

Лавриненко Елена Дмитриевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
И УСТАНОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА (УНК)**

Специальность – 25.00.32
«Геодезия»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре инженерной геодезии Московского государственного строительного университета (МИСИ)

Научный руководитель: доктор технических наук
Рязанцев Геннадий Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Баранов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук
Осипов Дмитрий Евгеньевич

Ведущая организация: ФГУП «Атомэнергопроект»

Защита диссертации состоится «19» ноября 2007 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4, ауд. 101 копр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан «09» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ю.М. Климков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ускорители заряженных частиц открывают исключительные возможности получения новых сведений о фундаментальной природе окружающего нас мира. Развитие ускорительной техники идёт по пути увеличения интенсивности пучка заряженных частиц. Связанное с этим увеличение размеров физических установок при требованиях к точности сопряжения основных элементов порядка десятых и сотых долей миллиметра требует решения новых задач в области прикладной геодезии.

Появление новых прикладных направлений использования ускорителей, модернизация ранее созданных установок, участие специалистов нашей страны в реализации грандиозных международных проектов, таких, как Адронный Коллайдер (ЛНС) в ЦЕРНе, подтверждают актуальность темы диссертационной работы. Поэтому технология геодезического обеспечения строительства самого крупного (длина кольцевого тоннеля ~ 21км) из запроектированных в нашей стране ускорителей – ускорительно-накопительного комплекса (УНК) в г. Протвино представляет научный и практический интерес и для перспективы создания новых ускорителей, и как пример решения прецизионной задачи в пределах весьма значительного по размерам сооружения.

Целью диссертационной работы является проведение исследований и разработка технологии, позволяющей качественно дополнить теоретическую основу производства и обработки высокоточных геодезических измерений, выполняемых на ускорителях.

Направления исследований связаны с решением следующих научных задач.

1. Провести сравнительный анализ результатов математического моделирования вариантов построения наземной геодезической сети.
2. Оценить результаты решения редуцированных задач в процессе создания наземных и подземных геодезических сетей УНК.

3. Разработать методику и определить степень влияния неоднородности гравитационного поля на установку оборудования в проектное положение по высоте по результатам астрономо-геодезического нивелирования.

4. Провести исследование, связанное с оценкой влияния кривизны поверхности относимости на измерения при строительстве тоннеля и при установке технологического оборудования в проектное положение по высоте.

5. Усовершенствовать и практически применить методику обработки плановых измерений с целью выявления деформаций, основанную на принципе конформного преобразования.

Объектом исследования являются строящийся ускорительно-накопительный комплекс УНК на территории Московской области, проектные данные и материалы геодезических измерений по этому объекту.

Методы исследований. Численное моделирование, метод наименьших квадратов, метод дифференциального исчисления, линейная алгебра.

Научная новизна работы. Основные результаты диссертационной работы, представляющие научную новизну, заключаются в следующем.

1. Усовершенствованы методические положения развития наземных и подземных геодезических сетей при строительстве кольцевых ускорителей.

2. Обоснованы необходимость и порядок учёта редуцированных поправок в плановые измерения в процессе создания геодезического обоснования при строительстве и монтаже оборудования УНК.

3. Выявлены особенности, связанные с учетом поправок за кривизну поверхности относимости при строительстве тоннеля и при установке технологического оборудования в проектное положение по высоте.

4. Разработан метод оценки степени влияния неоднородности гравитационного поля на результаты высотных измерений при монтаже оборудования по результатам астрономо-геодезического нивелирования.

5. Разработан и практически применён алгоритм оценивания внешней и внутренней деформации плановых геодезических сетей кольцевых ускорителей.

