контролируемых точек агрегатов, как правило, невозможно, поэтому вначале измеряют превышения между вспомогательными точками и уже с них передают превышение на контролируемые точки объекта.

В разделе "Способы косвенного контроля" описана одна из возможных схем нивелирования вспомогательных точек при контроле вращающихся печей. Подобная схема, однако, трудно реализуема на печах с большими поперечными перемещениями. В этих условиях оправдало себя

применение двух нивелиров и подвешенного стального тросика. Применение тросика вместо обычно подвешиваемой рулетки вызвано необходимостью уменьшить влияние ветра на вертикальный базис. Тросик, имеющий резиновую оболочку, размечался на метры, расстояние между метками определялось на компараторе, а для отсчетов служили передвижные шкалы длиной по 25 см с миллиметровыми делениями, укрепляемые на соответствующих метках в зависимости от величины передаваемого превышения. Компарирование тросика выполнялось в течение года, изменений в его длине за этот период не обнаружено.

Производственные исследования выполняли на опоре вращающейся печи, имеющей высоту 9 м и размах колебаний ее верха до 40 мм. Методика передачи превышений ничем существенным не отличалась от методики передачи превышения по способу подвешенной рулетки, за исключением того, что на репер внизу и на вспомогательную точку на верху опоры постоянно укреплялись реечки с миллиметровыми делениями, а печи перед измерениями размечали на четыре части, и отсчеты выполняли по команде при каждом положении печи. Измерения проводили при 40 оборотах печи. Согласно данным исследований, ряды измеренных превышений, подсчитанные при каждом положении печи, подчиняются закону нормального распределения и принадлежат к одной генеральной совокупности. Найденная по ним средняя квадратическая ошибка превышения оказалась 0,37 мм. Следует отметить, что расхождения в превышениях, полученных из наблюдений при разных положениях печи, не отличаются друг от друга более чем на полученную ошибку превышения. Этот способ можно с успехом применять для передачи превышений на верх колеблющихся фундаментов, если есть возможность подвесить на опорах тросик и установить нивелиры на опоре и на полу цеха. Установка нивелира на опоре в нескольких метрах от тросика позволяет взять отсчет с достаточной точностью даже при больших колебаниях опор.

Когда по техническим или внешним условиям нельзя применить вышеназванные методы, то превышение вспомогательных точек можно определить нивелированием короткими лучами, устанавливая нивелир на переходных площадках и делая несколько станций между соседними опорами. Уменьшение плеча визирования до 4–5 м дает возможность выполнить нивелирование при больших колебаниях и сотрясениях прибора. Так, на вращающейся печи 4,5x170 м были выполнены экспериментальные исследования, проводившиеся на одном из переходов, отличающемся большими вибрациями и нерегулярными сотрясениями. Были выбраны две вспомогательные точки на соседних опорах и две переходные точки, которые закреплялись на перилах струбцинами, имеющими сферическую головку для установки на них рейки. Таким образом, нивелирный ход состоял из трех станций и был проложен шесть раз в прямом и обратном направлениях. При наблюдениях использовали нивелир НА-1 и рейку с инварной полоской и круглым уровнем. Длина рейки 0,7 м. Измерения

проводили при одном горизонте. Превышения на каждой станции исследовали на нормальность распределения и на принадлежность к одной генеральной совокупности.

Средняя квадратическая ошибка превышения между вспомогательными точками, полученная из прямого и обратного ходов, оказалась 0,6 мм, что вполне достаточно при контроле печей по высоте.

Следовательно, способы подвешенного тросика и способ нивелирования короткими лучами по переходам обеспечивают достаточную точность определения превышений между вспомогательными точками при контроле по высоте вращающихся печей на ходу даже при величине колебаний верха опор до 40 мм.

Передачу превышения на вращающуюся деталь можно осуществить при помощи перемещающегося по высоте нивелира. Однако применить этот способ на агрегатах с большими поперечными колебаниями фундаментов становится затруднительным или невозможным, поскольку пузырек чувствительного цилиндрического уровня постоянно отклоняется от середины, а при использовании нивелиров с компенсаторами взят отсчет при постоянно колеблющейся сетке нитей не представляется возможным. Поэтому можно использовать для этой цели тригонометрическое нивелирование, так как привести на середину пузырек уровня вертикального круга и удержать его там значительно легче, чем пузырек цилиндрического уровня нивелира. Дело в том, что чувствительность уровня вертикального круга в два-три раза меньше, чем чувствительность цилиндрических уровней технических нивелиров, не говоря уже о высокоточных приборах. При соответствующей организации измерений можно достичь достаточной точности при выполнении измерений стандартными геодезическими приборами. Принцип наблюдений виден из рис. 39.

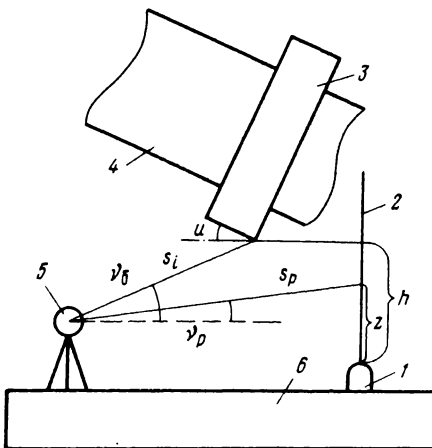


Рис. 39. Схема передачи превышения от вспомогательной точки на низ бандажа тригонометрическим нивелированием:

1 - вспомогательная точка; 2 - рейка; 3 - бандаж; 4 - корпус печи; 5 - теодолит; 6 - верхняя фундаментальная плита

Если прибор стоит на опоре со стороны холодного конца печи, а рейки — со стороны горячего, то искомое превышение  $h$  можно вычислить по формуле

$$h = z + s_i \sin \nu_6 - s_p \sin \nu_p + u(s_i - s_1),$$

где  $z$  — отсчет по рейке;  $s_i$  и  $s_1$  — расстояния от прибора до низа банджа в  $i$ -м и 1-м приемах наблюдений;  $\nu_6$  — угол наклона на низ банджа в  $i$ -м приеме наблюдений;  $s_p$  — расстояние от прибора до рейки;  $\nu_p$  — угол наклона на штрих рейки;  $u$  — проектный угол печи.

Четвертый член формулы представляет собой поправку за счет осевого смещения банджа вместе с печью при наблюдении его в  $i$ -м приеме относительно 1-го приема.

Сделав  $n$  приемов, можно найти окончательное значение превышения по формуле

$$h_{\text{ср}} = \left( \sum_1^n h \right) / n.$$

Оценка точности найденного превышения проводится по формуле

$$m_{h_{\text{ср}}}^2 = \frac{1}{n} \left\{ m_z^2 + [(\sin \nu_6 + u)^2 + u^2] m_s^2 + \sin^2 \nu_p m_{s_p}^2 + \right. \\ \left. + s^2 \cos^2 \nu_6 \left( \frac{m_{\nu_6}}{\rho} \right) + s_p^2 \cos^2 \nu_p \left( \frac{m_{\nu_p}}{\rho} \right) \right\},$$

где  $m$  — средние квадратические ошибки соответствующих величин  $h_{\text{ср}}$ ,  $z$ ,  $s_i$ ,  $s_p$ ,  $\nu_6$ ,  $\nu_p$ ,  $\rho' = 3437'$ .

Для конкретных условий формулу можно значительно упростить. Так, для печей 4,5x170 м

$$\nu_6 \approx \nu_p \approx 2^\circ; s_p \approx 1,5 s_i; \sin \nu_6 \approx \sin \nu_p \approx 0,04; u \approx 0,04; \\ \cos \nu_6 \approx \cos \nu_p \approx 1; m_{\nu_6} / \rho \approx m_{\nu_p} / \rho \approx m_{\nu} / \rho, m_{s_p} \approx m_s = m.$$

Тогда имеем

$$m_{h_{\text{ср}}}^2 = \frac{1}{n} \left[ m_z^2 + 0,01 m^2 + 3,25 \left( \frac{m_{\nu}}{\rho} \right)^2 \right].$$

Применяя рейку с миллиметровыми делениями и полагая  $m_z = 0,5$  мм,  $m = 1$  см,  $m_{\nu} = 0,5'$ ,  $n = 4$  получаем  $m_{h_{\text{ср}}} = 0,7$  мм. Такая точность — удовлетворительна и легко достижима.

Натурное исследование способа было выполнено на одной из опор печи 4,5x170 м. Всего было сделано 40 независимых приемов, каждый прием выполнялся при двух положениях вертикального круга теодолита Т2. Расстояния измеряли стальной рулеткой, наведение средней нити осуществляли на различные штрихи рейки в пределах 12 см. За все время наблюдений бандаж с печью перемещался в пределах 4,5 см. Из обработки результатов наблюдений получено для четырех приемов  $m_{\text{ср}} = 0,5$  мм, что по величине близко к ошибке, рассчитанной теоретически.

Следовательно, тригонометрическое нивелирование помогает решить одну из трудных задач при контроле по высоте вращающихся цементных печей без их остановки — нивелирование низа бандажей, — обеспечивая при этом безопасность и достаточную точность.

Передача превышения от вспомогательной точки на опорный ролик проводится при помощи специального устройства (рис. 40). Если два ролика 2, 6, соединенные постоянной базой 5, приставить к медленно вращающейся детали так, чтобы пузырек уровня был на середине ампулы, то линия  $O_1O_2$ , соединяющая центры роликов, будет отвесной. На приспособлении укрепляется линейка 4 с миллиметровыми делениями. Нуль линейки совмещен с серединой линии  $O_1O_2$ . При отвесном положении

линии  $O_1O_2$  нуль линейки лежит в горизонтальной плоскости, проходящей через центр поперечного сечения опорного ролика.

Приспособление устанавливается на укрепленной около ролика штанге посредством хомута 11 с закрепительным винтом. Приспособление может поворачиваться вокруг этого хомута до тех пор, пока ролики не расположатся в плоскости, перпендикулярной к оси детали. В этом положении приспособление закрепляется на хомуте

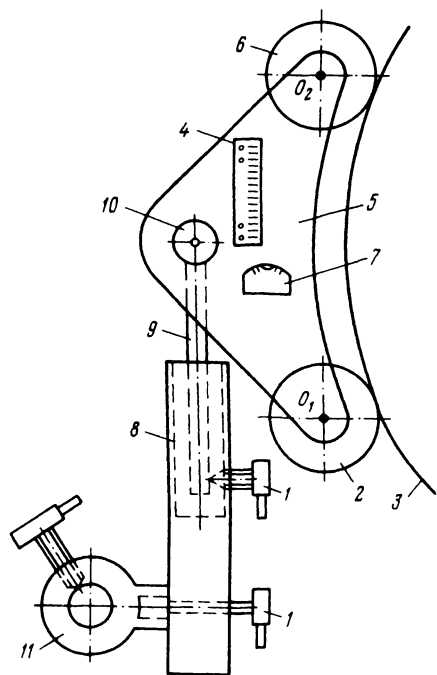


Рис. 40. Схема приспособления для вынесения центра опорного ролика по высоте:

1 — закрепительные винты; 2, 6 — ролики; 3 — роликоопоры; 4 — линейка с миллиметровыми делениями; 5 — база; 7 — уровень; 8 — втулка; 9 — шток; 10 — ось; 11 — хомут

винтом. Приспособление может поворачиваться вокруг оси относительно штока 9. Шток перемещается во втулке до выведения пузырька уровня на середину, после чего он зажимается винтом.

По линейке при помощи нивелира берут отсчет  $a_0$ . Из этого отсчета вычитают поправку за наклон рейки

$$\Delta a = a_0 u^2 / 2,$$

где  $u$  – уклон печи. Поправку вводят из-за отклонения линейки от отвесного положения, так как линейка располагается в плоскости поперечного сечения опорного ролика, а ось последнего имеет такой же уклон, что и продольная ось печи.

Для контроля и повышения точности выноса центра детали по высоте все измерения должны проводиться два-три раза.

Исследованиями установлено, что точность выноса центра опорных роликов вращающихся печей составляет 0,2 мм. Это вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к вынесению центров опорных роликов по высоте при контроле за прямолинейностью оси агрегата.

#### *Контроль прямолинейности осей вращающихся агрегатов по высоте*

Рассмотрим на примере вращающихся печей контроль по высоте косвенным и непосредственным способами. В косвенном способе контроля искривление оси печи по высоте  $\Delta y_i$  получается при определении положения роликов в соответствии с методикой, описанной выше (см. "Нивелирование при контроле по высоте работающего агрегата"). Отклонения по высоте  $\Delta y_i$  на  $i$ -й опоре от проектной линии будут (см. рис. 32 и 38)

$$\begin{aligned} \Delta y_i = & 1,15 \Delta R_i + 0,08 [(p_{\text{ли}i} + p_{\text{пи}i}) - (p_{\text{ли}1} + p_{\text{пи}1})] + 0,29(s_1 - s_i) + \\ & + 0,50 [(h_{\text{ли}i} + h_{\text{пи}i}) + u \sum_1^{i-1} (s_{\text{ли}i} + s_{\text{пи}i} + \Delta s_{\text{ли}i} + \Delta s_{\text{пи}i} - \\ & - h_{\text{пи}1})] + \frac{1}{2} (h_1 - h_i), \end{aligned}$$

где  $\Delta R_i = R_i - R_1$ ;  $R_i$  – наружный радиус бандажа на  $i$ -й опоре;  $h_{\text{ли}i}$  и  $h_{\text{пи}i}$  – превышение левого и правого роликов  $i$ -й опоры над левым роликом первой опоры;  $s_{\text{ли}i}$  и  $s_{\text{пи}i}$  – расстояние соответственно между левыми и правыми роликами  $i$ -й и  $(i + 1)$ -й опор в момент нивелирования  $i$ -й опоры. Формула действительна при  $p_{\text{ли}i} - p_{\text{пи}i} \leq 10$  мм.

Как корпус печи с бандажами, так и ролики во время работы агре-

гата могут смещаться вдоль оси печи. Поэтому в момент нивелирования ролика  $i$ -й опоры необходимо фиксировать положение ролика на  $(i + 1)$ -й опоре. Для этого достаточно сделать соответствующие пометки карандашом на станине ролика. При нивелировании роликов или бандажей на  $(i + 1)$ -й опоре в результате смещения роликов или бандажей фиксируются величины  $\Delta s_{\text{ли}}$  и  $\Delta s_{\text{пи}}$ . При смещении ролика или бандажа вниз, по направлению к горячему концу печи,  $\Delta s_i$  придается знак плюс, при смещении вверх – минус.

Расчет точности контроля печи в вертикальной плоскости по роликам можно сделать по формуле

$$m_{\Delta y_i}^2 = 2,64 m_R^2 + 0,03 m_p^2 + 0,17 m_s^2 + 0,25 (n_{\text{ли}} + n_{\text{пи}} + n_{\text{п1}}) m_h^2 + 0,0008 (i - 1) m_{s_0}^2 + 0,50 m_{h_1}^2,$$

где  $m_{\Delta y_i}$  – средняя квадратическая ошибка определения искривления оси печи в вертикальной плоскости на  $i$ -й опоре;  $m_R$  – средняя квадратическая ошибка определения радиуса бандажа;  $n_{\text{ли}}$ ,  $n_{\text{пи}}$  и  $n_{\text{п1}}$  – число превышений, которое необходимо передать с левого ролика 1-й опоры соответственно на левый и правый ролики  $i$ -й опоры и правый ролик первой опоры;  $m_h$  – средняя квадратическая ошибка превышения;  $m_{s_0}$  – средняя квадратическая ошибка измерения расстояний между соответствующими роликами соседних опор с учетом ошибок измерений  $\Delta s_i$ ;  $m$  – средняя квадратическая ошибка определения диаметрального зазора. Так, при условиях, отмеченных в разделах "Способы косвенного контроля" и "Нивелирование при контроле по высоте работающего агрегата" и для печей 4,5x170 м на восьми опорах  $m_R = 0,5$  мм,  $n_{\text{ли}} = n_{\text{пи}} = 11$ ,  $n_{\text{п1}} = 2$ ,  $m_{s_0} = 10$  мм,  $m_{h_1} = 0,6$  мм найдем, что  $m_{\Delta y_8} = 1,5$  мм, т.е. точность достаточна.

