Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. XXXVII, вып. 1, 1958 г.

О НЕОБХОДИМОЙ И ДОСТАТОЧНОЙ ТОЧНОСТИ ОСНОВНЫХ СЕТЕЙ ПОДЗЕМНОЙ ПОЛИГОНОМЕТРИИ

А. А. Гурич

Хода подземной полигонометрии прокладываются с целью создания в горных выработках системы пунктов с известными координатами и для решения горнотехнических задач. Поскольку такие хода являются основой для решения большинства маркшейдерских задач, от их качества и своевременности выполнения зависит успешность маркшейдерского обслуживания горных работ в целом.

Затраты времени и средств на производство подземных теодолитных ходов определяются степенью их точности. Необходимая точность маркшейдерских работ вообще и подземной полигонометрии в частности является условием, от соблюдения которого зависит качество и экономичность маркшейдерского обслуживания угольных шахт.

Вопрос о точности подземной полигонометрии не раз являлся темой научных исследований. Однако большинство авторов этих исследований основное внимание уделяло анализу фактически достигаемой в практике точности производства подземной полигонометрии и совершенно недостаточно освещало вопрос об удовлетворении требований производства к необходимой и достаточной точности получения результатов.

В настоящей статье приводятся результаты исследований в этой области.

Производственные допуски

Необходимая и достаточная точность основной сети подземной полигонометрии, как и любой маркшейдерской работы, определяется теми требованиями, которые предъявляет производство к точности решения горнотехнических задач. Подобные требования могут быть выражены при помощи производственных допусков, характеризующих максимально допустимые (с точки зрения эксплуатации) отклонения горных работ от проекта.

Исследование величин производственных допусков применительно к основным сетям подземной полигонометрии привело нас к следующим выводам.

1. Производственные допуски теодолитных ходов, прокладываемых по горным выработкам различных эксплуатационных горизонтов, должны дифференцироваться в зависимости от глубины разработок (до 150 *м* и более 150 *м*). Размеры шахтного поля не влияют на величину

производственного допуска и, следовательно, не меняют норм точности подземной полигонометрии.

2. При глубине разработок до 150 *м* главнейшим фактором, определяющим необходимую и достаточную точность основной сети подземных теодолитных ходов, является возможная необходимость задания с поверхности до горных выработок эксплуатационного горизонта горных выработок различного назначения (в том числе и аварийных скважин). Производственный допуск при этом может быть принят равным 1,2 *м*, что определяет допустимую среднюю ошибку положения точки теодолитного хода (относительно подходного пункта) на границе шахтного поля порядка $\pm 0{,}4$ *м*.

3. При глубине разработок более 150 *м* главнейшими факторами, определяющими необходимую и достаточную точность основной сети подземных теодолитных ходов, является построение плана горных выработок и создание условий безопасности горных работ. Величина производственного допуска при составлении плана будет около 1,8 *м*, для обеспечения безопасности работ — порядка 5 *м*. В соответствии с этим средняя допустимая ошибка положения точки теодолитного хода на границе шахтного поля относительно точки ориентирного стана не должна превышать $\pm 0{,}60$ *м*. Увеличение средней ошибки положения конечной точки теодолитного хода за счет ориентирования подземной съемки допустимо до $\pm 1{,}7$ *м*.

Приведенные выше величины производственных допусков и определяемые ими ошибки положения наиболее удаленных точек теодолитных ходов используются нами в дальнейшем как критерий необходимой и достаточной точности подземной полигонометрии.

Фактическая точность подземных теодолитных ходов

Накопление ошибок в теодолитных ходах зависит от формы и протяженности хода, от ошибок, допущенных при измерении углов и длин сторон хода. Зная их, можно определить и ошибки положения конечных точек типичных теодолитных ходов в угольных шахтах. Сравнивая эти ошибки с производственными допусками, можно определить, в какой мере произведенные теодолитные хода удовлетворяют требованиям производства в отношении их точности.