Практическое значение работы заключается в решении проблемы повышения точности и надёжности геодезического обеспечения путем использования высокоточной технологии построения многоступенчатого геодезического обоснования для строительства ускорителей кольцевой формы, впервые обеспечивающей одновременное выполнение как строительных, так и монтажных работ. Разработанные в диссертации методические положения использовались при строительстве тоннеля УНК. Составлена и опробована прикладная программа уравнивания сетей с оценкой деформаций на основе принципа конформного преобразования, которая может использоваться при проведении геодезического мониторинга на кольцевых ускорителях.

Апробация и публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 5 работ. Основные положения и результаты исследований докладывались на научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК в 2004г и конференции, посвященной 85-летию кафедры инженерной геодезии МГСУ в 2006г.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Основное содержание диссертации изложено на 117 страницах, содержит 27 таблиц и 25 рисунков. Список литературных источников включает 55 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, определение цели и задач диссертанта.

Первая глава «Ускорительно-накопительный комплекс и аналитический обзор технологий и принципов построения опорных геодезических сетей ускорителей заряженных частиц» характеризует объект исследования в плане конструктивных особенностей и технических требований к строительству тоннеля и монтажным работам. В процессе поиска пути решения задач, связанных с УНК, приводится аналитический обзор технологий геодезического обеспечения при строительстве двух самых крупных ускорителей.

тельных комплексов в мире (диаметры 8,6 и 2,0км): в ЦЕРНе (Швейцария) и в национальной ускорительной лаборатории им. Э.Ферми (США).

УНК создаётся на базе действующего кольцевого ускорителя У-70 с диаметром 470м. Его запуск даёт возможность благодаря переводу пучка из У-70 через канал инъекции в кольцевой ускоритель комплекса увеличить энергию пучка с 70 до 3000 Гэв (рисунок 1).