Непосредственный способ контроля заключается в том, что выполняется нивелирование вспомогательных точек и передача превышений от них на низ бандажей по одной из методик, описанных выше.

При указанных условиях искривления вычисляют по формуле

$$\Delta y_i = h_i^0 - \sum_1^{i-1} (s_i - \Delta s_i) + \Delta R_i' + \frac{1}{2} (h_1 - h_i),$$

где  $h_i^0$  – определение низа  $i$ -го бандажа над низом 1-го бандажа;  $\Delta R_i' = R_i - R_1$ .

С учетом того, что для передачи превышения с 1-го бандажа на  $i$ -й необходимо сделать  $n_i$  станций и ход прокладывается дважды, средняя квадратическая ошибка определения искривления на  $i$ -й опоре подсчитывается по формуле

$$m_{\Delta y_i}^2 = n_i m_h^2 + 0,0016(i - 1)m_{s_0}^2 + 2m_R^2 + 0,50m_{h_1}^2.$$

Точность способа примерно та же, что и точность предыдущего способа. Очевидно, что способ непосредственного контроля имеет значительно меньший объем работ, но пространственное положение опорных роликов не фиксируется. Поэтому его целесообразно применить лишь в случае, когда нужно оперативно проконтролировать прямолинейность агрегата.

## § 20. Контроль соосности двух составных элементов вращающихся агрегатов типа валопровода

Небольшие по габаритам валопроводы контролируют при их остановке машиностроительными способами при помощи различных устройств с индикаторами, измерительных скоб, шупов и т.п.

Однако при увеличении размеров валопроводов трудность контроля обычными способами увеличивается. На примере геодезического контроля крупногабаритных цементных мельниц, состоящих из двух основных элементов, соединенных третьим, промежуточным, ниже показаны возможности успешного применения геодезических способов контроля валопроводов, в том числе и во время их работы.

### *Общие сведения о мельницах*

Мельницы применяются в самых различных отраслях промышленности, особенно широко – в цементной.

Мельницы – основные агрегаты для тонкого измельчения сырья, угля и других материалов. Если их длина превышает диаметр более чем в два раза, то они называются трубными. Мельницы бывают с центральным или периферическим приводом. В зависимости от типа мельниц число оборотов колеблется в пределах 0,45–0,33 в секунду, средняя производительность от 7 до 150 т/ч.

Главная часть мельницы 2,2х13 м с центральным приводом (рис. 41)–

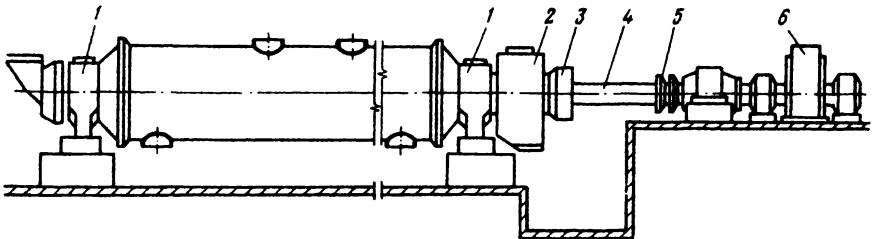


Рис. 41. Схема мельницы с центральным приводом:

1 – цапфовые подшипники; 2 – разгрузочный патрубок; 3 – зубчатая муфта; 4 – приводной вал; 5 – зубчатая муфта; 6 – привод

пустотелый цилиндрический корпус сварной контрукции, расположенный горизонтально. Корпус при помощи цапф опирается на подшипники.

Через входную цапфу в мельницу поступает материал для размола, с другой стороны мельницы через выходную цапфу выходит размолотый материал. Вращение мельницы осуществляется при помощи электропривода.

Для мельниц с периферическим приводом характерно смещение приводного вала в сторону от оси мельницы.

Перспективными являются мельницы самоизмельчения "Гидрофол" и "Аэрофол", безредукторные и струйные [31].

### *Контроль мельниц при их кратковременной остановке*

Монтажные допуски для мельниц (табл. 5, по данным работ [18] и [33]) довольно высокие, поэтому геодезические измерения должны выполняться тщательно и с возможно минимальными ошибками (см. табл. 10.1 п.1 и 4 прил. 10 работы [31]). Для мельниц необходимо, чтобы оси цапф и валы редуктора были горизонтальны, а ось мельницы, приводной вал и вал редуктора соосны. У мельницы с центральным приводом геометрические оси ее цапф и валов редуктора должны лежать в одной горизонтальной плоскости, а геометрические оси цапф и тихоходного вала, кроме того, должны совпадать. Следует подчеркнуть, что нормальная работа агрегата зависит во многом от соблюдения указанных требований.

При контроле цементных мельниц с центральным приводом можно применять геодезические методы, позволяющие в короткий срок с достаточной точностью и без дополнительных монтажных работ (без обычно необходимого демонтирования приводного вала) выявить несоосность валов.

Контроль выполняют при четырех положениях агрегата. Для контроля мельницы в вертикальной плоскости используются нивелир типа Н2 и 3-метровая рейка с инварной полоской или любая другая рейка с делениями через 5 мм, например, рейка с натянутой на ней рулеткой. Превышения центров поперечных сечений середины выходной цапфы, быстроходного вала редуктора (рис. 42) и тихоходного вала редуктора  $CD$  определяют относительно центра поперечного сечения середины выходной цапфы. Рейки устанавливают в точках  $A, B, C, D, E$  и  $F$ . Нивелир размещают на корпусе мельницы, равенство плеч соблюдают в пределах 10 см. Перед нивелированием снимают крышки цапф и кожухи вала.

Для контроля мельницы в горизонтальной плоскости при помощи технического теодолита и визирной марки строят вспомогательный створ приблизительно параллельно оси мельницы. Теодолит устанавливают за редуктором на расстоянии 2–2,5 м от линии  $FD$ . Во втором конце ство-

## Монтажные допуски для цементных мельниц

№ п.п.	Допуск	Величина допуска
1	Негоризонтальность мельницы	0,2 мм на 1 м
2	Радиальное биение цапф	0,5 мм
3	Перекося осей мельницы и тихоходного вала редуктора	0,3 мм на 1 м длины оси
4	Параллельное вертикальное смещение оси мельницы и тихоходного вала редуктора	В зависимости от диаметра муфты, но не более 5 мм
	Параллельное горизонтальное смещение мельницы и тихоходного вала редуктора	0,2 мм на 1 м расстояния между ними
5	Негоризонтальность фундаментных плит	0,5 мм на 1 м
6	Отклонение осей плит от оси агрегата	0,2 мм на 1 м длины мельницы
7	Несоосность цапфовых подшипников	0,05 мм на 1 м длины
8	Отклонение расстояний между центрами цапфовых подшипников не более	$\pm 2$ мм
9	Овальность цапф	0,05 мм
10	Конусность цапф	0,08 мм
11	Негоризонтальность редуктора	0,05 мм на 1 м

ра на штативе устанавливают плоскую марку с круглым уровнем. На щитке марки нанесен треугольник — визирная цель. Вертикальная ось симметрии треугольника намечается тонкими штрихами. При помощи рейки с магнитной прихваткой 2 и круглым уровнем 4 (рис. 43) измеряют расстояние  $x_A$  от отвесной линии, касательной к цапфе, до штрихов, обозначающих ось симметрии визирной цели. Отсчеты берут с точностью 0,1 мм. Затем зрительную трубу теодолита наводят на марку. Рейку переносят к выходной цапфе. При двух положениях вертикального круга теодолита делают отсчеты и вычисляют их среднее значение  $x_B$ , т.е. расстояние от отвесной касательной линии к выходной цапфе до створа. Аналогично измеряют отрезки  $x_C$  и  $x_D$ .

Под несоосностью тихоходного вала редуктора и цапф мельницы понимают параллельное смещение и перекося осей в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Параллельное смещение осей — это расстояние между горизонтальными и отвесными плоскостями, проведенными через центры полумуфт выходной цапфы и промежуточного вала. При этом

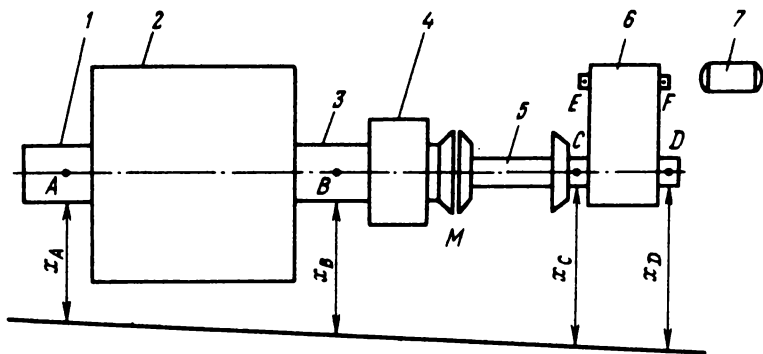


Рис. 42. Схема геодезического контроля мельниц с центральным приводом в плане: 1 – входная цапфа; 2 – корпус; 3 – выходная цапфа; 4 – аспирационная коробка; 5 – промежуточный вал; 6 – редуктор; 7 – электромотор

считается, что промежуточный вал является продолжением тихоходного вала редуктора. Параллельные смещения  $h_M$ ,  $a_M$  и перекосы осей  $\nu_M$  и  $\beta_M$  в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 44, 45) можно вычислить по формулам

$$h_M = \frac{l_2}{l_1} (h_l + R_A - R_B) + \frac{l_3}{l_4} (h_D + R_A - R_D) - \frac{l_5}{l_4} (h_C + R_A - R_C), \quad \nu_M = \frac{h_B}{l_1} \rho' + \frac{h_C - h_D}{l_1} \rho',$$

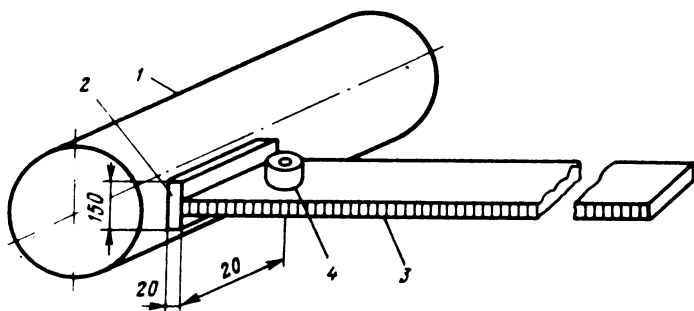


Рис. 43. Схема приспособления для измерения расстояний от отвесных касательных к цапфе мельницы и к тихоходному валу редуктора до вспомогательного створа:

1 – цапфа (вал); 2 – магнитная прихватка; 3 – рейка с миллиметровыми делениями; 4 – круглый уровень

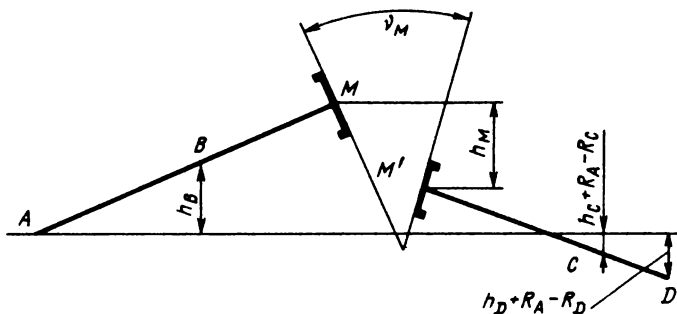


Рис. 44. Схема параллельного смещения и перекоса мельницы и тихоходного вала редуктора в вертикальной плоскости:

$A$  – центр поперечного сечения в середине цапфы;  $B$  – центр поперечного сечения в середине выходной цапфы;  $C$  – центр поперечного сечения торца тихоходного вала редуктора со стороны мельницы;  $D$  – центр поперечного сечения торца тихоходного вала редуктора со стороны электромотора;  $M$  – центр поперечного сечения муфты

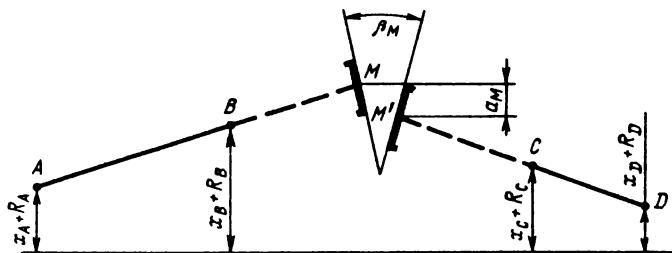


Рис. 45. Схема параллельного смещения и перекоса осей мельницы и тихоходного вала редуктора в горизонтальной плоскости:

$A$  – центр поперечного сечения в середине входной цапфы;  $B$  – центр поперечного сечения в середине выходной цапфы;  $C$  – центр поперечного сечения торца тихоходного вала редуктора со стороны мельницы;  $D$  – центр поперечного сечения торца тихоходного вала редуктора со стороны электромотора;  $M$  – центр поперечного сечения муфты

$$a_M = (x_D - x_A - R_A + R_D) + \frac{l_2}{l_1} (x_A - x_B + R_A - R_B) + \frac{l_5}{l_4} (x_C - x_D + R_C - R_D),$$

$$\beta_M = \frac{x_A - x_B + R_A - R_B}{l_1} \rho' + \frac{x_D - x_C + R_D - R_C}{l_4} \rho',$$

где  $l_2$  — расстояние от середины входной цапфы до середины шлицевого соединения выходной цапфы и промежуточного вала (точка  $M$ );  $l_1$  — расстояние между серединами входной и выходной цапфы;  $l_3$  и  $l_5$  — расстояние от середины шлицевого соединения выходной цапфы и промежуточного вала до места установки рейки на тихоходном валу со стороны мельницы и электромотора;  $l_4$  — расстояние между местами установки рейки на тихоходном валу;  $h_B$  — измеренное превышение верха выходной цапфы над верхом середины входной цапфы;  $h_C$  и  $h_D$  — измеренные превышения верха тихоходного вала редуктора со стороны мельницы и электромотора над верхом середины входной цапфы;  $R_A, R_B$  и  $R_C, R_D$  — радиусы цапф мельницы и тихоходного вала редуктора в соответствующих точках;  $x_A$  и  $x_B$  — расстояния от отвесных касательных к входной и выходной цапфам до створа;  $x_C$  и  $x_D$  — расстояния от отвесных касательных к тихоходному валу со стороны мельницы и электромотора до створа.

Изображенные на рис. 44 параллельное смещение и перекося осей в вертикальной плоскости имеют знак плюс, а в горизонтальной (см. рис. 45) — знак минус.

Точность определения величин  $h_M, v_M, a_M$  и  $\beta_M$  можно найти из выражений

$$m_{h_M} = m_h \sqrt{(l_2/l_1)^2 + (l_3/l_4)^2 + (l_5/l_4)^2},$$

где  $m_{h_M}$  — средняя квадратическая ошибка величины  $h_M$ ;  $m_h$  — средняя квадратическая ошибка превышения;

$$m_{v_M} = m_h \rho' \sqrt{\frac{1}{l_1^2} + \frac{2}{l_4^2}},$$

$$m_{a_M} = m_x \sqrt{2 \left[ \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{l_5}{l_4} \right)^2 - \frac{l_2}{l_1} - \frac{l_3}{l_4} \right]},$$

$$m_{\beta_M} = m_x \rho' \sqrt{2 \left( \frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_4^2} \right)},$$

где  $m_{v_M}$  — средняя квадратическая ошибка определения величины  $v_M$ ;  $m_{a_M}$  — средняя квадратическая ошибка определения величины  $a_M$ ;  $m_x$  — средняя квадратическая ошибка отрезков  $x_A, x_B, x_C$  и  $x_D$ ;  $m_{\beta_M}$  — средняя квадратическая ошибка величины  $\beta_M$ . Так, например, для мельницы 3x10 м отношения  $l_2/l_1 = 1,2$ ;  $l_3/l_4 = 1,1$ ;  $l_4/l_5 = 2,1$ ;  $l_1 = 16$  м;  $l_4 = 3$  м.

Средняя квадратическая ошибка превышения  $m_h$  из четырех горизонтов может быть принята равной 0,065 мм.

Отрезки  $x_A$ ,  $x_B$ ,  $x_C$  и  $x_D$  измеряют при четырех положениях мельницы, из результатов измерений находят средние. Средняя квадратическая ошибка этих отрезков равна 0,07 мм [31].