Для определения типичности формы и протяженности теодолитных ходов нами были использованы планы и схемы основных эксплуатационных горизонтов шахт Донецкого, Подмосковного, Кузнецкого и Карагандинского бассейнов, т. е. основных отечественных месторождений угля, разрабатываемых подземным способом. На этих планах были указаны границы шахтных полей и теодолитные хода.

Обобщив результаты анализа материалов по различным бассейнам, можно сделать следующие выводы.

1. В практике разработки угольных месторождений наиболее типичными формами теодолитных ходов нужно считать: а) висячие, вытянутые хода, проложенные от ориентирного стана по штреку до границы шахтного поля; б) висячие теодолитные хода с одним прямоугольным «изломом», проложенные от ориентирного стана по квершлагу (уклону) и после «излома» по штреку до границы шахтного поля.

2. Протяженность теодолитных ходов определяется размерами крыла шахтного поля и не может быть принята усредненной, ввиду большого различия размеров крыльев по простиранию пластов для отдельных шахт. Протяженность теодолитных ходов должна устанавли-

ваться по наиболее распространенным в практике размерам крыла шахтного поля по простиранию пластов, т. е. 1, 2, 3 и 5 *км*.

Вопрос оценки точности угловых и линейных измерений широко освещен в трудах проф. В. И. Баумана, И. М. Бахурина, А. О. Чеботарева, Д. И. Оглоблина и М. И. Гусева, А. Н. Белоликова, С. Ф. Травника и др., однако этот вопрос, по-видимому, еще долго будет служить предметом экспериментальных работ и теоретических обобщений.

Значительный производственный материал, собранный рядом исследователей, и неоднократно проводимые экспериментальные работы позволяют сделать достаточно обоснованные выводы о достигаемой в практике точности измерения углов и линий подземных теодолитных ходов. Особенно широко был проведен сбор материалов и поставлены экспериментальные работы Отделом методики маркшейдерских работ ВНИМИ в период 1951—1954 гг. (С. А. Филатов, Е. И. Шульго, В. Г. Куммерман, А. А. Гурич, А. В. Хлебников).

Результаты этих исследований следующие.

1. Измерение углов 30″ теодолитом одним полным повторением производится со средней ошибкой, не превышающей $\pm 22''$ в горизонтальных и наклонных горных выработках и $\pm 30''$ — в крутопадающих горных выработках.

2. Наиболее правильно характеризует среднюю ошибку при измерении длин линий интерполяционная формула

$$m_l = \pm \sqrt{a^2 L + b^2 L^2} \qquad (1)$$

или близкая к ней

$$m_l = a\sqrt{L} + bL \qquad (2)$$

с предельными значениями коэффициентов случайного и систематического влияния, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Разряды теодолитных ходов	Горные выработки			
	горизонтальные и наклонные с углом наклона до 15°		наклонные и крутопадающие	
	a	*в*	*a*	*в*
I	0,001	0,0001	0,003	0,0002
II	0,0015	0,0002	0,005	0,0003

При последующем анализе ходов подземной полигонометрии приняты приведенные результаты исследований величин ошибок непосредственных измерений.

Исходя из реально возможных размеров шахтных полей и типичного расположения подземных теодолитных ходов, нами был произведен предрасчет ожидаемых ошибок положения их конечных точек относительно точки ориентирного стана. Анализу подвергались четыре шахтных поля следующих размеров:

1) по простиранию 2 *км*, по падению 2 *км*;
2) „ „ 4 *км*, „ „ 2 *км*;
3) „ „ 6 *км*, „ „ 2 *км*;
4) „ „ 10 *км*, „ „ 2 *км*.

Для каждого шахтного поля определялась ошибка положения наиболее удаленной точки двух теодолитных ходов типичной формы, характеризующихся минимальной *А* и максимальной *Б* ошибками положения точек в районе границы шахтного поля. Схема анализируемых ходов приведена на рис. 1.