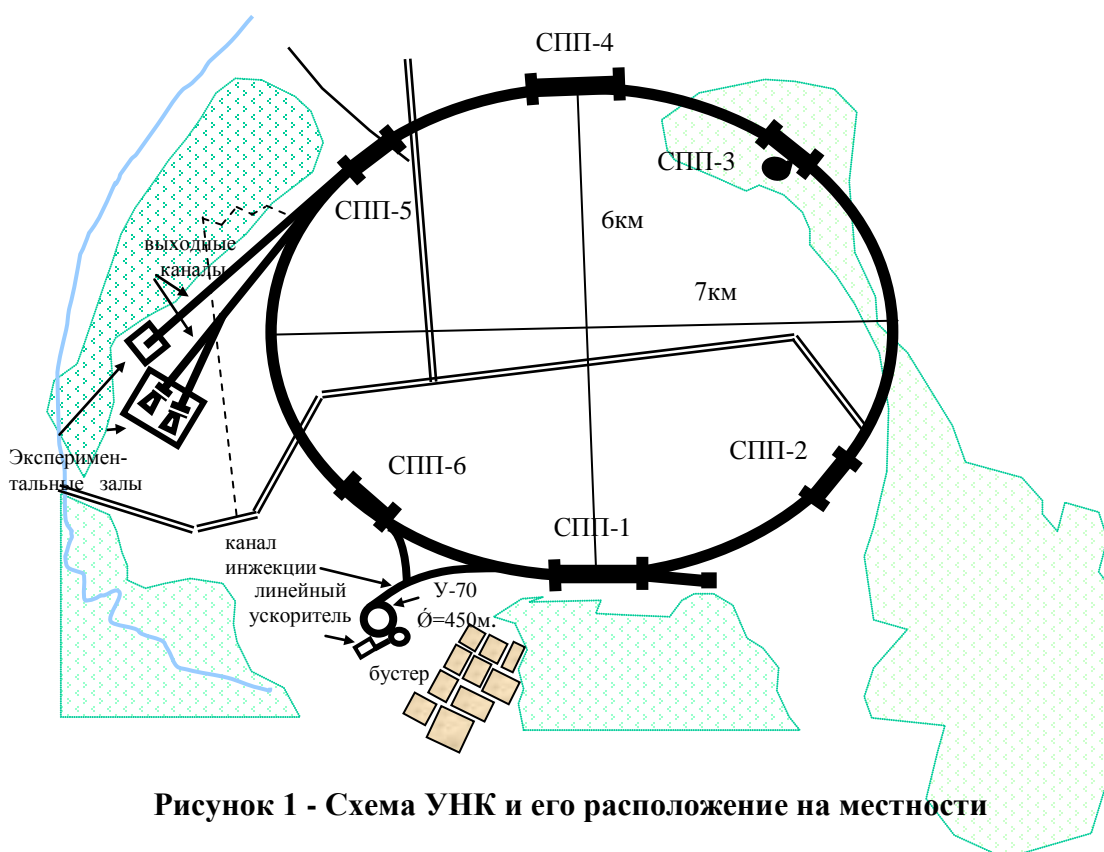


Рисунок 1 - Схема УНК и его расположение на местности

Кольцевой ускоритель УНК запроектирован в форме, близкой к эллипсу. Максимальная глубина заложения тоннеля – 60м. Наклон плоскости орбиты к горизонту – 0,67мрад (2'18"). Общее количество устанавливаемого технологического оборудования составляет 3000 единиц. Это магнитные линзы, поворотные магниты и корректирующие магниты. Точностные требования к строительству тоннеля и монтажу оборудования приведены в таблице 1.

Технология построения геодезического обоснования должна обеспечивать взаимосвязь этапов геодезических измерений с целью сохранения их преемственности для достижения заданных точностей монтажа оборудования и при этом возможности ведения строительных и монтажных работ на разных участках проходки одновременно.

Т а б л и ц а 1

Требования к точности строительно-монтажных работ

Ср.кв. погрешность (СКП) радиального положения магнитной линзы (квадруполя) относительно двух соседних	0,05мм
СКП взаимного положения по высоте 2-х соседних квадруполей	0,06мм
СКП радиального и высотного положения магнита (диполя) относительно квадруполей	0,5мм
СКП азимутального положения диполя относительно квадруполей	1,0мм
Отклонение оси тоннеля от проектного положения	50,0мм
Максимально допустимая величина погрешности сбойки осей участков тоннеля, сооружаемых встречными забоями	25,0мм
СКП положения базового квадруполя относительно пункта наземной сети	5,0мм

Специалистами геодезических служб Института физики высоких энергий (ИФВЭ) и ФГУП ГСПИ при участии автора [2] был разработан «принцип преэмптентности», задающий идеологическую основу методики измерений и обработки при последовательном развитии геодезических сетей.

На основании этих методических положений в технологическую схему построения планово-высотных сетей включено пять ступеней геодезического обоснования. Исходной основой для строительства является наземная тоннельная сеть. Она сгущается ходами основной полигонометрии с целью обеспечить исходными данными ориентирование и передачу координат в подземные выработки. Подземная маркшейдерская сеть необходима для строительства тоннеля и установки закладных деталей под основное технологическое оборудование. На этапе предварительного монтажа оборудования создаётся монтажная сеть. Окончательная установка электромагнитного оборудования будет выполняться не от опорной сети, а посредством измерений по знакам, расположенным на оборудовании (юстировочная сеть).

На начальном этапе создания многоступенчатого обоснования автором были проведены исследования методом численного моделирования различных схем и методов построения и обоснован выбор наиболее оптимального варианта наземной тоннельной сети, который был реализован на объекте.

В связи с большими размерами ускорителя и высокими требованиями выноса проекта в натуру исследовались вопросы учёта влияния редуцион-

ных поправок на плановые геодезические измерения, а также влияния кривизны поверхности относимости и неоднородности гравитационного поля на высотные геодезические измерения.