По вышеприведенным формулам получим

$$m_{h_M} = 0,2 \text{ мм}; m_{a_M} = 0,2 \text{ мм}; m_{\nu_M} = 0,11'; m_{\beta_M} = 0,11'.$$

Такая точность вполне достаточна для контроля мельниц. Все измерения выполняют без дополнительных монтажных работ при кратковременной остановке агрегата.

Геодезический контроль мельниц с периферическим приводом может быть сделан по методике, аналогичной методике контроля мельниц с центральным приводом. Контроль по высоте осуществляется нивелированием середин цапф мельницы и валов с обеих сторон подшипников. По вышеприведенным формулам вычисляют вертикальные смещения и перекос валов привода между собой, всего вала и оси мельницы. В последнем случае к превышениям валов привода нужно прибавить проектное превышение оси мельницы над осью вала привода.

Контроль в плане также аналогичен контролю мельниц с центральным приводом. Отличие заключается в том, что до вспомогательного створа измеряют расстояния от всех звеньев вала привода, а при вычислении параллельного смещения и перекосов валов к этим расстояниям нужно прибавить проектное смещение вала привода относительно оси мельницы.

#### *Контроль мельниц во время их работы*

Выше были описаны геодезические способы контроля крупногабаритных мельниц цементного завода, которые имеют ряд преимуществ перед традиционным способом – минимальное время остановки агрегата на период контроля и отсутствие дополнительных монтажных работ.

Однако специально для контроля агрегат останавливают лишь тогда, когда искривление его вызывает недопустимые нарушения в работе оборудования. Редких контрольных измерений, которые проводят при остановке агрегата на ремонт, явно недостаточно, особенно для мельниц с фундаментами, работающими в сложных гидрогеологических условиях.

Поэтому ниже излагаются способы, позволяющие выполнить контроль мельницы без ее остановки, как только возникнет в этом необходимость.

Контроль по высоте заключается в определении превышения центра выходной цапфы (точка  $B$ , рис. 46), центров тихоходного вала редуктора со стороны мельницы (точка  $C$ ) и со стороны электромотора (точка  $D$ ) над центром входной цапфы (точка  $A$ ).

При вращении мельницы эти превышения можно измерить следующим образом. Устанавливают точный нивелир типа Н2 в 3–5 м от входной

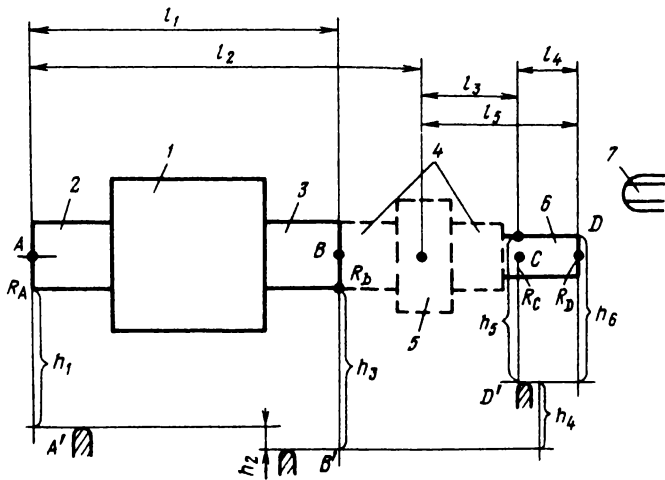


Рис. 46. Схема контроля мельниц по высоте без остановки агрегата:

1 – корпус; 2, 3 – цапфы; 4 – приводной вал; 5 – соединительная муфта; 6 – редуктор; 7 – электромотор

цапфы. Изменяя высоту прибора перемещением ножек штатива, за несколько приближений добиваются появления в поле зрения трубы изображения нижнего обреза входной цапфы, который выступает на 3 см из подшипника. Работа будет значительно облегчена, если для перемещения нивелира по высоте применить люнет [5]. Затем (при четырех положениях мельницы) наводят среднюю нить на нижний обрез цапфы и берут отсчеты по головке плоскопараллельной пластинки. Пузырек уровня прибора должен быть на середине. Далее на вспомогательной точке  $A'$  (см. рис. 46) устанавливают рейку с инварной полоской и берут отсчеты по основной и дополнительной шкалам. Равенство расстояний от прибора до цапфы и до рейки выдерживается в пределах 10 см.

Превышение  $h$  низа цапфы над вспомогательной точкой вычисляют по формуле

$$h_1 = (a + b - c)0,05 \text{ мм,}$$

где  $a$  – отсчет по рейке;  $b, c$  – отсчеты по барабану при наведении соответственно на штрих рейки и на низ цапфы.

По обычной методике измеряют превышения  $h_2$  и  $h_4$  между вспомогательными точками  $A', B', D$  и по только что описанной методике – превышения  $h_3$  нижнего обреза выходной цапфы над точкой  $B'$ ,  $h_5$  – верха тихоходного вала со стороны мельницы над точкой  $D'$  и  $h_6$  – верха тихоходного вала со стороны электромотора над точкой  $D'$ .

Методика контроля мельницы на ходу в горизонтальной плоскости заключается в следующем: на расстоянии от мельницы 2–3 м примерно параллельно оси агрегата нивелиром типа Н2 задают створ и способом бокового нивелирования измеряют расстояния  $x_A$ ,  $x_B$ ,  $x_C$  и  $x_D$  от створа до отвесных касательных к цапфам и тихоходному валу редуктора (в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ ). Чтобы выполнить такие измерения, плоскопараллельная пластина вместе с головкой поворачивается на нивелире на  $90^\circ$ . Это дает возможность делать отсчеты по приводимой при помощи круглого уровня в горизонтальное положение рейке с инварной полоской, укрепленной на одном конце трубчатой штанги длиной 1,5 м. Длина собственной рейки равна 50 см. На втором конце штанги имеется ролик диаметром 5 см. На внешнее кольцо ролика надевается хомут овального сечения для улучшения однозначности контакта ролика с цапфами и тихоходным валом. При наблюдениях штангу с рейкой приставляют роликом поочередно сбоку к входной и выходной цапфам и тихоходному валу редуктора со стороны мельницы и электромотора и каждый раз берут отсчеты при четырех положениях мельницы. По формулам (30) вычисляют  $h_M$ ,  $v_M$ ,  $a_M$  и  $\beta_M$ , причем

$$h_B = h_1 + h_2 + h_3 - R_A + R_B,$$

$$h_C = h_1 + h_2 + h_5 + h_4 - R_A - R_C,$$

$$h_D = h_1 + h_2 + h_4 + h_6 - R_A - R_D.$$

В этих формулах, в отличие от аналогичных обозначений в формулах (30)  $l_1$  и  $l_2$  — расстояния от конца входной цапфы и конца выходной цапфы до середины шлицевого соединения промежуточного вала;  $l_3$  и  $l_5$  — расстояния от середины шлицевого соединения промежуточного вала до мест наведения средней нити нивелира на верх тихоходного вала со стороны мельницы и электромотора;  $l_4$  — расстояние между местами наведения средней нити нивелира на верх тихоходного вала со стороны мельницы и электромотора.

Величины  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$  и  $l_5$  достаточно измерить рулеткой с точностью до нескольких сантиметров,  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_D$  определяют известными в машиностроении способами и они практически всегда соответствуют паспортным данным.

Дополнительно по указанной выше методике определяют взаимные превышения быстроходного и тихоходного валов, что позволяет проверить горизонтальность редуктора. Точность контроля мельниц описанными способами можно оценить по следующим формулам, полученным из теории ошибок измерений, т.е. дифференцированием формул для подсчета  $h_M$ ,  $v_M$ ,  $a_M$  и  $\beta_M$  и переходом от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам:

$$m_{h_M} = \sqrt{\left[\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{l_2}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{l_5}{l_4}\right)^2 + \left(\frac{l_3}{l_4}\right)^2\right] m_{h_0}^2 + \sqrt{1 + \left(1 - \frac{l_2}{l_1}\right)^2} m_h^2},$$

$$m_{v_M} = \rho' \sqrt{2 \left[\left(\frac{1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_4}\right)^2\right] m_{h_0}^2 + \left(\frac{1}{l_1}\right)^2 m_h^2},$$

$$m_{a_M} = m_x \sqrt{\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{l_2}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{l_5}{l_4}\right)^2 + \left(\frac{l_3}{l_4}\right)^2},$$

$m_{\beta_M}$  вычисляются по формуле (31).

В записанных выше выражениях приняты следующие обозначения:  $m_{h_0}$  — средняя квадратическая ошибка превышений  $h_1, h_3, h_5, h_6$ ;  $m_h$  — средняя квадратическая ошибка превышений  $h_2$  и  $h_4$ .

Апробирование способа было выполнено на цементной мельнице размером 3x14 м. Все измерения выполнялись при четырех положениях агрегата. Специальные исследования показали, что при указанных выше условиях наблюдений средняя квадратическая ошибка однократного наведения средней нити нивелира на низ цапфы или на верх тихоходного вала работающей мельницы составляет  $\approx 0,07$  мм, а средняя квадратическая ошибка отсчета по одной шкале горизонтальной рейки, приставленной к цапфе, — 0,32 мм. Приняв  $m_h \approx 0,065$  мм,  $m_{h_0} = m_x = 0,1$  мм, получим  $m_{h_M} = m_{a_M} = 0,3$  мм;  $m_{v_M} = m_{\beta_M} = 0,2$ .

Такой точности вполне достаточно для контроля мельниц на ходу.

Контроль мельницы по описанным в § 20 способам позволил установить значительные величины параллельных смещений и перекосов осей некоторых мельниц и тихоходных валов их редукторов, которые превышали допуски в несколько раз. Деформации возникли вследствие осадок и кренов редуктора, а также вытягивания анкерных болтов редуктора из-за разрушения бетона подтеками масла. Своевременное устранение несоосности и перекосов осей мельницы и тихоходных валов редукторов обеспечило создание необходимых условий для нормальной работы агрегата.

Таким образом, изложенные способы контроля мельниц при эксплуатации позволяют определить с достаточной точностью и безопасностью искривления оси агрегата без прекращения технологического процесса, что способствует повышению производительности работы оборудования,

полностью исключает обычно необходимые при традиционных способах дополнительные монтажные работы и дает возможность проконтролировать пространственное положение агрегата в любой момент.

## Глава 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕЙ АГРЕГАТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты контрольных измерений по определению пространственного положения опорных элементов дают возможность вычислить искривления оси агрегата. Искривления обычно имеют вид отклонений отдельных центров опорных поперечных сечений от замыкающей, проходящей через центры первого и последнего сечений.

Для последующего использования полученных данных нужно найти положение аппроксимирующей прямой, которая должна наиболее близко подходить к ломаной линии, отражающей фактическую непрямолинейность агрегата.

В зависимости от конкретных условий выбирают разные критерии для определения оптимального положения оси объекта. При этом могут встретиться следующие случаи.

1. Если в качестве критерия выдвигается требование

$$F_1 = \sum_{i=1}^n v_i^2 \rightarrow \min, \quad (32)$$

где  $v_i$  – отклонения отдельных точек объекта от искомого положения оси, то оптимальное относительно этого критерия положение оси будем называть надежнейшим.

Надежнейшую ось показывают на исполнительных чертежах, используют для привязки, подключения к действующему агрегату новых технологических линий, реконструкции и т.п.

2. Если отыскивается прямая из условия

$$F_2 = \sum_{i=1}^n |v_i| \rightarrow \min, \quad (33)$$

то такое положение оси будем называть просто оптимальным.

Выпрямление оси осуществляют путем минимальных сдвижек опорных элементов, что максимально ослабляет внутренние усилия при рихтовке агрегата.

3. Если критерием оптимальности положения оси назначается требование минимального (или ограниченного) числа смещаемых опорных элементов, такую ось назовем оптимальной относительно числа сдвижек. Возникающие при этом усилия в системе агрегат – фундаменты могут быть значительными. Ослабление их достигается специальными мероприятиями, например, для вращающейся печи – разрезкой корпуса.

При решении перечисленных задач дополнительно могут накладываться ограничения на смещения отдельных точек.

## § 21. Агрегаты и технологические линии с одной осью

### Нахождение надежнейшей оси агрегата

Существуют различные формулы для определения надежнейшего положения прямой линии по методу наименьших квадратов ([5], [37] и др.), которые, что вполне понятно, в конечном счете приводят к одним и тем же результатам.

Предположим, что отклонения центров отдельных опорных поперечных сечений от линии, проходящей через центры крайних опорных сечений, вычислены.

Совместим ось ординат (рис. 47) с этой линией, а начало координат – с центром первого опорного поперечного сечения.

Ломаная  $L_1, L_2, \dots, L_n$  изображает искривленную ось агрегата, а отрезок прямой  $PQ$  – надежнейшее положение оси. Если контролируруемую точку  $L_i$  сместить на надежнейшую ось, то она займет положение  $M_i$  ( $i = 1, n$ ). В выбранной системе имеем координаты точек  $L_i$  ( $x_i^0, y_i^0$ ).

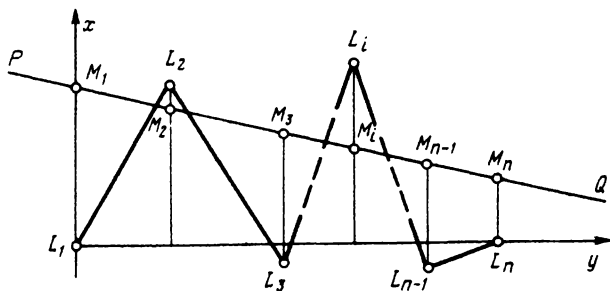


Рис. 47. Определение надежнейшего положения оси агрегата:

$L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n$  – контролируемые точки;  $PQ$  – надежнейшее положение оси агрегата

Тогда точка  $M_i$  имеет координаты  $(x_i, y_i)$ , но  $x_i$  нам пока неизвестна. Она должна быть найдена из условий:

- а) точки  $M_1, M_2, \dots, M_n$  лежат на одной прямой;
- б) сумма квадратов интересующих нас отклонений

$$v_i = x_i - x_i^0 = M_i L_i \quad (34)$$

должна быть минимальной (32). Пусть  $x = ay + b$  — искомое уравнение прямой. Тогда  $x_i = ay_i + b$ . Подставив  $x_i$  и  $F_1$ , получим

$$S = S(a, b) = a_1 a^2 + a_2 a b + a_3 b^2 + a_4 a + a_5 b + a_6; \quad (35)$$

$$a_1 = \sum_{i=1}^n y_i^2; \quad a_2 = 2 \sum_{i=1}^n y_i; \quad a_3 = n; \quad a_4 = -2 \sum_{i=1}^n y_i x_i;$$

$$a_5 = -2 \sum_{i=1}^n x_i^0; \quad a_6 = \sum_{i=1}^n (x_i^0)^2.$$

Исследуя функцию  $F_1(a, b)$  на экстремум, найдем ее минимум при соответствующих  $a$  и  $b$ .

Рассмотрим пример определения надежнейшей оси агрегата по результатам контрольных измерений на вращающейся печи 4,5x170 м.

После соответствующих вычислений в таблице целевую функцию (35) запишем так

$$F_1 = 6,79a^2 + 8b^2 - 63,1a - 99,8b + 12,28ab + 569,05. \quad (36)$$

Найдем точку  $A(a_0, b_0)$  минимума функции из системы  $\partial F_1 / \partial a = 0$ .

Координаты этой точки являются решением системы уравнений, а именно

$$13,58a + 12,28b = 63,1;$$

$$12,28a + 16b = 99,8$$

и равны  $A(-3,27; 8,74)$ . Отметим, что  $F_1(-3,27; 8,74) = 228$ . Следовательно, уравнение искомой прямой  $x = -3,27y + 8,74$ . Подсчитанные  $v_i$  показаны в последней графе табл. 6.