Величины ошибок положения конечных точек теодолитных ходов вычислены по формулам свободного полигона (табл. 2).

Таблица 2

Длина крыла шахтного поля по простиранию, *м*	Длина теодолитного хода, *м*		Направление ошибок положения (см. рис. 1)	Ошибки положений конечных точек (*м*) теодолитных ходов			
				одинарном висячем		двойном висячем	
	по простиранию	по падению		средняя	предельная	средняя	предельная
1000	1000	0	*x*	±0,29	±0,87	±0,20	±0,60
			y	±0,03	±0,09	±0,02	±0,06
			t	±0,30	±0,90	±0,21	±0,63
	1000	1000	*x*	±0,61	±1,83	±0,43	±1,29
			y	±0,30	±0,90	±0,21	±0,63
			t	±0,68	±2,04	±0,48	±1,44
2000	2000	0	*x*	±0,87	±2,61	±0,61	±1,83
			y	±0,06	±0,18	±0,04	±0,12
			t	±0,88	±2,64	±0,62	±1,86
	2000	1000	*x*	±1,38	±4,14	±0,98	±2,94
			y	±0,31	±0,93	±0,21	±0,63
			t	±1,41	±4,23	±1,00	±3,00
3000	3000	0	*x*	±1,61	±4,83	±1,14	±3,42
			y	±0,09	±0,27	±0,06	±0,18
			t	±1,62	±4,86	±1,15	±3,45
	3000	1000	*x*	±2,27	±6,81	±1,61	±4,83
			y	±0,32	±0,96	±0,22	±0,06
			t	±2,29	±6,87	±1,63	±4,89
5000	5000	0	*x*	±3,47	±10,41	±2,46	±7,38
			y	±0,15	±0,45	±0,11	±0,33
			t	±3,48	±10,44	±2,47	±7,41
	5000	1000	*x*	±4,37	±13,11	±3,09	±9,27
			y	±0,33	±0,99	±0,23	±0,69
			t	±4,39	±13,17	±3,11	±9,33

Полученные результаты говорят о том, что ошибки угловых измерений оказывают значительно бо́льшее влияние на величину ошибки положения точек теодолитных ходов, чем ошибки измерения линий. Причем с увеличением протяженности хода влияние ошибок угловых измерений закономерно возрастает, что иллюстрируется данными табл. 3.

Помимо ошибок, возникающих при производстве подземных теодолитных ходов, на ошибку положения точек ходов (относительно подходного пункта) существенное влияние оказывают и ошибки ориентирования. При вычислении последних средняя ошибка передачи

дирекционного угла на ориентирный стан принята нами равной $\pm 1'$. Ошибки передачи координат не учитывались ввиду своей незначительной величины.