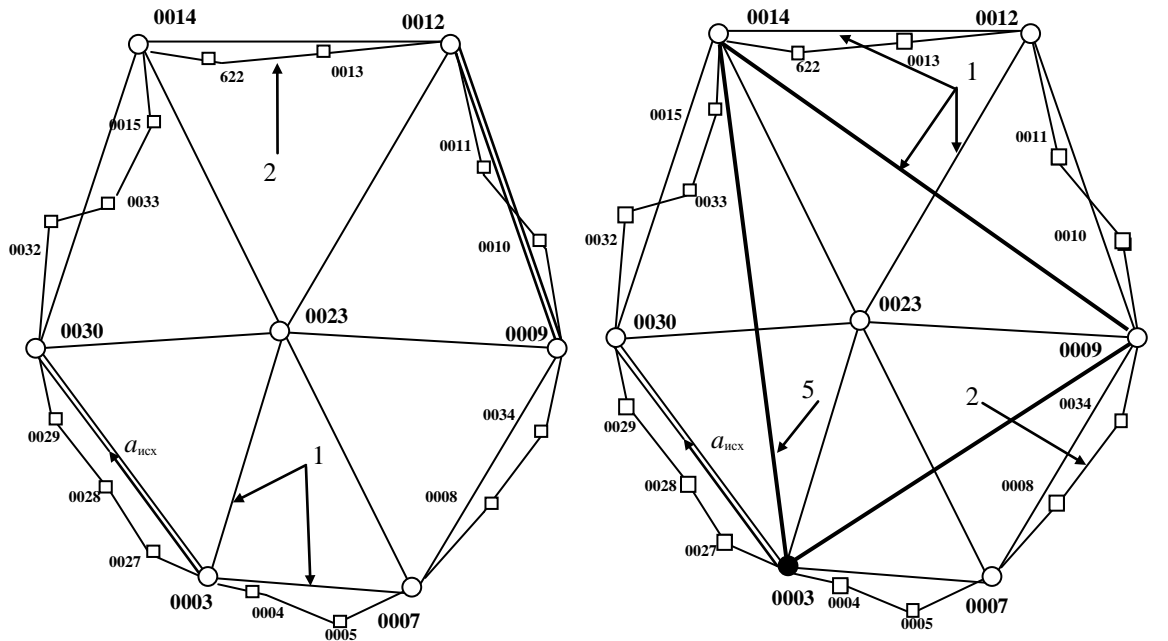
Во второй главе «Математическое моделирование наземной геодезической сети УНК» методом математического моделирования исследуются варианты построения наземной геодезической основы. Указанный метод позволяет предрассчитать точность определения координат пунктов геодезических сетей на уникальных объектах.

Рассматривались следующие варианты наземной сети: триангуляция, трилатерация, линейно-угловая сеть (центральные системы), полигонометрия и специальная полигонометрическая сеть с измеренными астрономическими азимутами (рисунки 2,3). Перечисленные варианты схем после уравнивания сгущались полигонометрическими ходами (II степень обоснования).

Геометрические данные моделей и погрешности измерения элементов сетей максимально приближены к фактическим и проектным значениям соответственно: длина стороны в сетях I степени – 3,3км, в сетях II степени – 1км; СКП измерения углов - 1" и 1,2", сторон – 10 и 5мм (I и II степени). Дополнительные точностные характеристики отдельных вариантов: СКП измерения базиса в триангуляции 1: 800 000; СКП определения трёх дополнительных сторон в трилатерации со средней длиной 6км - 15,0мм; погрешность определения астрономического азимута в специальной полигонометрической сети – 0,7", широты – 0,4" и долготы – 0,5". В пятом варианте сети реализована одна степень наземного обоснования.

Основными заданными критериями оценки качества вариантов геодезической основы служили: СКП дирекционного угла наиболее слабой стороны $m_\alpha = 1,5''$, СКП положения пункта в наиболее слабом месте сети $m = 25\text{мм}$. При уравнивании использовалась специально созданная программа на основе параметрического способа. Оценивалась точность определения положения пунктов нуль-свободных и свободных геодезических построений различными методами (таблица 2). Нуль-свободные геодезические сети имеют минимальный набор исходных данных (исходный пункт и дирекционное направ-

ление) и необходимы для обеспечения единства системы координат УНК и У-70. Свободные сети целесообразно использовать при обработке деформационных измерений на кольцевых ускорителях.