Если на координаты точек  $M_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) наложены ограничения  $\alpha_j \leq x_{ij} - x_{ij}^0 \leq \beta_j$ ; ( $j = \overline{1, n}$ ), то, подставляя в них  $x_{ij}$ , запишем

$$\alpha_j + x_{ij}^0 \leq ay_{ij} + b \leq \beta_j + x_{ij}^0; \quad (j = \overline{1, S}). \quad (37)$$

Таблица 6

Определение надежнейшей оси вращающейся печи 4,5 x 170 м

$y_i$ , сот- ни м	$x_i^0$ , мм	$y_i^2$	$(x_i^0)^2$	$-y_i x_i^0$	$a y_i$	$b$	$-x_i^0$	$x_i - x_i^0 =$ $v_i$
0	0	0	0	0	0	8,74	0	+8,7
0,22	+9,9	0,05	98,01	-2,18	-0,70	8,74	9,9	-1,9
0,44	+17,6	0,19	309,76	-7,74	-1,44	8,74	-17,6	-10,3
0,63	+5,6	0,40	31,36	-3,53	-2,06	8,74	-5,6	+1,1
0,86	+4,0	0,74	16,00	-3,44	2,81	8,74	-4,0	+1,9
1,10	+10,4	1,21	108,16	-11,44	-3,59	8,74	-10,4	-5,2
1,34	+2,4	1,80	5,76	-3,22	-4,39	8,74	-2,4	+2,0
1,55	0	2,40	0	0	-5,06	8,74	0	+3,7
$\Sigma 6,14$	49,9	6,79	569,05	-31,55	-	-	-	0

Эта система на плоскости  $ab$  задает выпуклое множество, которое при  $l \geq 2$  будет ограниченным, что следует из того, что векторы  $(l_{i_1}, 1)$  и  $(l_{i_2}, 1)$  неколлинеарны. Исследуя функцию  $F_1(a, b)$  в области  $D$ , можно найти ее минимум [7].

Исследование проводим по следующей схеме.

1. Найдем точку  $A(a_0, b_0)$  минимума  $F_1(a, b)$  на плоскости  $ab$  из системы

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0.$$

2. Проверим, лежит ли точка  $A$  в области  $D$ . Если ее координаты удовлетворяют системе (36), то прямая  $x = a_0 y + b_0$  будет искомой.

3. Если точка  $A \in D$ , то минимум функции  $F_1(a, b)$  достигается на границе области  $D$ . Исследуя функцию  $F_1(a, b)$  на всех отрезках прямых, ограничивающих эту область, найдем точку минимума.

Для нахождения минимума функции  $F_1(a, b)$  на отрезке прямой  $a = \delta b + \gamma$ , ограниченной точками  $A_i$  и  $A_j$ , найдем вначале  $\min F_1(a, b)$  на всей прямой. Для этого решим уравнение

$$\frac{\partial S}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial b} + \frac{\partial S}{\partial b} = 0.$$

Пусть в точке  $B$ , удовлетворяющей этому уравнению, функция  $F_1(a, b)$  принимает наименьшее значение на прямой  $a = \delta b - \gamma$ . Если точка  $B$  попадает на отрезок  $A_i A_j$ , то она и будет искомой на участке

границы  $A_i A_j$ . Если точка не лежит на участке  $A_i A_j$ , то наименьшее значение на нем будет достигаться в точке  $A_i$  или  $A_j$ . Сравнив все значения  $F_1$  в этих точках, можно выбрать наименьшее.

Поясним приведенный алгоритм на примере. Используем исходные величины, заданные в табл. 6. Схема решения будет следующей.

С учетом формул (37) графически построим область ограничений. Затем будем исследовать на минимум целевую функцию  $F_1(a, b)$  на границах этой области. Параметры  $a$  и  $b$ , дающие наименьший из минимумов, будут оптимальными параметрами искомой прямой. Затем найдем интересующие нас отклонения  $v_i$ .

Система ограничений назначена так:

$$-5 \leq v_1 \leq 7,$$

$$0 \leq v_4 \leq 2,$$

$$-4 \leq v_8 \leq 9,$$

т.е. надежнейшая ось может располагаться вправо от точки не более чем на 5 мм, и влево, не более чем на 7 мм; на четвертой опоре — только влево от точки  $L_4$ , но не более чем на 2 мм; на 8-й опоре — вправо от точки  $L_8$  не более чем на 4 мм, и влево не более чем на 9 мм.

Ограничения с учетом исходных данных табл. 6 примут вид

$$-5 \leq b \leq 7,$$

$$-5,6 \leq 0,63a + b \leq 7,6, \tag{38}$$

$$-4 \leq 1,55a + b \leq 9.$$

Область ограничений, построенная по ограничительным линиям

$$b = -5,$$

$$b = 7,$$

$$0,63a + b = 5,6,$$

$$0,63a + b = 7,6, \tag{39}$$

$$1,55a + b = -4,$$

$$1,55a + b = 9,$$

показана на рис. 48 (заштрихована).

Построение области ограничений делается так. Строят, например, линию  $b = -5$  и показывают направление действия ограничения, для нашей линии это будет направление от линии  $b = -5$  к оси координат  $a$ , так

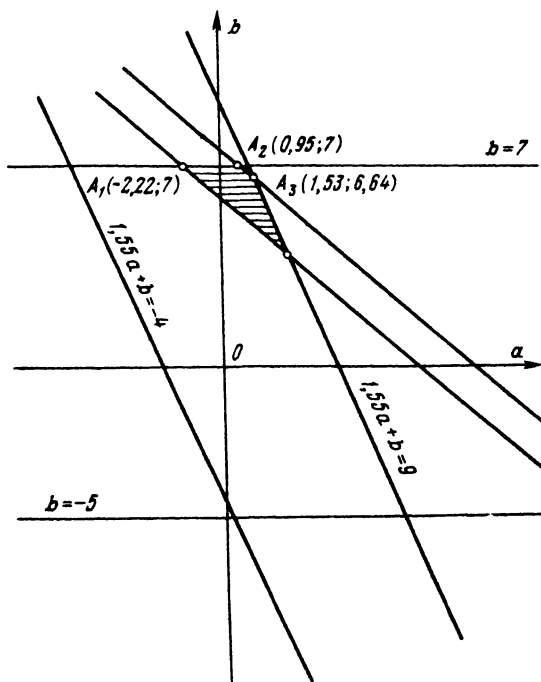


Рис. 48. Область ограничений  $D$

как из формул (37)  $b \geq -5$ . Для линии  $1,55a + b = 9$  направление ограничения будет влево от этой линии (влево от направления  $A_4 - A_3$ ) так как, придав, например,  $a = 1, b = 1$ , получим удовлетворение требования (38), поскольку  $1,55 \times 1 - 1 \leq 9$ . Общая часть ограничительных областей всех линий (фигура  $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) и будет областью ограничений. Отметим, что решение поставленной задачи возможно лишь при наличии такой общей области ограничений, при этом часть ограничительных линий может быть вне области ограничений (в нашем примере это линии  $b = -5$  и  $1,55a + b = -4$ ).

После построения области ограничений находим координаты ее вершин  $A_1, A_2, A_3$  и  $A_4$  путем совместного решения уравнений (39). В результате решения этой системы имеем  $A_1(-2,22; 7); A_2(0,95; 7); A_3(1,53; 6,64); A_4(3,7; 3,42)$ .

В примере, приведенном выше, минимум целевой функции  $F_1(a, b)$  находится в точке с координатами  $(-3,27; 8,74)$ , т.е. лежит вне области ограничений  $D$  (см. рис. 48). Поэтому необходимо исследовать целевую функцию на границах области  $D$ , т.е. на участках  $A_1A_2, A_2A_3, A_3A_4, A_4A_1$ . Начнем исследование на первой границе ограничительной области —

на участке  $A_1A_2$ . Выразим целевую функцию  $F_1(a, b)$  через  $a$ , подставляя в нее одно из неизвестных, а именно  $b = 7$ , имеем

$$F_1 = 6,79 a^2 + 22,86 a + 262,45.$$

Исследуя функцию  $F_1$  на экстремум, найдем, что  $a = -1,68$ . В то же время для рассматриваемого участка  $-2,22 \leq a \leq 0,95$ . Следовательно, наша целевая функция имеет минимум внутри указанного интервала в точке с координатами  $(-1,68; 7)$ , а ее значение будет  $F_1(-1,68; 7) = 243$ .

Далее для участка  $A_2A_3$  из уравнения  $0,63 a + b - 7,6 = 0$  найдем  $b = 7,6 - 0,63 a$  и подставим его в формулу (36). Затем найдем экстремум полученного выражения, который будет при  $a = -3,7$ . Величина  $b$  соответственно будет  $b = 9,93$ . Из графика видно, что точка с координатами  $(-3,7; 9,93)$  лежит вне отрезка  $A_2A_3$  — на его продолжении. Поэтому ищем значения целевой функции в точках  $A_2(1,95; 7)$  и  $A_3(1,52; 6,64)$ , которые будут  $F_1(0,95; 7) = 290$ ,  $F_1(1,52; 6,64) = 303$ .

Переходим к участку  $A_3A_4$ . Можем записать  $b = 9 - 1,55 a$  и, подставив его в формулу (36), найдем экстремум полученного выражения, который будет в точке  $(1,51; 6,66)$ , т.е. практически совпадает с координатами точки  $A_3(1,53; 6,64)$ . Функция  $F_1(1,51; 6,66) \approx F_1(1,53; 6,64) = 303$ .

Для участка  $A_4A_1$  имеем  $b = 5,6 - 0,63 a$ . Подставляя это выражение в формулу (36), исследуя полученную формулу на экстремум, найдем, что он будет в точке  $(-2,82; 7,38)$ , т.е. вне отрезка  $A_4A_1$ . Целевая функция в точках  $A_4(3,7; 3,42)$  и  $A_1(-2,22; 7)$  имеет значение  $F_1(3,7; 3,42) = 335$  и  $F_1(-2,22; 7) = 245$ .

Таким образом, исследование целевой функции (36) на границах области  $D$  показало, что она имеет минимум в точке с координатами  $(-1,68; 7)$ . Искомое уравнение надежнейшей линии будет  $x_i = -1,68$ ,  $y_i = 7$ . С учетом данных табл. 6 имеем  $v_1 = +7,0$ ,  $v_2 = -3,3$ ,  $v_3 = -11,3$ ,  $v_4 = +0,3$ ,  $v_5 = +1,6$ ,  $v_6 = -5,2$ ,  $v_7 = +2,3$ ,  $v_8 = +4,4$  (отклонения  $v_i$  даны в мм). Отметим, что при найденных параметрах надежнейшей прямой целевая функция  $F_1(-1,68; 7) = 243$ , как и следовало ожидать, несколько больше, чем целевая функция при отсутствии ограничений  $F_1(-3,27; 8,74) = 228$ . Рассмотренный графоаналитический способ дает возможность без привлечения сложной вычислительной техники решить задачу нахождения минимального значения целевой функции, даже при наложении дополнительных условий на положение надежнейшей оси агрегата.

Задача нахождения надежнейшей оси агрегата существенно упрощается, если заранее ставиться условие прохождения искомой прямой через точку с заданными координатами. Так, например, при различного рода ремонтных работ на вращающихся печах роликоопоры в районе вен-

повой шестерни стремятся не смещать для сохранения установившейся приработки зубьев венцовой и подвенцовой шестерни.

Поэтому можем записать для точки  $M_j(x_M, y_M)$ , т.е. для точки на надежнейшей оси,  $x_M = x_j^0 + v_M$ . Здесь  $x_j^0$  — абсцисса точки  $L_j$  в выбранной системе координат (см. рис. 47). Если  $v_M = 0$ , то надежнейшая ось должна пройти через точку  $L_j$ ; если  $v_M = c$ , то надежнейшая ось должна быть смещена относительно точки  $L_j$  на вперед заданную величину  $c$ . Выразим из искомого уравнения прямой  $x_i = a y_i + b$  значение  $b$ . Имеем для точки  $M_j$   $b = x_M - a y_M$ . Подставив эту величину в (35), после несложных преобразований найдем

$$F_1(a, b) = (a_1 - a_2 y_M + a_3 y_M^2) a^2 - (a_2 x_M - 2a_3 x_M y_M + a_4 + a_5 y_M) a + a_3 x_M^2 + a_5 x_M + a_6.$$

Экстремум записанной формулы будет при

$$a = - \frac{a_2 x_M - 2a_3 x_M y_M - a_5 y_M}{2(a_1 - a_2 y_M + a_3 y_M^2)}.$$

По этой формуле найдем  $a$ , а затем и  $b = x_M - a y_M$ . Покажем решение задачи на примере данных табл. 6 с учетом обозначений формул (35) и условия  $v_4 = +2$  мм.

Имеем  $x_4 = +5,6 + 2 = +7,6$  мм.

$$a = - \frac{12,28 \cdot 7,6 - 2,8 \cdot 7,6 \cdot 0,63 - 63,1 + 99,8 \cdot 0,63}{2 \cdot 6,79 - 12,28 \cdot 0,63 + 8(0,63)^2} = -3,72.$$

$$b = x_4 - a y_4 = 7,6 + 3,72 \cdot 0,63 = +9,94 \text{ мм.}$$

Искомая прямая, таким образом, имеет вид  $x_i = -3,72 y_i + 9,94$ . Подсчитанные по формуле  $v_i = -3,72 y_i + 9,94 - x_i^0$  отклонения отдельных точек от надежнейшей оси будут  $v_1 = +9,94$ ;  $v_2 = -0,78$ ;  $v_3 = -9,30$ ;  $v_4 = +2,00$ ;  $v_5 = +2,74$ ;  $v_6 = -4,55$ ;  $v_7 = +2,56$ ;  $v_8 = +4,17$  (значения  $v_i$  приведены в мм). Заметим, что  $F_1(-3,72; 9,94) = 242$ , т.е. близко подходит к минимуму  $F_1(a, b)$  для случая определения надежнейшей оси с дополнительными ограничениями.

Выбор того или иного метода нахождения надежнейшей оси агрегата будет определен конкретными условиями, а решение задачи может быть выполнено рассмотренными выше графоаналитическими способами без привлечения стационарных ЭВМ.

## Определение оптимального положения оси агрегата

Оптимальным положением оси объекта следует считать линию, относительно которой сумма модулей уклонений отдельных точек будет минимальной (33). Представленное требование справедливо для всех видов инженерных сооружений и приобретает особое значение для промышленных агрегатов, когда рихтовки проводятся смещением опорных элементов. Условие (33) обеспечивает меньшие сдвигения по сравнению с любым другим, например, с условием (32), наиболее часто применяемым геодезистами для определения надежнейшей оси сооружения или агрегата.

Применение решения (33) в геодезической практике сдерживается пока из-за трудности вычислений. Так, в работе [3] рассматривалось уже определение оптимального положения осей подкрановых путей минимизацией целевой функции  $F_2$ . Однако способ решения введением дополнительных неизвестных  $\eta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) требует сложной вычислительной техники. Для производственных же условий целесообразно разрабатывать способы, обеспечивающие решения без стационарных ЭВМ.

Поэтому ниже предлагается графоаналитический способ определения минимума суммы модулей уклонений, причем решение находится в области  $D$ , заданной в соответствии с видом целевой функции. В решении используется тот факт, что целевая функция  $F_2$  является выпуклой функцией, а множество, в котором ищется ее наименьшее значение, — выпуклым множеством. Поэтому для исследования функции применимы методы линейного и выпуклого программирования [7].

В отмеченных выше задачах требуется в основном найти два параметра, определяющих оптимальное положение оси объекта.

В данном случае целевая функция также зависит от двух аргументов

$$F_2(x, y) = \sum_{i=1}^n |a_i x + b_i y + c_i|.$$

Исследование на минимум функции  $F_2(x, y)$  опирается на известный графический способ решения задачи линейного программирования с двумя свободными неизвестными [7], суть которого состоит в следующем.

Пусть требуется найти наименьшее значение функции  $z(x, y) = ax + by + c$  в выпуклой ограниченной области  $D$ .

По функции  $z(x, y)$  строится вектор  $\text{grad } z$ , имеющий координаты  $(a, b)$ . Данный вектор направлен в сторону увеличений значений функции  $z$ . На прямых, перпендикулярных к вектору  $\text{grad } z$ , называемых линиями уровня, функция  $z(x, y)$  принимает постоянные значения. Поэтому, двигаясь в направлении, противоположном вектору  $\text{grad } z$ , находим последнюю линию уровня, пересекающую область  $D$ . Точки пересе-

чения этой линии уровня с областью  $D$  будут точками минимума функции  $z(x, y)$ .