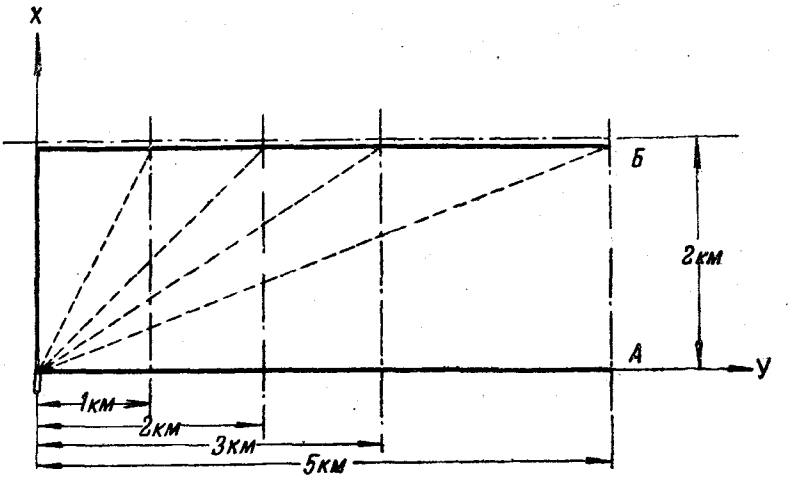


Рис. 1. Схема типичных теодолитных ходов

Таблица 3

Длина теодолитного хода, м	Ошибка положения точки m_t, м за счет измерений		$\frac{m_{t_\beta}}{m_{t_l}}$
	угловых m_{t_β}	линейных m_{t_l}	
1000	±0,20	±0,02	10,0
2000	±0,61	±0,04	15,2
3000	±1,14	±0,06	19,0
5000	±2,46	±0,11	22,4

Ошибки положения точек теодолитного хода, обусловленные ошибками ориентирования, вычислялись по формуле

$$m_t' = \frac{m_a' L}{\rho'}. \qquad (3)$$

Совместное влияние ошибок ориентирования и подземной полигонометрии на величину ошибок положения точек теодолитных ходов характеризуется данными табл. 4.

Таблица 4

Длина крыла шахтного поля по простиранию, м	Тип теодолитного хода (рис. 1)	Ошибки положения конечных точек теодолитных ходов, м			
		m_x	m_y	m_t	$m_{t_{пред}}$
1000	*A*	±0,36	±0,02	±0,36	±1,08
	B	±0,52	±0,36	±0,71	±2,13
2000	*A*	±0,85	±0,04	±0,85	±2,55
	B	±0,15	±0,36	±1,21	±3,63
3000	*A*	±1,45	±0,06	±1,45	±4,35
	B	±1,85	±0,36	±1,88	±5,64
5000	*A*	±2,88	±0,11	±2,88	±8,64
	B	±3,43	±0,36	±3,45	±10,35

Из сопоставления данных табл. 4 и величин производственных допусков видно, что последние в практике не выдерживаются.

Пути достижения необходимой и достаточной точности подземной полигонометрии

Для уменьшения ошибок положения конечных точек подземных теодолитных ходов до пределов, лимитированных производственными допусками, можно рекомендовать ряд мероприятий.

Рассмотрим главные из них.

I. Повышение точности измерения углов и ориентирования подземной съемки на основе анализа главных источников накопления ошибок положения конечных точек подземных теодолитных ходов. Для вывода необходимой точности угловых измерений и ориентирования подземной съемки нами был произведен предрасчет, исходя из величин производственных допусков и типичных форм шахтных полигонов. При предрасчете точность измерения длин линий принималась фактически достигаемая в условиях производства. Соотношение влияния ошибок теодолитного хода и ориентирования подземной съемки на величину ошибки положения конечной точки хода устанавливалось исходя из возможных вариантов осуществления ориентировки.

Результаты вычислений представлены в табл. 5.

Таблица 5

Длина крыла шахтного поля по простиранию, *м*	m''_β при глубине разработок, *м*		m''_α при глубине разработок, *м*	
	до 150	более 150	до 150	более 150
1000	±20	±22 (30)	±30	±60 (280)
2000	± 9	±14	±15	±60 (140)
3000	± 5	± 8	±10	±60 (90)
5000	± 3	± 4	± 4	±60

Примечание. В скобках показаны допустимые пределы увеличения средней ошибки измерения углов и ориентирования подземной съемки.

II. Создание систем замкнутых полигонов для снижения ошибок положения конечных точек съемочных ходов. Преобладающее большинство подземных теодолитных ходов в практике подземной разработки угля не замыкается и остается висячим до границ шахтного поля. Однако во всех каменноугольных бассейнах имеются примеры успешного замыкания теодолитных ходов в пределах одного горизонта и по падению пластов.

Анализ материалов, собранных на шахтах, показывает, что условия для замыкания теодолитных ходов в большинстве случаев имеются. Преобладание в практике висячих ходов объясняется, по нашему мнению, недооценкой маркшейдерами шахт преимуществ систем замкнутых полигонов.