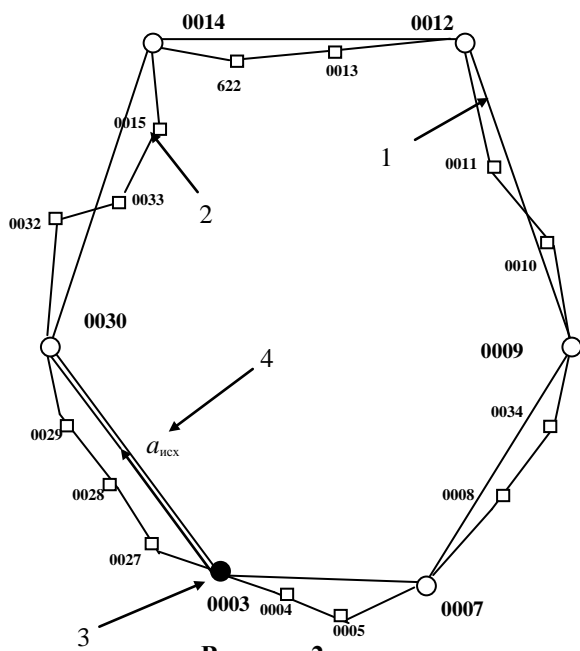


Вариант 1

1-тоннельная триангуляция (I ступень)
2-тоннельная полигонометрия (II ступень)

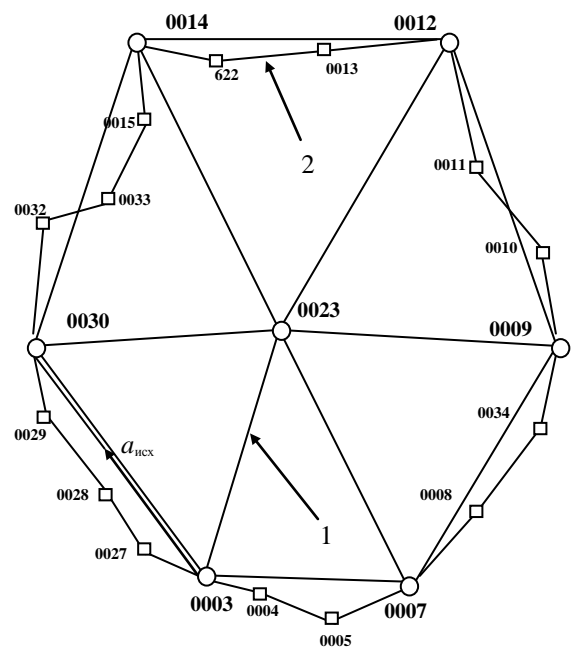
Вариант 3

1- тоннельная трилатерация (I ступень)
2- тоннельная полигонометрия (II ступень)



Вариант 2

1-тоннельная полигонометрия (I ступень)
2-тоннельная полигонометрия (II ступень)