Перейдем теперь к описанию метода нахождения минимума функции  $F_2(x, y)$  на всей плоскости  $x, y$ . Прямые  $a_i x + b_i y + c_i = 0$  разбивают плоскость  $xu$  на выпуклые области  $D_j$ , в каждой из которых функция  $F(x, y)$  линейна. Поэтому наименьшее значение функции  $F(x, y)$  в области  $D_j$  может быть найдено описанным графическим способом решения задачи линейного программирования. Заметим, что в каждой области  $D_j$  вектор-градиент строится к своей линейной функции. Найдя точку минимума в области  $D_j$ , переходим к области, граничной с ней по найденной точке. Как следует из выпуклости функции  $F(x, y)$ , процесс заканчивается, когда одна из найденных точек является точкой минимума для всех граничащих с ней областей. Это позволяет избежать необходимости исследования функции во всех областях.

Покажем решение задачи на примере данных табл. 6.

Данные таблицы позволяют записать целевую функцию  $F_2$  в виде

$$F_2 = |v| = |x_i - x_i^0| = |a y_i + b - x_i^0| = |b| + |0,22 a + b - 9,9| + |0,44 a + b - 17,6| + |0,63 a + b - 5,6| + |0,86 a + b - 4,0| + |1,1 a + b - 10,4| + |1,34 a + b - 2,4| + |1,55 a + b|,$$

где  $a$  и  $b$  — параметры искомой прямой — оптимальной оси агрегата.

На рис. 49 прямые  $a y_i + b - x_i^0 = 0$  разбивают плоскость на ряд выпуклых областей  $D_j$ . Начнем исследование с области  $D_1$ . Найдём для нее выражение  $F_2$ , для чего в формуле (40) нужно выяснить знак каждой составляющей. Для первой составляющей  $|b|$  нужно взять знак плюс, так как при перемещении ее параллельно самой себе от линии  $b = 0$  в сторону области  $D_1$  значение  $F_2$  увеличивается. Переходим ко второй составляющей  $|0,22 a + b - 9,9|$ . Полагая  $a = b = 0$ , видим, что  $0,22 \cdot 0 - 9,9 < 0$ , т.е. при перемещении линии в сторону  $D_1$  значение составляющей уменьшается. Поэтому в выражении  $F_2$  она будет иметь знак минус. Аналогичная ситуация возникает и для третьей составляющей. Для четвертой составляющей  $|0,63 a + b - 5,6|$  полагая, например  $a = 0$ ;  $b = 10$ , видим, что  $10 - 5,6 > 0$ , т.е. при перемещении ее в сторону области  $D_1$  значение составляющей увеличивается и в  $F_2$ , она получает знак плюс. Рассуждая таким образом и дальше, запишем

$$F_2 = b - 0,22 a - b + 9,9 - 0,44 a - b + 17,6 + 0,63 a + b - 5,6 + 0,86 a - b - 4,0 - 1,1 a - b + 10,4 + 1,34 a + b - 2,4 + 1,55 a + b = 2,62 a + 2b + 25,9.$$

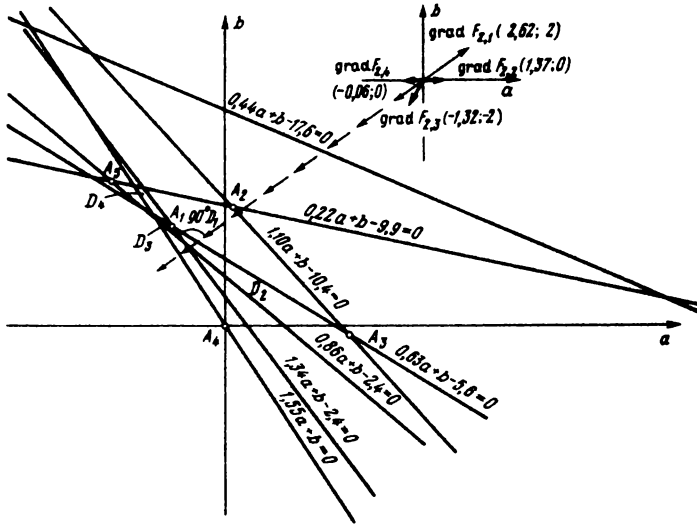


Рис. 49. Выпуклые области  $D$

Вектор  $\text{grad } F_{2,1}$  имеет координаты  $(2,62; 2)$ . Здесь индекс 2,1 обозначает, что для функции  $F_2$  найден вектор градиент в области 1. Вектор  $\text{grad } F_{2,1}$  построен на рис. 49. Двигаясь в противоположном направлении (на рис. 49 – пунктирная линия) и перемещая перпендикулярно к этому направлению линейку, найдем, что последняя линия уровня пересекает область  $D_1$  в точке  $A_1(-4,54; 8,44)$ . Действуя аналогично для области  $D_2, D_3$  и  $D_4$  убеждаемся, что точка  $A_1$  – точка минимума для всех граничащих с ней областей. Исследование закончено. Искомая оптимальная прямая, таким образом, будет иметь вид  $x_i = 4,54 j + 8,44$ . Величины  $v_i$ , подсчитанные по формуле (34), будут такими:  $v_1 = +8,44, v_2 = -2,45, v_3 = -11,44, v_4 = 0, v_5 = +0,56, v_6 = -6,92, v_7 = 0, v_8 = +1,45$ . Значения  $v_i$  даны в мм. Сумма  $|v|$  равна 30,96 мм. Для сравнения приведем  $F_2$  в некоторых других точках плоскости  $ab$ . В точке  $A_2(0,57; 9,77)$   $F_2 = 46,9$ , в точке  $A_3(10,21; -0,89)$   $F_2 = 52,8$ , в точке  $A_4(0; 0)$   $F_2 = 49,9$ , в точке  $A_5(-9,22; 11,93)$   $F_2 = 32,9$  и т.д. Отметим, что сумма  $|v|$  из последней графы табл. 6 равна 34,9 мм, т.е. величины рихтовок, найденные при условии (33), будут меньше, чем найденные при условии (32).

Наряду с задачей нахождения минимума функции  $F(x, y)$  на всей плоскости возникает задача нахождения наименьшего значения функции  $F(x, y)$  в некоторой выпуклой области, заданной системой линейных неравенств. Для решения этой задачи применим графический способ,

отличие которого от ранее указанного состоит в том, что необходимо исследовать функцию  $F(x, y)$  на границе области.

Покажем решение задачи по данным табл. 6 [(целевая функция  $F_2$  имеет вид (40)], однако систему ограничений запишем так

$$9 \leq v_1 \leq 10,$$

$$0 \leq v_4 \leq 2,$$

$$-4 \leq v_8 \leq 9.$$

В соответствии с данными табл. 6 система ограничений будет выглядеть так

$$b = 9,$$

$$b = 10,$$

$$0,63a + b = 5,6,$$

$$0,63a + b = 7,6,$$

$$1,55a + b = -4,$$

$$1,55a + b = 9.$$

Построим область ограничений  $D$  (рис. 50). Эта область разделяется прямыми  $a_i a + b + c_i = 0$  только на три области  $D_1, D_2$  и  $D_3$ , так как она

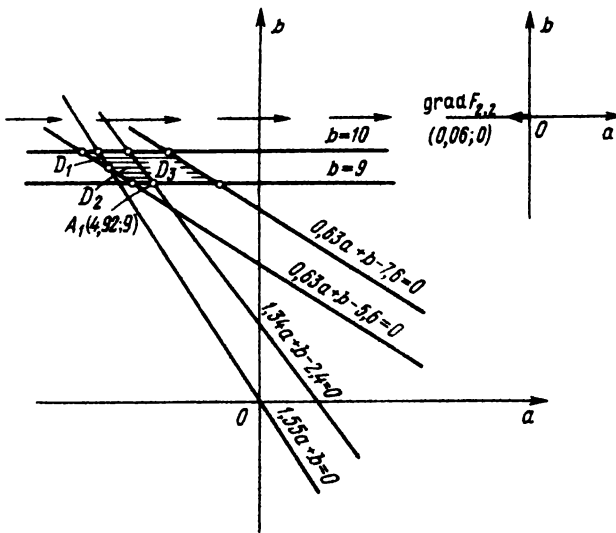


Рис. 50. Разделение области ограничений  $D$  линиями функции  $F_2$

пересекается лишь линиями  $1,34a + b - 2,4 = 0$  и  $1,55a + b = 0$  (на рис. 50 показаны не все линии, а лишь те, которые образуют область ограниченный и пересекают ее). Задача исследования целевой функции  $F_2$  облегчается, ибо ее минимум будет на одной из границ области  $D_2$ , граничащей с областями  $D_1$  и  $D_3$ . Найдем вектор  $\text{grad } F_{2,2}$ . Для этого определим знак каждой составляющей в формуле (40) по описанному выше правилу. В соответствии с взаимным расположением линий  $a_i a + b + c_i = 0$  и области  $D_2$  можем записать

$$F_{2,2} = b - 0,22a - b + 9,9 - 0,44a - b + 17,6 + 0,63a + b - \\ - 5,6 + 0,86a + b - 4 - 1,1a - b + 10,4 - 1,34a - b + 2,4 + \\ + 1,55a + b = -0,06a + 0 + 30,70.$$

Вектор  $\text{grad } F_{2,2}$  имеет координаты  $(-0,06; 0)$ . Двигаясь в противоположном вектору  $\text{grad } F_{2,2}$  направлении (это направление показано на рис. 50 пунктирной линией), обнаруживаем, что последняя линия уровня (линия, перпендикулярная к вектору  $\text{grad } F_{2,2}$ ) пересекает область  $D_2$  в точке  $A_1(-4,92; 9)$ . Оптимальная ось агрегата, таким образом, имеет уравнение  $x_i = -4,92 y_i + 9$ . Подсчитанные по формуле (36) величины  $v_i$  будут такими:  $v_1 = +9,00$ ;  $v_2 = -1,98$ ;  $v_3 = -10,76$ ;  $v_4 = +0,30$ ;  $v_5 = +0,77$ ;  $v_6 = -6,81$ ;  $v_7 = +0,01$ ;  $v_8 = +1,37$  ( $v_i$  выражены в мм). Сумма  $F_2 = 31,00$  незначительно превышает в нашем конкретном примере  $F_2$  без ограничений. Однако при ином виде  $F_2$  и системе ограничений эта разница может быть существеннее.

Рассмотрим теперь частный случай, когда отыскиваемая оптимальная ось агрегата должна пройти через точку с заданными координатами  $M_j(x_M, y_M)$ . Тогда функцию  $F_2$  можно записать так

$$F_2 = \sum_{i=1}^n |a y_i + b - x_i^0| = \sum_{i=1}^n |a y_i + x_M - a y_M - x_i^0| = \\ = \sum_{i=1}^n |a (y_i - y_M) + (x_M - x_i^0)|.$$

Затем функция  $F_2$  исследуется по методике, описанной для случая отыскания оптимальной прямой при отсутствии ограничений. Покажем ход исследований на примере табл. 6, приняв  $v_4 = +2$  мм. Тогда  $x_4 + x_4^0 + v_4 = +7,6$  мм, а функция  $F_2$  запишется так:

$$F_2 = |-0,63a + 7,6| + |-0,41a - 2,3| + |-0,19a - 10,0| + \\ + |0a + 2,0| + |0,23a + 3,6| + |0,47a - 2,8| + |0,71a + 5,2| + \\ + |0,92a + 7,6|.$$

Линии  $a(y_i - y_4) + (x_4 - x_i^0) = 0$  разбивают плоскость  $ab$  на семь областей ( $D_7$ , образованная линиями  $0 \cdot a + 2 = 0$  и  $-0,19a - 10 = 0$  не показана, так как она заведомо не будет участвовать в исследовании, рис. 51).

Начнем исследование с области  $D_4$ . Знаки составляющих функции  $F_2$  определим по описанному выше правилу. Имеем

$$F_{2,4} = -0,63a + 7,6 - 0,41a - 2,3 - 0,19a + 10 + 2,0 + 0,23a + 3,6 - 0,47a + 2,8 + 0,71a + 5,2 + 0,92a + 7,6 = 0,16a + 36,5.$$

Вектор  $\text{grad } F_{2,4}$  имеет координаты  $(0,16; 0)$ . Двигаясь в противоположном ему направлении (см. рис. 51), видим, что в области  $D_4$  последняя линия уровня пересекает линию  $0,71a + 5,2 = 0$ . Поэтому исследуем  $F_2$  в области  $D_3$ . Можем записать

$$F_{2,3} = -0,63a + 7,6 - 0,41a - 2,3 + 0,19a + 10 + 2,0 + 0,23a + 3,6 - 0,47a + 2,8 - 0,71a - 5,2 + 0,92a + 7,6 = -1,11a + 26,1.$$

Вектор  $\text{grad } F_{2,3}$  имеет координаты  $(-1,11; 0)$ . При движении, в противоположном направлении этого вектора, последняя линия уровня пересе-

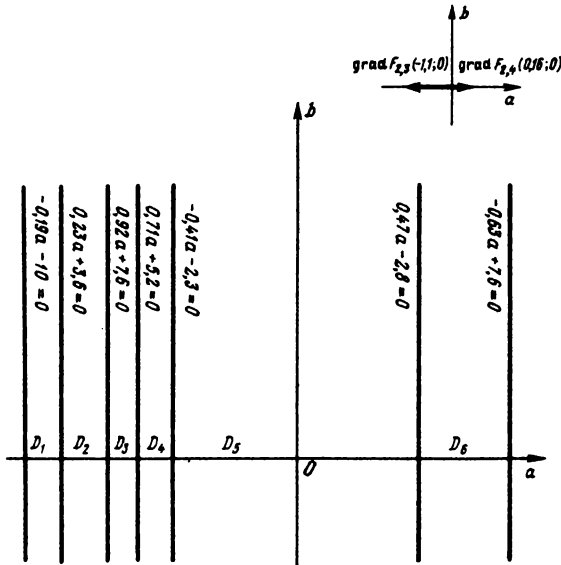


Рис. 51. Построение областей  $D_j$  при прохождении оптимальной оси через заданную точку

кает область  $D_3$  по линии  $0,71a + 5,2 = 0$ . Таким образом, линия  $0,71a + 5,2 = 0$  будет линией, где функция  $F_2$  имеет минимальное значение в двух соседних областях  $D_3$  и  $D_4$ . Следовательно, решение найдено,  $a = -7,32$ .

Отклонения (в мм) от оптимальной оси будут  $v_1 = +12,21$ ;  $v_2 = +0,70$ ;  $v_3 = -8,61$ ;  $v_4 = +2,00$ ;  $v_5 = +1,92$ ;  $v_6 = -6,25$ ;  $v_7 = 0$ ;  $v_8 = +0,86$ , причем  $F_2 = 32,54$ . Эта величина, как и следовало ожидать, больше, чем соответствующее значение  $F_2$  без ограничений (30,96), но тем не менее меньше, чем  $F_1$  без ограничений (34,9).

Рассмотренные в этом разделе графоаналитические способы позволяют найти оптимальную ось агрегата как без ограничений на ее положение, так и при наличии таких ограничений. Решение задачи выполняется без привлечений стационарной вычислительной техники, что делает эти способы доступными для широкого круга потребителей.

*Определение оси, оптимальной относительно числа сдвижек*

При относительно небольшом числе опорных узлов агрегата решение задачи целесообразно выполнять графическим путем. Для этого в выбранном масштабе вычерчивают искривленную ось агрегата (рис. 52). В том же вертикальном масштабе, в котором показана искривленная ось агрегата, около каждого опорного сечения показывают назначенные ограничения на сдвижки  $l$  и поле допуска  $2$  на искривление. Искомую ось находят при условиях: 1) ось не выходит за поле ограничений ни в одной из точек; 2) в точках, которые не будут смещаться, ось проходит через поле допуска; 3) в точках, где ось выходит за поле допуска, назначаются сдвижки при условии 1. Сдвижки в зависимости от конкретных условий могут проводиться либо перемещением точки на найденную оптимальную ось,

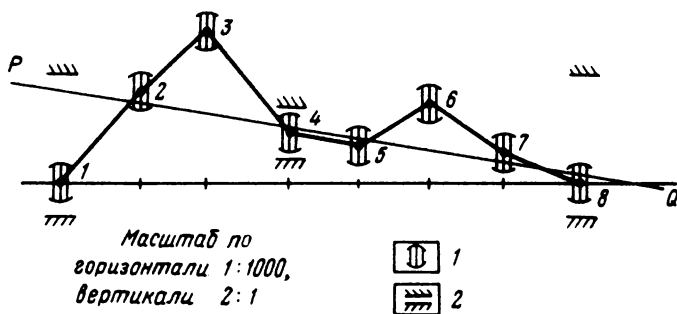


Рис. 52. Схема искривлений оси агрегата и определение положения оси, оптимальной относительно числа сдвижек:

1 – допускаемое отклонение; 2 – ограничения

либо пока они не попадут в поле допуска, расположенного определенным образом относительно оптимальной оси (в общем случае – симметрично, если верхнее и нижнее допускаемые отклонения равны по абсолютной величине).