Анализируя формы и размеры осуществленных в практике теодолитных ходов и материалы, характеризующие схемы подготовки эксплуатационных горизонтов, мы пришли к выводу, что за типичную может быть принята система замкнутых прямоугольников с размером

сторон 200 × 500 *м*, проложенная от ориентирного стана до границ шахтного поля.

Для определения ошибки положения конечной точки системы замкнутых теодолитных ходов относительно ориентирного стана можно воспользоваться методом эквивалентной замены, рекомендованным А. Н. Белоликовым. [1]

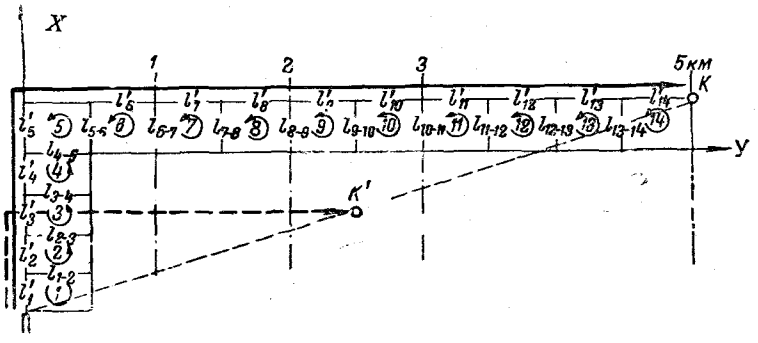


Рис. 2. Схема типичных замкнутых теодолитных ходов

При типичной схеме системы замкнутых теодолитных ходов нормальные уравнения при их уравновешивании (рис. 2) будут иметь следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
P_1K_1 - l_{1,2}K_2 + f_1 &= 0\\
-l_{1,2}K_1 + P_2K_2 - l_{2,3}K_2 + f_2 &= 0\\
-l_{2,3}K_2 + P_3K_3 - l_{3,4}K_4 + f_3 &= 0\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
-l_{11,12}K_{11} + P_{12}K_{12} - l_{12,13}K_{13} + f_{12} &= 0\\
-l_{12,13}K_{12} + P_{13}K_{13} - l_{13,14}K_{14} + f_{13} &= 0\\
P_{14}K_{14} - l_{13,14}K_{13} + f_{14} &= 0
\end{aligned}\right\}. \qquad (4)$$

Решая (4) совместно с весовым уравнением, характеризующим протяженность висячего хода до определяемой точки и влияние каждого замыкания на точность определения точки K, определим протяженность висячего хода, эквивалентного по точности всей системе замкнутых теодолитных ходов.

Весовое уравнение в соответствии с рис. 2 будет иметь вид

$$-l'_1K_1 - l'_2K_2 - \ldots - l'_{14}K_{14} + [l'_i]\,K_k = 0. \qquad (5)$$

Ошибка положения удаленной точки эквивалентного хода K' определяется формулами свободного висячего полигона.

В табл. 6 показаны средние ошибки положения конечных точек систем замкнутых теодолитных ходов относительно точки ориентирного стана и подходного пункта поверхности, вычисленные рассмотренным выше способом.

[1] Белоликов А. Н. Разработка рациональных методов уравнивания маркшейдерских полигонов. Рукопись, Фонды ЛГИ, 1953.

Таблица 6

Длина крыла шахтного поля по простиранию, *м*	Ошибки положения, обусловленные влиянием системы замкнутых ходов, *м*			Ошибки положения, обусловленные влиянием ориентирования, *м*			Общая средняя ошибка положения конечной точки, *м*		
	m_{t_x}	m_{t_y}	m_t	m'_{t_x}	m'_{t_y}	m'_t	$m^{\circ}_{t_x}$	$m^{\circ}_{t_y}$	m°_t
1000	±0,21	±0,11	±0,24	±0,30	±0,30	±0,42	±0,36	±0,32	±0,48
2000	±0,47	±0,14	±0,49	±0,60	±0,30	±0,67	±0,76	±0,33	±0,83
3000	±0,77	±0,17	±0,80	±0,90	±0,30	±0,95	±1,18	±0,35	±1,25
5000	±0,99	±0,20	±1,01	±1,50	±0,30	±1,53	±1,83	±0,36	±1,87

Как видно из данных табл. 6, при существующих шахтных полях средние ошибки положения конечных точек теодолитных ходов (при условии их замыкания и совместного уравнивания) не могут гарантировать соблюдения производственных допусков.