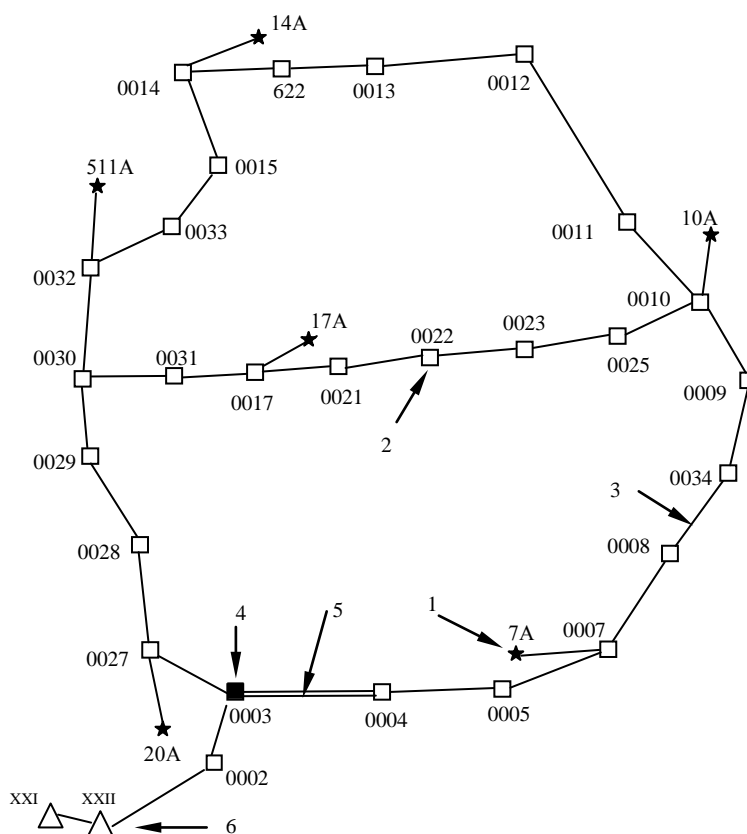


Вариант 4

1-линейно-угловая сеть (I ступень)
2-тоннельная полигонометрия (II ступень)

3 – исходный пункт наземной сети;
4- исходное дирекционное направление;
5- дополнительные стороны.

Рисунок 2 – Варианты наземной сети УНК



- 1-пункт Лапласа; 4-исходный пункт;
 2-пункт полигонометрии; 5-исходное дирекционное направление;
 3-сторона полигонометрии; 6- пункт триангуляции.

**Рисунок 3 – Наземная сеть УНК. Вариант 5.
 Полигонометрия с азимутами Лапласа**

Т а б л и ц а 2

СКП положения пунктов (m) по результатам уравнивания

Нуль-свободные сети									
№ пункта	Вариант 1 Триангуляция		Вариант 2 Полигонометрия		Вариант 3 Трилатерация		Вариант 4 Линейно- угловая сеть		Вариант 5 Спец. поли- гонометрия
	m_I ,мм	m_{I+II}	m_{I} , мм	m_{I+II}	m_I , мм	m_{I+II}	m_I ,мм	m_{I+II}	m ,мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0030	3,93	3,60	9,53	6,74	9,27	6,51	8,16	6,16	16,77
0014	25,08	14,92	17,74	13,93	21,80	15,53	16,08	12,92	24,04
0012	29,23	17,72	22,93	17,57	27,34	19,64	18,56	15,35	24,96
0009	33,61	18,84	22,91	17,83	25,65	19,18	19,08	15,64	21,85
0007	24,34	13,45	15,72	12,00	20,33	13,83	14,64	11,41	16,28
0023	20,98	13,63	-	-	17,64	14,11	12,51	10,88	19,59

0003	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Окончание таблицы 2

Свободные сети									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0030	11,21	7,30	9,04	6,46	10,73	7,07	7,40	5,75	8,01
0014	11,26	8,03	9,02	6,96	10,29	6,73	7,40	6,21	10,89
0012	10,52	7,73	9,02	7,06	10,88	7,65	7,06	6,08	10,38
0009	11,05	7,53	9,24	6,94	10,32	6,61	7,19	5,92	8,75
0007	10,82	7,63	8,92	6,95	10,65	7,47	7,28	6,08	11,86
0023	7,03	7,64	-	-	8,10	8,29	5,00	5,56	9,86
0003	11,42	7,67	9,11	6,81	10,38	6,58	7,46	6,01	10,74

Из таблицы 2 следует, что:

- погрешности положения пунктов в нуль-свободных сетях триангуляции, полигонометрии и трилатерации сравнимы между собой, такой же вывод можно сделать и по отношению к свободным сетям;
- линейно-угловая сеть характеризуется несколько большей точностью;
- погрешности положения пункта и дирекционного угла в наиболее слабом месте нуль-свободных сетей не превысили соответственно величин 25мм и 1,5", предусмотренных техническим заданием;
- свободные сети кольцевой и радиально-кольцевой формы являются более точными и имеют меньший диапазон изменения погрешностей по сравнению с аналогичными нуль-свободными сетями.