Рассмотрим решение поставленной задачи на примерах данных табл. 6 и ограничений, указанных в разделе "Определение оптимального положения оси агрегата".

Искомая ось  $PQ$  (см. рис. 52) найдена так, что без смещения остаются точки 2, 4, 5, 7 и 8, а подлежат смещению лишь точки 1, 3 и 6. Напомним, что допускаемое искривление оси вращающейся печи  $\pm 3$  мм. Снятые с графика отклонения отдельных точек от оптимальной оси будут (в мм):  $v_1 = +9$ ;  $v_2 = -2$ ;  $v_3 = -11$ ;  $v_4 = +1$ ;  $v_5 = +1$ ;  $v_6 = -7$ ;  $v_7 = -1$ ;  $v_8 = +1$ . Отметим, что  $F_2 = |v| = 33$  и близко к  $F_2$ , найденным ранее. Таким образом, определение оптимальной (относительно числа сдвижек) оси при небольшом числе опорных узлов агрегата можно выполнять с достаточной надежностью и удобством графическим способом. При значительном числе точек следует применять специальные способы математического программирования [7].

## § 22. Агрегаты и технологические линии с двумя осями

На многих промышленных предприятиях действует технологическое и вспомогательное оборудование с двумя осями (станки с программным управлением, карусельные станки, подкрановые пути и т.п.). В процессе эксплуатации возникает необходимость по результатам геодезического контроля выяснить искривленность направляющих и выпрямить их в вертикальном и горизонтальном направлениях. В вертикальной плоскости определение сдвижек несложно и выполняют его по результатам нивелирования направляющих с необходимой точностью. Значительно более сложную задачу представляет собой определение надежнейшего и оптимального положения осей направляющих в плане.

### *Нахождение надежнейших осей двух направляющих*

По результатам съемки в плане направляющих для составления исполнительных чертежей наиболее целесообразно определить их положение при условии (32), что применительно к данному случаю можно сформулировать так: оси направляющих параллельны; расстояние между ними соответствует проектному значению  $L_0$ ; сумма квадратов уклонов осевых точек от надежнейшего положения минимальна. В зависимости от программы наблюдений могут возникнуть две частные задачи: 1) уравнивание результатов наблюдений; 2) определение по исполнительным координатам осевых точек надежнейшего положения осей направляющих. Именно на этом этапе существует целый ряд способов, предло-

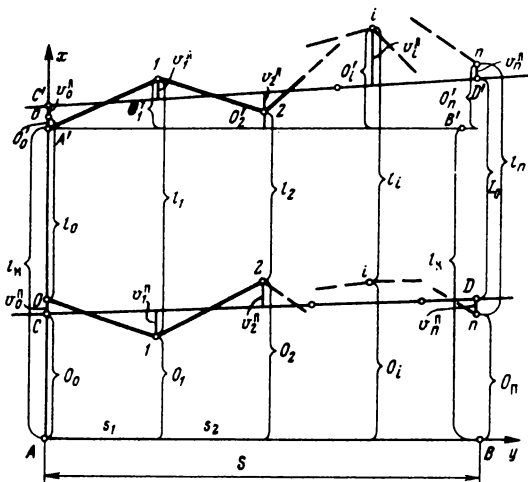


Рис. 53. Определение надежнейшего положения осей двух направляющих

женных как советскими, так и зарубежными авторами, но все они приводят к одним и тем же результатам, ибо используется один и тот же принцип [см. формулу (32)].

Значительно меньше уделяется внимание первой части задачи. Рассмотрим ее.  $A', B, A'$  и  $B'$  (рис. 53) — точки вспомогательных створов;  $O_i$  и  $O'_i$  — расстояния от правого  $AB$  и соответственно левого  $A'B'$  створов до осевых точек правой и левой ниток направляющих. Эти точки обозначим через  $0, 1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$ . Расстояния между ними равны  $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$ . Длина створов  $S = \sum_{i=1}^n s_i$ . Расстояния между точками  $A$  и  $A'$  и  $B$  и  $B'$  будут соответственно  $l_n$  и  $l_k$ , а расстояние между нитями на всех рядах —  $l_0, l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ .

Для определения надежнейшего положения осей направляющих в разных способах съемки измеряются различные элементы:

- 1)  $O_i, O'_i, l_i, l_n, l_k$ ; 2)  $O_i, O'_i, l_i$ ;
- 3)  $O_i, O'_i, l_0$  и  $l_n$ ; 4)  $O_i$  (или  $O'_i$  и  $l_i$ ).

Наличие избыточных измерений в 1-м и 2-м случаях позволяет не только определить надежнейшее положение осей направляющих, но и выполнить уравнивание результатов измерений.

Такое уравнение можно выполнять следующим образом: при измерении  $O_i, O'_i, l_i, l_n$  и  $l_k$  или  $O_i, O'_i$  и  $l_i$  должно выполняться равенство

$$l_i - l_i^B = 0, \quad (41)$$

где

$$l_i^B = l_H^B - O_i + O_i' + \frac{l_K - l_H}{s} \sum_1^i s,$$

причем  $l_H^B$  и  $l_K^B$  — "надежнейшее" расстояние между точками  $A$  и  $A'$ ,  $B$  и  $B'$ .

Так как  $O_i$ ,  $O_i'$  и  $l_i$  измерены с ошибками, то выражение (41) не равно нулю, а представляет собой некоторую величину  $v_i$ . Обозначив

$$k_i = \frac{\sum_1^n s}{s} \text{ выражение (41) запишем в виде}$$

$$v_i = - (1 - k_i) l_H^B - k_i l_K^B + Q_i, \quad (42)$$

где

$$Q_i = O_i - O_i' + l_i.$$

Уравнений (42) по числу рядов контролируемых точек будет  $(n - 1)$ . Решая их для случая равноточных измерений, найдем

$$l_H^B = \frac{[k^2] [Q] - [k] [a Q]}{N},$$

$$l_K^B = \frac{([k^2] - [k] [Q]) - \{ [k] - (n + 1) \} [k Q]}{N},$$

где

$$N = (n + 1) [k^2] - [k]^2.$$

При  $s_1 = s_2 = \dots = s_i = s_n = s$ ,  $s = sn$ ,  $k_i = i/n$  можем записать

$$l_H^B = 2 \frac{(2n + 1) - 3n [k Q]}{N'}, \quad l_K^B = 2 \frac{3n [k' Q] - (n - 1) [Q]}{N'},$$

$$N' = (n + 1) (n + 2).$$

По выражению (42) можно подсчитать  $v_i$  и проконтролировать вычисления по формулам

$$[-(1-k)v] = [-k'v] = [v] = 0.$$

Веса  $P$  величин  $l_{\text{H}}^{\text{B}}$  и  $l_{\text{K}}^{\text{B}}$  равны соответственно

$$\frac{N'}{[(1-k)^2]} \text{ и } \frac{N'}{[(k')^2]}.$$

Учитывая, что  $[(1-k)^2] = [(k)^2]$ , приняв вес одного измерения равным 1 и выполнив соответствующие преобразования, получим

$$P = (n+2)/4.$$

Если измерить  $l_{\text{H}}$  и  $l_{\text{K}}$ , то, после нахождения средневесового из  $l_{\text{H}}$  и  $l_{\text{H}}^{\text{B}}$ ,  $l_{\text{K}}$  и  $l_{\text{K}}^{\text{B}}$  и подстановки их в формулу (42), получим

$$v'_i = v_i - (1-k_i) \frac{l_{\text{H}} - l_{\text{H}}^{\text{B}}}{1+P} - k_i \frac{l_{\text{H}} - l_{\text{K}}^{\text{B}}}{1+P}.$$

По вычисленным поправкам подсчитывают уравненные значения  $O_i^{\text{B}}$ ,  $(O'_i)^{\text{B}}$  и  $l_i^{\text{B}}$ :

$$O_i^{\text{B}} = O_i - \frac{1}{3}v'_i, (O'_i)^{\text{B}} = O'_i - \frac{1}{3}v'_i, l_i^{\text{B}} = l_i - \frac{1}{3}v'_i. \quad (43)$$

Если  $l_{\text{H}}$  и  $l_{\text{K}}$  — не измерялись, то подсчет  $v_i$  и уравненных значений  $O_i^{\text{B}}$ ,  $(O'_i)^{\text{B}}$  и  $l_i^{\text{B}}$  следует выполнять по формулам (42) и (43), причем в формуле (43) вместо  $v'_i$  нужно подставить  $v_i$ .

Теперь рассмотрим один из возможных путей определения надежнейшего положения осей  $CD$  и  $C'D'$  (см. рис. 53).

Совместим начало координат с точкой  $A$ , а ось  $y$  — с линией  $AB$ . Уравнение линии  $CD$  можно записать в виде известного уравнения прямой, проходящей через две точки с заданными координатами

$$\frac{x_i^{\text{II}} - x_C}{x_D - x_C} = \frac{y_i - y_C}{y_D - y_C},$$

где  $y_i$ ,  $x_i^{\text{II}}$  — текущие координаты точек правой нитки;  $y_C$ ,  $x_C$ ,  $y_D$ ,  $x_D$  — координаты точек  $C$  и  $D$ .

Так как  $y_C = 0$ ,  $y_D = S$ , то после небольших преобразований получим

$$x_i^{\Pi} = a_i (x_D - x_C) + y_C.$$

При контроле створ  $AB$  задается приблизительно параллельно направляющим, поэтому можно записать, что для  $i$ -й точки отклонение

$$v_i^{\Pi} = x_i^{\Pi} - O_i.$$

Отклонения вправо от надежного положения осей  $CD$  и  $C'D'$  будут иметь знак плюс, влево – минус. С учетом записанных формул имеем

$$v_i^{\Pi} = y_C + k_i (y_D - y_C) - O_i. \quad (44)$$

Для левой нитки по аналогии можно записать

$$v_i^{\Pi} = y_C + k_i (y_D - y_C) - (O_i + l_i - L_0). \quad (45)$$

Таких уравнений в соответствии с числом точек будет  $2(n+1)$ .

Обозначим

$$l'_i = O_i, \quad l''_i = O_i + l_i - L_0.$$

Решая системы уравнений (44) и (45), имеем

$$y_C = \frac{[k^2] ([l'] + [l'']) - [k] - ([kl'] + [kl''])}{2N},$$

$$y_D = \frac{([k^2] - [k]) ([l'] + [l'']) - \{ [k] - (n+1) \} ([kl'] + [kl''])}{2N}.$$

При условии равенства расстояний между контролируемыми точками после упрощения получим

$$y_C = \frac{(2n+1) ([l'] + [l'']) - 3n ([k'l'] + [\bar{k}'l''])}{N'}$$

$$y_D = \frac{3n ([k'l'] + [k'l'']) - (n-1) ([l'] + [l''])}{N'}$$

Значения  $v_i^{\Pi}$  и  $v_i^{\Pi}$  находят по формулам (44) и (45). Вычисления контролируют равенством  $[v^{\Pi}] + [v^{\Pi}] = 0$ .

Пример уравнивания результатов измерений  $O_p, O'_i, l_1, l_n$  и  $l_k$  при

контроле подкранового пути дан в табл. 7, а определение надежнейшего положения осей рельсов – в табл. 8.

Для вычисления использованы данные работы [9], причем  $l_n$  и  $l_k$  подсчитаны по формулам

$$l_n = O_0 + l_0 - O'_0, \quad l_k = O_n + l_n - O'_n.$$

Было выполнено также уравнивание без использования  $l_n$  и  $l_k$ . Расхождения в  $v_i^n$  и  $v_i^n$  с соответствующими уклонами в работе [9] не превысили 0,1–0,2 мм.

Если на отклонения отдельных точек от надежнейшей оси накладываются дополнительные ограничения вида (37), то составляется целевая функция [см. формулу (34)]

$$\sum_{i=1}^n (v_i^n)^2 + \sum_{i=1}^n (v_i^n)^2 = 2\alpha_1 a^2 + 2\alpha_2 ab + 2\alpha_3 b^2 + \alpha'_4 a + \alpha'_5 b + \alpha'_6, \quad \text{где } \alpha'_4 = 2\left(\sum_{i=1}^n y_i l'_i + \sum_{i=1}^n y_i l''_i\right);$$

$$\alpha'_5 = -2\left(\sum_{i=1}^n l'_i + \sum_{i=1}^n l''_i\right); \quad \alpha'_6 = \sum_{i=1}^n (l'_i)^2 + \sum_{i=1}^n (l''_i)^2.$$

Система ограничений (37) преобразуется в запишется так

$$\alpha_j - l'_i \leq a y_{ij} + b \leq \beta_j + l'_i, \quad (j = \overline{1, S}),$$

$$\gamma_r + l''_i \leq a y_{ir} + b \leq \tau_r + l''_i \quad (r = \overline{1, T}).$$

Дальнейшее исследование целевой функции в области ограничений  $D$  аналогично описанному в разделе "Нахождение надежнейшей оси агрегата".

#### *Особенности определения оптимального положения осей двух направляющих*

По своей сути эта задача подобна задаче определения оптимального положения оси агрегата, рассмотренной ранее. Отличие заключается в том, что целевая функция имеет вид

$$F_2 = \sum_{i=1}^n |a y_i + b - l'_i| + \sum_{i=1}^n |a y_i + b - l''_i|.$$

**Уравнивание результатов измерений при контроле прямолинейности в плане рельсов подкранового пути**

Номер ряда	$O_i$	$O_i'$	$l_i$	$O_i - O_i'$	$O_i$	$k_i'$	$k_i' O_i$	$1 - k_i'$
0	+16	+21	+22	- 5	+17	0	0	1,00
1	+17	+22	+24	- 5	+19	0,11	+2,1	0,89
2	+25	+22	+12	+ 3	+15	0,22	+3,3	0,78
3	+27	+28	+12	- 1	+11	0,33	+3,6	0,67
4	+32	+33	+13	- 1	+12	0,44	+5,3	0,56
5	+31	+48	+22	-17	+5	0,56	+2,8	0,44
6	+34	+49	+17	-15	+2	0,67	+1,3	0,33
7	+24	+44	+20	-20	0	0,78	0	0,22
8	+23	+46	20	-23	-3	0,89	-2,7	0,11
9	+26	+40	+12	-14	-2	1,00	-2,0	0
	255	353	174	-98	+76	5,00	13,7	5,00

$$l_H^B = +19,5; l_K^B = -4,3; P = 2,8; l_H = +17,0; l_K = -2,0.$$

Примечание. Результаты измерений и вычислений приведены в миллиметрах.

**Определение надежнейшего положения осей подкранового пути**

Номер ряда	$O_i^B l_i'$	$(O_i')^B$	$l_i^B$	$l_i^B L_0$	$l_i''$	$k_i'$
0	+16,6	+21,6	+22,6	-2,4	+14,2	0
1	+16,2	+21,9	+23,1	-1,9	+14,3	0,11
2	+24,6	+21,7	+11,6	-13,4	+11,2	0,22
3	+27,2	+28,1	+12,2	-12,8	+14,4	0,33
4	+30,9	+32,0	+12,0	-13,0	+17,9	0,44
5	+31,4	+47,6	+22,4	-2,6	+28,8	0,56
6	+34,6	+49,5	+17,6	-7,4	+27,2	0,67
7	+24,2	+44,4	+20,4	-4,6	+19,8	0,78
8	+23,6	+46,5	+20,6	-4,4	+19,2	0,89
9	+25,4	+39,5	+11,4	-13,6	+11,8	1,00
	+254,9	+352,8	173,9	-76,1	187,8	5,00

$$x_C = +18,1; x_D = +25,3.$$

Примечание. Результаты измерений и вычислений приведены в миллиметрах.