Таблица 7

Длина крыла шахтного поля по простиранию, *м*	m''_β при глубине разработок, *м*		m''_α при глубине разработок, *м*	
	до 150	более 150	до 150	более 150
1000	±22	±22	±60	±60
2000	±17	±22	±40	±60
3000	±10	±15	±25	±60
5000	± 7	± 9	±12	±40

В табл. 7 показаны средние ошибки измерения углов в подземных теодолитных ходах (при условии их замыкания и совместного уравни-

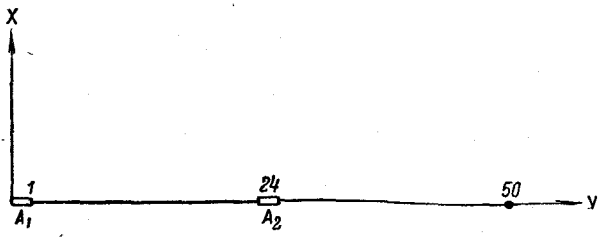


Рис. 3. Схема гироскопического ориентирования промежуточного стана теодолитного хода

вания) и средние ошибки ориентирования, обеспечивающие соблюдение производственных допусков.

III. Оба рассмотренных выше мероприятия для соблюдения производственных допусков требуют повышения фактически достигаемой в практике точности измерения углов и ориентирования подземной съемки. В этом отношении от них выгодно отличается метод дополнительного гироскопического ориентирования промежуточных станов подземной полигонометрии. Он позволяет равноточно и независимо определять дирекционный угол любого стана подземного теодолитного хода. Каждая дополнительная ориентировка какого-либо промежуточного стана теодолитного хода, естественно, снижает ошибку положения его конечной точки.

Рассмотрим следующий пример. В теодолитном ходе, проложенном от ориентирного стана A_1 до точки *50* (рис. 3), дополнительно ориенти-

рован стан A_2. Вычислим ошибку положения точки *50* при существующей точности измерения углов теодолитного хода ($m_\beta = \pm 22''$) и ориентирования ($m_\alpha = \pm 1'$).

Вначале определим ошибку положения точки *24*. Вычисление координаты X_{24} при равных длинах станов производится следующим образом:

$$X_{24} = X_1 + l(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 + \ldots + \cos\alpha_{23}). \qquad (6)$$

Поскольку ошибка по оси X в нашем примере зависит только от ошибок угловых измерений, справедливо будет выражение

$$\delta X_{24} = \frac{l}{\rho}(\delta\alpha_1 + \delta\alpha_2 + \ldots + \delta\alpha_{23}). \qquad (7)$$

Дирекционный угол каждой стороны теодолитного хода зависит от величины дирекционного угла начального стана и углов полигона, что можно записать

$$\left.\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_{A_1} + \beta_1 \\ \alpha_2 &= \alpha_{A_1} + \sum_1^2 \beta \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots\cdots \\ \alpha_{23} &= \alpha_{A_1} + \sum_1^{23} \beta \end{aligned}\right\}. \qquad (8)$$

Учитывая истинные ошибки дирекционного угла начального стана и каждого измеренного угла, истинные ошибки дирекционных углов станов теодолитного хода будут равны

$$\left.\begin{aligned} \delta\alpha_1 &= \varepsilon_{A_1} + \varepsilon_1 \\ \delta\alpha_2 &= \varepsilon_{A_1} + \sum_1^2 \varepsilon \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots\cdots \\ \delta\alpha_{23} &= \varepsilon_{A_1} + \sum_1^{23} \varepsilon \end{aligned}\right\}. \qquad (9)$$

Равенства (9) были бы справедливы в случае неуравновешенных углов. Поскольку в нашем примере имеется дополнительно ориентированный стан A_2, величины $\delta\alpha_i$ должны быть уменьшены на величину поправок за уравновешивание.