Таким образом, все приведённые варианты построений обеспечивают необходимую точность наземной геодезической сети. С точки зрения экономических соображений, исходя из особенностей района строительства (залесённость и пр.), вариант 5 отличается от других меньшими трудностями в организации производства измерений и возможностью одновременного создания сети пунктов полигонометрии необходимой густоты вдоль кольцевого тоннеля. Количество ступеней наземного обоснования сокращается до двух (тоннельная и основная полигонометрия). Благодаря включению в сеть пунктов Лапласа появляется возможность не только контролировать угловые измерения, но и исследовать влияние неоднородностей гравитационного по-

ля Земли на результаты высотных измерений на основании астрономо-геодезического нивелирования.

В третьей главе «Исследование влияния редуционных поправок на результаты плановых геодезических измерений» обосновывается необходимость использования при вычислениях рекомендуемого осевого меридиана и поверхности относимости.

Обработка измерений наземных и подземных плановых геодезических сетей объекта связана с большим объёмом редуционных вычислений. Его можно значительно уменьшить, если использовать поверхность относимости со средней отметкой оси тоннеля и при переходе к проекции Гаусса-Крюгера применить не меридиан 3° зоны ($L_0=36^\circ$), удалённый от объекта на 80км, а меридиан, проходящий недалеко от центра кольцевого ускорителя ($L_0=37^\circ 14'$). Это позволяет уменьшить величины редуционных поправок до пренебрегаемых величин. В результате анализа вычислений автором рекомендуется следующее.

1. Измеренные длины линий наземных сетей следует редуцировать на поверхность относимости со средней отметкой оси тоннеля 118м. Поправки достигают 15мм при изменении высот от 140 до 177м. При вычислении используется известная формула, включающая средний радиус эллипсоида.
2. Редуционные поправки в линии при переходе к плоскости в проекции Гаусса-Крюгера не учитываются при использовании осевого меридиана $L_0=37^\circ 14'$. Для километровых линий тоннельной полигонометрии они находятся в пределах 0,2мм, что несущественно при точности измерения 5мм.
3. При переходе от измеренных астрономических к геодезическим азимутам в измерения вводят поправку за несовпадение плоскостей астрономического и геодезического меридианов (поправку Лапласа).
4. При переходе от геодезических азимутов к дирекционным углам поправки за кривизну изображения геодезической линии на плоскости пренебрегаемо малы (менее 0,003") и не учитываются.

5. При проектировании координат геодезических пунктов с дневной поверхности в шахту поправки в координаты за влияние уклонов отвесных линий находятся в пределах 0,1 мм и не учитываются.

Четвёртая глава - «Исследование влияния редуционных поправок на результаты высотных геодезических измерений». По техническим условиям электромагнитное оборудование кольцевого ускорителя устанавливается по заданной плоской кривой, повторяющей форму орбиты. Высокоточное геометрическое нивелирование не позволяет решить задачу определения высот относительно плоскости установки оборудования. При выраженных сотыми долями миллиметра допустимых погрешностях на взаимное положение элементов оборудования по высоте в результатах измерений необходим учёт неоднородностей гравитационного поля и кривизны поверхности относимости.

Величина поправки за кривизну поверхности относимости δR зависит от положения отсчётного эллипсоида и радиуса его кривизны. Величины поправок при переходе к проектной плоскости кольцевого ускорителя будут меньше, если предположить, что эллипсоид или поверхность параллельная ему проходит через два репера высотной сети. В этом случае проектная плоскость кольцевого ускорителя будет секущей к поверхности эллипсоида.