Таблица 7

$-(1-k_i)^x$ $x l_H^B$	$-k_i l_K^B$	$v_i$	$-(1-k_i')^x$ $x l_H^B - l_H^B$	$-k_i l_{iB}^B$ $-x l_K^B$	$v_i$	$O_i^B$	$(O_i')^B$	$l_i^B$
			$1+P$	$1+P$				
-19,5	0	+2,5	+0,7	0	-1,8	+16,6	+21,6	+22,6
-17,4	+0,5	+2,1	+0,6	-0,1	+2,6	+16,2	+21,9	+23,1
-15,2	+0,9	+0,7	+0,5	-0,1	+1,1	+24,6	+21,7	+11,6
-13,4	+1,4	-0,7	+0,4	-0,2	-0,5	+27,2	+28,1	+12,2
-10,9	+1,9	+3,0	+0,4	-0,3	+3,1	+30,9	+32,0	+12,0
-8,6	+2,4	-1,2	+0,3	-0,3	-1,2	+31,4	+47,6	+22,4
-6,4	+2,9	-1,5	+0,2	-0,4	-1,7	+34,6	+49,5	+17,6
-4,3	+3,4	-0,9	+0,2	-0,5	-1,2	+24,4	+41,4	+20,4
-2,1	+3,8	-1,3	+0,1	-0,5	-1,7	+23,6	+46,5	+20,6
0	+4,3	+2,3	0	-0,6	+1,7	+25,4	+39,5	+11,4
-97,5	21,5	0	+3,4	-3,0	+0,4	254,9	352,8	173,9

Таблица 8

$k_i' l_i'$	$k_i'' l_i''$	$-x_C + l_i'$	$-x_C + l_i''$	$-k_i(x_D - x_C)$	$-v_i^{\Pi}$	$-v_i^{\Pi}$
0	0	-1,5	-3,9	0	-1,5	-3,9
+1,8	+1,6	-1,9	-3,8	-0,7	-2,6	-4,5
+5,4	+2,5	+6,5	-6,9	-1,6	+4,9	-8,5
+9,0	-4,8	+9,1	-3,7	-2,4	+6,7	-6,1
+13,6	+7,9	+12,8	-0,2	-3,2	+9,6	-3,4
+17,6	+16,1	+13,3	+10,7	-4,0	+9,3	+6,7
+23,2	+18,2	+16,5	+9,1	-4,8	+11,7	+4,3
+19,0	+15,4	+6,3	+1,7	-5,6	+0,7	-3,9
+21,0	+17,1	+5,5	+1,1	-6,4	-0,9	-5,3
+25,4	+11,8	+7,3	-6,3	-7,2	+0,1	-13,5
136,0	+95,4	+73,9	-2,2	-35,9	+38,0	-38,1

Прямые  $ay_i + b - l_i'' = 0$  и  $ay_i + b - l_i'' = 0$  разбивают плоскость  $ab$  на ряд областей, в которых  $F_2$  исследуется описанным ранее способом. Если оптимальное положение осей должно быть найдено при ограничениях (37), то строится область ограничений и функция  $F_2$  исследуется на границах этой области.

Наконец, если отыскивается положение осей двух направляющих, оптимальных относительно числа сдвижек, то и в этом случае просматривается полная аналогия с такой же задачей для объекта с одной осью (см. "Определение оси, оптимальной относительно числа сдвижек). Точно так же строится график искривлений обеих ниток направляющих, причем расстояние между ними уменьшается на выбранную величину  $L$ , чтобы вертикальный масштаб графика (см. рис. 52) мог оставаться значительно крупнее горизонтального. Около каждой опорной точки также обозначают ограничения на сдвижки и поля допусков на искривление. К условиям, которым должно удовлетворять положение искомых осей, добавляется требование параллельности их между собой и равенства расстояний между ними заданной величине  $L_0$ . На прозрачной основе, например на кальке, в том же вертикальном масштабе приводят две проектные параллельные прямые. Расстояние между ними должно быть равно  $L_0$ . Этот чертеж накладывают на график искривлений и перемещением его находят такое положение, при котором проектные параллельные прямые проходят через максимальное число полей допусков (см. рис. 52, прямая  $PQ$ ). Величины сдвижек снимают с чертежа графически.

Таким образом, задача нахождения надежнейших и оптимальных осей двух параллельных направляющих аналогична такой же задаче для агрегатов с одной осью. Небольшое отличие имеется лишь в составлении целевой функции и системы ограничений за счет добавления исходных данных второй нитки направляющих. Сказанное можно распространить на агрегаты и технологические линии с несколькими параллельными осями.

## Глава 6

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДКОВ ФУНДАМЕНТОВ РАБОТАЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

#### § 23. Организация измерения осадок

Цель измерения осадок фундаментов оборудования — получение данных об устойчивости их основания и фундаментов. Эти данные позволяют проектировщикам улучшить методику расчета фундаментов, а строителям принимать соответствующие меры по борьбе с возникающими деформациями.

При организации наблюдений за осадками фундаментов оборудования необходимо исходить из того, что они являются частью общего комплекса наблюдений за осадками на предприятии. Поэтому опорная сеть и схемы нивелирования должны строиться с учетом широкого их использования.

Исходя из общепринятых требований к созданию опорной высотной сети, для измерения осадок фундаментов оборудования целесообразно создать сеть, состоящую из кусков глубинных реперов [22]. Можно использовать также железобетонные столбы, сваи и т.п. Тип репера определяется целью выполняемых наблюдений и геологическими и гидрогеологическими условиями промышленной площадки.

Опыт показал [31], что в качестве исходной основы могут быть использованы реперы, заложенные в сооружения, установленные на коренные породах. Нивелирные марки нужно закладывать по всем углам фундамента. Очень удобны плитные марки. В фундаменты вращающихся печей можно закладывать под углом  $45^\circ$  стенные марки открытого типа диаметром 3 см и выступающей частью около 5 см на высоте около 1 м над уровнем пола. Это дает возможность использовать для нивелирования короткие нивелирные рейки.

При эксплуатации промышленных предприятий в течение короткого промежутка времени теряется большой процент осадочных марок. Иногда после первых же лет эксплуатации высотную основу приходится создавать заново. Поэтому ведется постоянный поиск и разработка потайных [22] марок, плоских марок в виде реек, закрепляемых постоянно на сооружении и т.п. При этом обращается особое внимание на простоту изготовления и установки марок при неперменном условии обеспечения ими соответствующей точности наблюдений.

Так, при измерении осадок фундаментов вращающихся печей оправдали себя некоторые новые виды осадочных марок (рис. 54).

Ферромагнитное основание 1 с установочным отверстием ук-

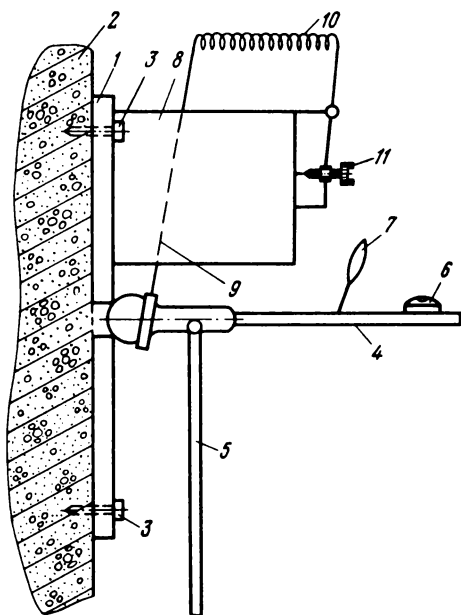


Рис. 54. Схема осадочной марки с узлом крепления (усовершенствованный вариант [1])

репляется неподвижно на сооружении 2 при помощи крепежных элементов 3. В установочное отверстие входит шаровой шарнир штока 4. На штоке шарнирно укреплены реечка со шкалой 5, уровень 6 и зеркало 7. Шаровой шарнир штока при помощи постоянного магнита 8, имеющего шарнирно закрепленный стержень 9, устанавливают в отверстие основания. За один конец стержня крепится пружина 10, а на другом находится винт 11. Такое устройство позволяет, вращая винт и перемещая стержень, менять натяжение пружины, что, в свою очередь, надежно укрепляет шаровой шарнир штока в отверстии марки. Шток 4 приводится в горизонтальное положение при помощи круглого уровня 6. Зеркало 7 облегчает выполнение этой операции, если марки расположены выше глаз реечника. Шарнирное закрепление реечки гарантирует автоматическую установку ее в отвесное положение.

К недостаткам описанной марки следует отнести понижение точности в разнесенных по времени циклах наблюдений вследствие изменения формы установочного отверстия ферромагнитного основания из-за коррозии металла, особенно в местах повышенной влажности и в цехах с агрессивными средами. Поэтому в таких местах устанавливается осадочная марка (рис. 55).

Эта марка содержит выполненное из некоррозирующего материала основание 1 с отверстием, укрепляемое на вертикальную поверхность 2, опору 3 в виде усеченного шара с отверстием, ось которого перпендикулярна к плоской стороне опоры. В шаровой опоре установлена самоустанавливающаяся подвесная рейка 4 и круглый уровень 5. В отверстие опоры помещен стержень 6. Конец стержня со стороны плоской опоры подпружинен пружиной 7, а на другом его конце укреплена вогнутая усеченная с двух сторон шайба 8, диаметр которой несколько больше диаметра отверстия в основании. Место контакта опоры с краем отверстия основания представляет собой шаровой шарнир. Тарельчатую шайбу 8, сжав пружину 7, вставляют в установочное отверстие основания 1. Отпускают пружину и поворачивают опору 3 на небольшой угол, достаточный для того, чтобы установить в нуль-пункт пузырек уровня 5, реечка 4 автоматически располагается отвесно. Величина зазора между штоком 6 и внутренними стенками опоры 3 такова, что позволяет поворачивать опору 3 на небольшой угол для установки ее в горизонтальное положение по уровню 5, а величина зазора между внутренними стенками опоры 3 и шарнирно-подвижной реечки 4 дает возможность ей поворачиваться и расположиться отвесно при горизонтальном положении опоры 3. После установки реечки в отвесное положение нуль отсчета ее шкалы смещен относительно оси опоры, а следовательно, и от горизонтальной плоскости, проходящей через центр установочного отверстия основания, на заданную величину.

Преимущество осадочной марки заключается в том, что основание выполнено из некоррозирующего материала, это исключает изменение

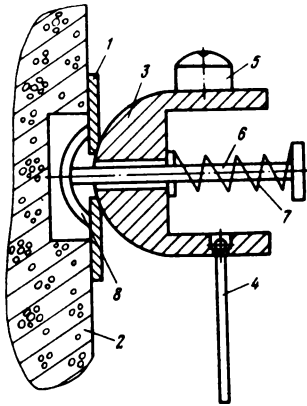


Рис. 55. Осадочная марка с нержавеющей основой

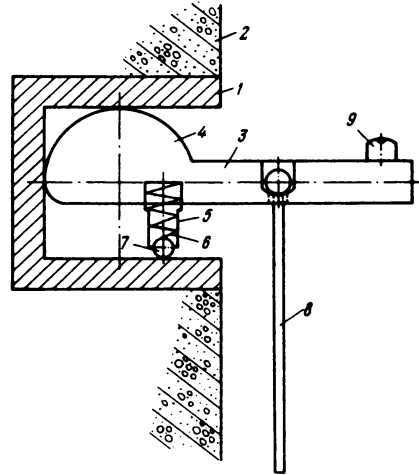


Рис. 56. Потайная осадочная марка

формы установочного отверстия со временем. Основания марок, показанных на рис. 54 и 55, легко изготавливаются и закрепляются на сооружении. Однако они находятся на наружной поверхности объекта и могут быть повреждены. Поэтому для наблюдений наиболее ответственных точек сооружений применяются потайные марки [22], [25]. Автором для этой цели предложена несколько иная марка (рис. 56).

Основание — полый цилиндр *1* — укрепляется неподвижно на сооружении *2* так, что один из торцов его закрыт наглухо, а второй находится заподлицо с плоскостью стены сооружения. В основание входит кронштейн *3*. На кронштейне укреплен полусферический выступ *4* с внецентрично расположенной гильзой *5* с пружиной сжатия *6* и шариком *7*, причем глубина цилиндра несколько больше диаметра сферы, а расстояние между верхней точкой полусферического выступа *4* и нижней точкой шарика *7* больше внутреннего диаметра основания *1*. На втором конце кронштейна установлена шарнирно самоустанавливающаяся реечка *8* со шкалой и закреплен уровень *9*. Конец кронштейна *3*, вдавив шарик *7* в гильзу *5*, вставляют в полый цилиндр *1* и смещают его внутрь до контакта полусферического выступа *4* с тыльной и внутренними стенками цилиндра *1*. Усилие пружины направлено перпендикулярно к плоской стороне сферического конца кронштейна, причем между центром сферы и направлением действия пружины такое расстояние, что масса реечки и другого конца кронштейна уравновешивается усилием пружины. Затем поворачивают кронштейн *3* на небольшой угол, достаточный для того, чтобы установить в нуль-пункт пузырек уровня *9*. Круглый уровень позволяет установить плоскость, с которой связан уровень, горизонталь-

но и тем самым добиться постоянства вертикального расстояния от нуля реечки до точки касания сферы и цилиндра.

Реечка  $\delta$  автоматически располагается отвесно. Величина зазора между кронштейном  $З$  и внутренними стенками основания  $1$  такова, что позволяет поворачивать кронштейн  $З$  на небольшой угол для установки его в горизонтальное положение по уровню  $9$ , а величина зазора между внутренними стенками кронштейна  $З$  и шарнирно-подвижной реечки  $\delta$  дает ей возможность повернуться и расположиться отвесно при горизонтальном положении кронштейна  $З$ . После утановки реечки в отвесное положение нуль отсчета ее шкалы, который совмещен с осью кронштейна  $З$ , находится, как и ось усеченной сферы, в горизонтальной плоскости. Вследствие действия пружины и шарика усеченная сфера однозначно устанавливается в основании, а уровень позволяет добиться постоянства вертикального расстояния от нуля реечки до точки касания сферы и цилиндра.

При измерении осадок фундаментов оборудования могут быть применены различные схемы нивелирования осадочных марок в зависимости от конкретных производственных условий. Примером может служить схема нивелирования (рис. 57) марок на фундаментах вращающихся цементных печей.

Привязочный ход от репера до ближайшего фундамента в этом случае будет прокладываться в начале и конце измерений каждого цикла и состоять из двух станций. Нивелирование нужно выполнять при двух горизонтах прибора. В каждом цикле создается 10–12 замкнутых полигонов.

Назначение точности измерения превышений — один из главных моментов организации наблюдений за осадками. Для большинства инже-

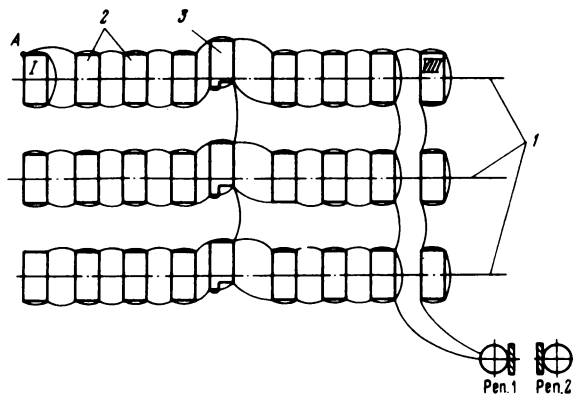


Рис. 57. Схема нивелирования осадочных марок на фундаментах вращающихся печей при установке исходных реперов в стенах клинкерной галереи:

$1$  — оси вращающихся печей;  $2$  — фундаменты редуктора;  $3$  — фундаменты роликоопор печи

нерных сооружений эта точность определяется, исходя из допустимой или расчетной осадки. Однако для фундаментов технологического оборудования, особенно агрегатов и технологических линий на нескольких изолированных фундаментах, при расчете фундаментов, их строительстве и эксплуатации стремятся вообще исключить возможность осадок. Поскольку этого практически достичь невозможно, то величины допустимых осадок (обычно величины допустимой неравномерности осадок) назначаются, исходя из сохранения определенного пространственного положения осей оборудования, т.е. сохранения условий для нормальной его эксплуатации.