Величина невязки хода между станами A_1 и A_2 будет равна

$$W = \sum_1^{24} \varepsilon + \varepsilon_{A_1} - \varepsilon_{A_2}. \qquad (10)$$

Учитывая величины средних ошибок измерения углов теодолитного хода и ориентирования подземной съемки, веса при уравнивании могут быть приняты

$$P_\beta = \frac{A}{m_\beta^2} = 1; \quad P_{\alpha_1} = P_{\alpha_2} = \frac{A}{m_{\alpha_A}^2} = \frac{1}{9}. \qquad (11)$$

Из (10) и (11) поправка в измеренный угол за счет уравнивания будет равна

$$V_\beta = \frac{\sum_1^{24} \varepsilon + \varepsilon_{A_1} - \varepsilon_{A_2}}{n + 9 + 9} = \frac{\sum_1^{24} \varepsilon + \varepsilon_{A_1} - \varepsilon_{A_2}}{41}. \qquad (12)$$

Поправка в дирекционный угол ориентирных станов за счет уравновешивания будет равна

$$V_\alpha = 9V_\beta. \tag{13}$$

При введении поправки за уравновешивание формулы (9) примут вид

$$\left.\begin{aligned}
\delta\alpha_1 &= \varepsilon_{A_1} + \varepsilon_1 - 10V_\beta \\
\delta\alpha_2 &= \varepsilon_{A_1} + \sum_1^2 \varepsilon - 11V_\beta \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\delta\alpha_{23} &= \varepsilon_{A_1} + \sum_1^{24} \varepsilon - 32V_\beta
\end{aligned}\right\}. \tag{14}$$

Суммируя (14), определим истинную ошибку δX_{24}

$$\delta X_{24} = \frac{l}{\rho}(12\varepsilon_{A_1} + 12\varepsilon_1 + \ldots + \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} - \ldots - 12\varepsilon_{24} + 12\varepsilon_{A_2}).$$

Переходя к средним ошибкам, получим

$$m^2_{X_{24}} = \frac{l^2 m_\beta^2}{\rho^2}[9(12)^2 + (12)^2 + \ldots + 1 + 1 + \ldots + (12)^2 + (12)^2 9]. \tag{15}$$

После необходимых вычислений окончательно получаем

$$m_{X_{24}} = \pm 0{,}18\ м.$$

Средняя ошибка точки *50* будет равна

$$m_{X_{50}} = \pm\sqrt{(0{,}18)^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2}\sum_{24}^{50} R_y^2 + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} L_y^2} = \pm 0{,}31\ м.$$

Учитывая, что теодолитный ход прокладывается дважды, средняя ошибка точки *50* будет равна $\pm 0{,}21$ *м*.

Из сопоставления полученной ошибки точки *50* с данными табл. 2 видно, что эффективность дополнительного ориентирования промежуточных станов гироскопическим методом несомненна.

Рассмотренным выше способом нами были определены ошибки положения конечных точек теодолитных ходов типичной формы. Данные вычисления (табл. 8) позволили установить оптимальные расстояния между независимо ориентированными станами, при которых обеспечивается удовлетворение производственных допусков без необходимости повышения точности непосредственных измерений углов и ориентирования подземной съемки.

Таблица 8

Длина крыла шахтного поля по простиранию, *м*	Расстояние между независимо ориентированными станами при глубине разработок	
	до 150 *м*	более 150 *м*
1000	1000	—
2000	1000	1000
3000	900—1000	1000
5000	700—800	900—1000