Таким образом, к назначению точности измерений осадок фундаментов технологического оборудования можно подойти с двух сторон.

1. Исходным положением является получение осадки фундаментов с практически достижимой и экономически оправданной точностью. Известно [22], что такая точность реально оценивается в 1 мм.

Например, для сети (см. рис. 57), принимая за  $\mu$  среднюю квадратическую ошибку превышения, измеренного на одной станции при одном горизонте в соответствии с традиционными способами обработки измерений [37] будем иметь для наиболее слабого места сети (точка А) среднюю квадратическую ошибку определения осадки  $m_{\Delta H} = 3,6 \mu$ .

Отсюда

$$\mu = \frac{m_{\Delta H}}{3,6} = 0,3 \text{ мм.}$$

2. Исходным положением является своевременное определение неравномерности осадок фундаментов с целью исключения их влияния или учета при обеспечении геометрических условий для нормальной работы оборудования.

Так, например, допуск на неравномерность осадок фундаментов вращающихся печей назначается в соответствии с допустимым отклонением от прямолинейности оси агрегата  $\delta x_{\min} = 3 \text{ мм}$ . Учитывая сказанное о допусках в § 3, можно принять среднюю квадратическую ошибку определения неравномерности осадки

$$m_{\Delta H} = (\delta x_{\min})/2.$$

Поскольку неравномерность осадок можно найти из двух циклов наблюдений как разность превышений марок, находящихся на соседних фундаментах, то можно записать

$$m_{\Delta H} = (\delta x_{\min})/2 = \mu \sqrt{2n},$$

где  $n$  – число станций в ходе между двумя наблюдаемыми марками. Так, например, на схеме (см. рис. 57) для определения неравномерности

осадок крайних (I и VIII) опор вращающейся печи нужно проложить ход минимум из 15 станций. Поэтому отдельное превышение в таком ходе нужно измерять с точностью

$$\mu = m_{\Delta H} / \sqrt{2n} \approx 0,3 \text{ мм.}$$

Таким образом, оба рассмотренных подхода к назначению точности измерений осадок фундаментов вращающихся печей приводят к одному и тому же требованию – выполнять наблюдения отдельного превышения с точностью 0,3 мм.

Следует подчеркнуть, что в общем случае такого совпадения не будет. Так, например, при наблюдениях за осадками фундаментов цементных мельниц и их редукторов точность измерений должна соответствовать точности измерений при контроле горизонтальности и соосности корпуса мельницы и тихоходного вала редуктора, т.е.  $\mu = 0,06$  мм.

Следовательно, при организации наблюдений за осадками фундаментов технологического оборудования нужно рассчитывать точность наблюдений либо исходя из точности измерения осадок, либо их неравномерности и делать окончательный выбор в пользу более высокой точности.

#### § 24. Выполнение наблюдений

При проведении наблюдений во время работы агрегатов, прежде всего, необходимо учитывать, что осадочные марки могут иметь кратковременные (например, за один оборот вращающегося агрегата) высотные смещения. Эти перемещения могут быть значительными и превышать точность измерения осадок. Поэтому следует применять методику, исключаящую или, по крайней мере, ослабляющую влияние кратковременных смещений осадочных марок. Так, при измерении осадок фундаментов вращающихся печей этого можно достичь наиболее простым средством – взятием отсчетов по рейке при одном и том же положении агрегата. Для этого печь размечается на всех опорах и отсчет берут лишь тогда, когда метки находятся, например, в самом нижнем положении, тем самым ослабляется и влияние колебания пола цеха.

С целью повышения точности измерений и культуры производства при измерении осадок в действующих цехах применяют подсветки уровня, сетки нитей, отсчетного барабана и реек. Разработаны и используются светящиеся марки для измерений в условиях недостаточной освещенности.

В целом выполнение наблюдений должно обеспечить точность измерений, приведенную в § 23.

Так, для вращающихся печей по исследованиям за период 1963–1983 гг. требуемая точность достигается применением нивелиров: НА-1 и рейки длиной 0,5 м с инварной полоской и круглым уровнем ( $\mu = 0,16–0,27$  мм), Ni = 007 и той же рейкой ( $\mu = 0,2–0,3$  мм), Ni = 007

и реечкой с магнитным узлом крепления, обеспечивающих  $\mu = 0,18-0,3$  мм. Оправдало себя также использование нивелира НСМ2 и реечки с магнитным узлом крепления, причем реечка имела две шкалы с делениями 3 мм. Точность отсчитывания соответственно составляла 0,3 мм, а  $\mu = 0,3$  мм. Последняя методика, обеспечивая достаточную точность, значительно облегчает проведение отсчетов, что упрощает работу наблюдателя в сложных цеховых условиях.

Нивелирование осадочных марок на фундаментах мельниц с целью своевременного параллельного смещения оси мельницы и тихоходного вала редуктора выполняют двойным нивелированием при двух горизонтах с использованием нивелиров типа Н1 и реек с инварной полоской.

Опыт наблюдений свидетельствует, что осадки фундаментов под оборудование могут быть значительными. Так, на цементном заводе с 1963 по 1983 г. зафиксированы неравномерности осадок опор вращающихся печей  $4,5 \times 170$  м до 14 см. Основные причины осадок – сложные гидрогеологические условия площадки (разнозернистые, водонасыщенные пылеватые с содержанием ила пески), находящейся на острове реки, неодинаковая расчетная нагрузка на основание, нарушение правил технической эксплуатации и предпринимаемые иногда попытки исправить искривленную ось без разрезки корпуса, только за счет смещения опорных роликов. В последнем случае на опору со сдвинутыми роликами увеличивается давление, что ведет к возобновлению осадок, которые, в свою очередь, влекут за собой увеличение искривленности оси агрегата. Положение нормализуется лишь после разрезки корпуса, его выпрямления и восстановления прямолинейности оси ложа агрегата. Применяемая в последнее время описанная технология ремонта агрегатов привела к тому, что, в частности, осадки отдельных опор не превышают 9 мм в год, а осадки некоторых опор стабилизировались.

Таким образом, организация систематических наблюдений за осадками фундаментов промышленного оборудования помогает проверить правильность расчетов проектировщиков, предупредить преждевременный износ оборудования и обеспечивает разработку мероприятий по обеспечению нормальных условий эксплуатации агрегатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 987387 [СССР]. Осадочная марка / Авт. изобрет. Г.Г. Асташенков. – Заявл. 27.09.81, № 3331500/18 – 10; опубл. в Б.И., 1983, № 1.
2. *Бадалянц Х.А., Кобылин М.А., Костин И.М., Шевченко Т.Г.* Совершенствование технологии ремонта корпусов вращающихся печей. – Цветные металлы, 1, 1982, с. 37–39.
3. *Баран П.И., Шелест В.П.* Оптимизация рихтовки подкрановых рельсов методами математического программирования. – В сб.: Инженерная геодезия. Киев, 1976, вып. 19, с. 3–10.
4. *Белов П.В., Хлевнюк В.А.* Автоматический контроль положения оси печи в пространстве. – Цемент, 1971, № 7, с. 21.
5. *Большаков В.Д.* Теория ошибок наблюдений. М., Недра, 1983.
6. *Васютинский И.Ю., Рязанцев Г.Е., Ямбаев Х.К.* Геодезические приборы при строительномонтажных работах. М., Недра, 1982.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций (задачи, принципы, методология). М., Недра, 1980.
8. *Визиров Ю.В.* Угловая редукция через точку вблизи непросматриваемого створа. – Геодезия и картография, № 8, 1977, с. 35–37.
9. *Жуков Б.Н.* Геодезическая съемка подкрановых путей действующих тепловых электростанций. – Электрические станции, 1972, № 1, с. 49–52.
10. *Инструкция по монтажу технологического оборудования предприятий текстильной промышленности.* МСН 223 – 70/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1970.
11. *Инструкция по монтажу бумаго-картонodelательных машин.* ВСН 280–71/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1972.
12. *Инструкция на монтаж газоперекачивающих аппаратов компрессорных станций магистральных трубопроводов с приводом от газовых турбин ГТК–10, ГТ–750–6 и ГТ–6–750,* ВСН 2–51–74. М., ЦБНТИ, 1975.
13. *Инструкция по установке технологического оборудования на фундаментах.* ВСН 361–76/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1976.
14. *Инструкция по монтажу теплообменных и выпарных аппаратов.* ВСН 89–76/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1977.
15. *Инструкция по монтажу технологического оборудования сталеплавильных цехов.* ВСН 396–78/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1979.
16. *Инструкция по монтажу технологического оборудования прокатных цехов.* ВСН 395–78/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1979.
17. *Инструкция по монтажу технологического оборудования доменных цехов.* ВСН 398–79/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1980.
18. *Инструкция по монтажу дробильного, размольного, сортировочного, обогащительного и агломерационного оборудования.* ВСН 409–79/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1980.
19. *Инструкция по монтажу аппаратов высокого давления.* ВСН 407–79/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1981.
20. *Инструкция по монтажу смазочных гидравлических и пневматических систем общепромышленного назначения.* ВСН 411–80/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1981.
21. *Кузьо И.В., Микольский Ю.Н., Шевченко Т.Г.* Современные методы контроля установки оборудования. Львов, Вища школа, 1982.
22. *Левчук Г.П., Новак В.Е., Конусов В.Г.* Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. М., Недра, 1981.

23. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений. М., Недра, 1983.
24. Микольский Ю.Н., Кравченко В.М. Выверка и центровка промышленного оборудования. Киев, Будівельник, 1979.
25. Михеев Д.Ш., Рунов И.Е., Голубцов А.И. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений. М., Недра, 1977.
26. Мовсесян Р.А., Таплавшили И.А., Варданян В.Н. Влияние вибрации на точность гидростатического нивелирования. – Геодезия и картография, № 9, 1979, с. 31–33.
27. Нестеренок М.С., Нестеренок В.Ф. Гашение вибраций нивелира с компенсатором. – Геодезия и картография, № 11, 1980, с. 24–26.
28. Правила приемки и производства работ. Технологическое оборудование. Основные положения. (СНиП III–31–78). М., Стройиздат, М., 1979.
29. Рубинов А.Д. Контроль больших размеров в машиностроении. Л., Машиностроение, 1982.
30. Руководство по наблюдениям за осадками и смещениями инженерных сооружений фотограмметрическими методами. М., Недра, 1979.
31. Руководство по геодезическому обеспечению монтажа и эксплуатации технологического оборудования цементной промышленности. М., Недра, 1983.
32. Середович В.А. Об использовании гиroteодолитов при створных измерениях. – Геодезия и картография, 1982, № 9, с. 24–27.
33. Система плано-предупредительного ремонта оборудования цементных заводов. М., Стройиздат, 1980.
34. Соколов Ю.Г. Измерение осадок инженерных сооружений в условиях вибрации. Автореф. канд. дис., Ленингр. инж-строит. ин-т, 1972.
35. Сиваков Г.П. Контроль искажений корпуса вращающихся печей. – Цемент, № 9, 1975, с. 9–10.
36. Справочник по производственному контролю в машиностроении. Под ред. А.К. Кутай. М., Машиностроение, 1974.
37. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам. Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука. М., Недра, 1980.
38. СТ СЭВ 303–76. Основные нормы взаимозаменяемости. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Введ. с 01.01.79.
39. СТ СЭВ 2045–79. Точность геометрических параметров в строительстве. Основные положения. Введ. с 01.07.81.
40. Тарасенко Н.И. Разработка методики и исследование точности прецизионного геометрического нивелирования в промышленных условиях. Автореф. канд. дис. Львов, политехн. ин-т, 1983.
41. Указания по изготовлению и монтажу вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. ВСН 311–73/ММСС СССР. М., ЦБНТИ, 1974.
42. Уставич Г.А., Костина Г.Д. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов. М., Недра, 1983.
43. Юдинцов Б.М., Морозов Г.И. Монтаж оборудования коксохимических заводов. М., Стройиздат, 1981.
44. Януш В. Экономические предпосылки направленности научных работ в инженерной геодезии. – Геодезия и картография, № 4, 1983, с. 56–59.
45. Hennecke F., Werner H. Ingenieurgeodäsic. I. Auflage VEB Verlag für Bauwesen. Berlin, 1982.
46. Meyl W., Zimmermann J. Eine Genauigkeitsuntersuchung zur optoelektronischen Fluchring. – Vermessungstechnik, 31 (1983), 9, s. 306–308.
47. Ehring K.–G. Bestimmung astronomischer Azimute mittlerer Genauigkeit. – Vermessungstechnik, 31 (1983), 6, s. 199–201.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Основные особенности геодезического контроля крупногабаритного промышленного оборудования при его монтаже и эксплуатации . . . . .</b>	<b>4</b>
§ 1. Основные этапы, задачи и методы геодезического контроля . . . . .	4
§ 2. Методы установки промышленного оборудования . . . . .	10
§ 3. Машиностроительные допуски и точность геодезических работ . . . . .	16
§ 4. Влияние освещенности, вибрации и запыленности, сотрясений, температурных воздействий и других возмущающих факторов на методику и точность измерений в промышленных цехах . . . . .	19
§ 5. Учет влияния кривизны Земли при монтаже по высоте технологического оборудования значительной протяженности . . . . .	24
§ 6. Особенности и задачи организации геодезических наблюдений за оборудованием при его эксплуатации . . . . .	26
<b>Глава 2. Программы створных наблюдений применительно к геодезическому контролю промышленного оборудования при его эксплуатации . . . . .</b>	<b>27</b>
§ 7. Особенности использования программ створных наблюдений в действующем цехе . . . . .	27
§ 8. Створ, не параллельный оси агрегата . . . . .	28
§ 9. Программа створных наблюдений путем построения вспомогательных створов параллельно общей плоскости относимости . . . . .	33
<b>Глава 3. Геодезические способы измерения относительных кратковременных деформаций работающих промышленных агрегатов и их фундаментов . . . . .</b>	<b>47</b>
§ 10. Общие сведения и задачи измерений . . . . .	47
§ 11. Струнный способ измерения горизонтальных колебаний верха высоких фундаментов . . . . .	50
§ 12. Измерение кратковременных вертикальных перемещений . . . . .	58
§ 13. Определение деформаций элементов вращающихся агрегатов во время их работы . . . . .	62
<b>Глава 4. Рациональные способы геодезического контроля работающих промышленных агрегатов . . . . .</b>	<b>70</b>
§ 14. Назначение минимального числа положений агрегата для геодезического контроля . . . . .	70
§ 15. Измерение диаметров крупногабаритных вращающихся агрегатов . . . . .	78
§ 16. Контроль с двух сторон вращающихся агрегатов . . . . .	80
§ 17. Восстановление утраченных осей жестких элементов агрегатов . . . . .	84
§ 18. Способы геодезического контроля в плане работающих агрегатов . . . . .	88

§ 19. Геодезический контроль по высоте работающих агрегатов . . . . .	100
§ 20. Контроль соосности двух составных элементов вращающихся агрегатов типа валопровода . . . . .	107
<b>Глава 5. Определение оптимального положения осей агрегатов и технологических линий значительной протяженности по результатам геодезических измерений . . . . .</b>	<b>117</b>
§ 21. Агрегаты и технологические линии с одной осью . . . . .	118
§ 22. Агрегаты и технологические линии с двумя осями . . . . .	132
<b>Глава 6. Особенности измерения осадок фундаментов работающего промышленного оборудования . . . . .</b>	<b>140</b>
§ 23. Организация измерения осадок . . . . .	140
§ 24. Выполнение наблюдений . . . . .	146
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>148</b>

**ГЕННАДИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ АСТАШЕНКОВ**

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Редактор издательства *З.Н. Чумаченко*  
Обложка художника *К.В. Голикова*  
Художественный редактор *Г.Н. Юрчевская*  
Технический редактор *Н.С. Анашкина*  
Корректор *Р.А. Слобоженко*  
Оператор *Л.А. Миронова*

ИБ 5596

---

Подписано в печать 10.12.85. Т-22579. Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишущей машине. Гарнитура "Пресс-роман".  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,5. Усл. кр.-отт. 9,75. Уч.-изд. л. 10,20.  
Тираж 3500 экз. Заказ 1078 /9443-15. Цена 55 коп.

---

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",  
103633, Москва. К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете  
СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109033, Москва Ж-33, Волочаевская, 40.



55 коп.

НЕДРА

Г. Ф. АСТАШКОВ