Для секущей плоскости примем дополнительное условие: если реперы высотной сети, через которые она проходит (a, c) , находятся на севере и юге кольцевого ускорителя, то максимальные поправки за кривизну, приблизительно равные между собой, будут находиться на западе и востоке в точках k и b (рисунок 4).

При учёте кривизны поверхности относимости на стадии строительства кольцевого тоннеля допустимо использовать сферическую поверхность относимости со средним радиусом кривизны эллипсоида. Пользуясь известной формулой для поверхности сферы, определим максимальную поправку за

кривизну:

$$\delta R_i = \frac{S_i^2 - S_0^2}{2R^2}. \quad (1)$$

В формуле (1): S_0 - расстояние от точки "a" до центра кольцевого ускорителя "0" с известными координатами, S_i - расстояние от центра кольцевого ускорителя до определяемой точки оси тоннеля.

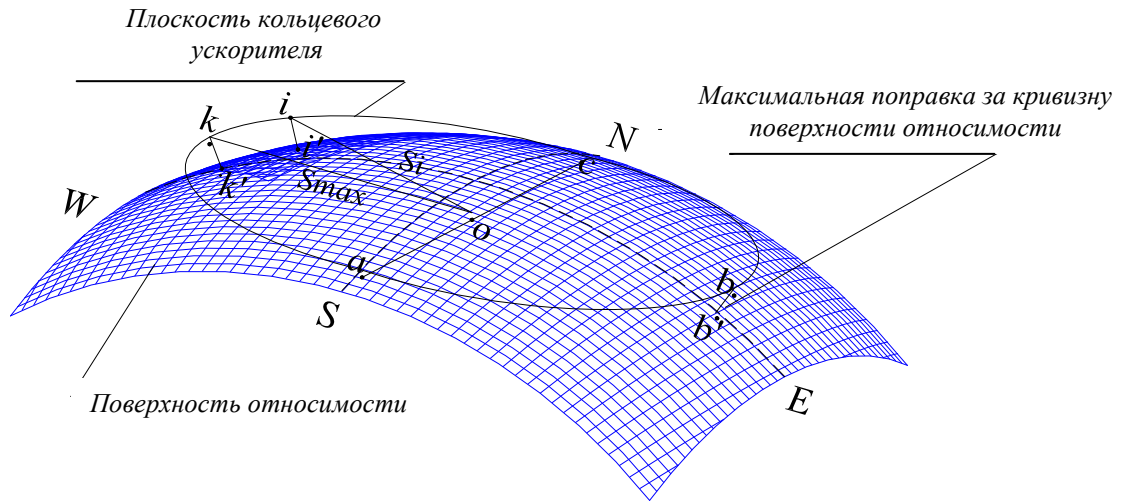


Рисунок 4 – Поправка за кривизну поверхности относимости

Максимальная поправка при переходе к плоскости орбиты ускорителя составляет 218мм.

Высокая точность монтажа оборудования не позволяет использовать поверхность сферы. Докажем это, принимая во внимание, что основное требование к точности установки смежных квадруполей по высоте выражается СКП 0,06мм. В этом случае точность вычисления поправок за кривизну поверхности относимости должна быть $\sim 0,01$ мм. Продифференцировав (1), получим выражение для допустимой погрешности радиуса:

$$m_R = \frac{2R^2 m_{\delta R}}{S_{\max}^2 - S_0^2}. \quad (2)$$

При точности вычисления поправки $m_{\delta R}=0,01$ мм, максимально допустимая погрешность радиуса составит 293м. Для широты данного объекта несовпадение среднего радиуса кривизны эллипсоида и радиусов кривизны меридиана M и первого вертикала N составляет приблизительно 7км. Таким образом, при учёте кривизны поверхности относимости в высотных измерениях на УНК необходимо пользоваться формулой, включающей радиус кривизны произвольного сечения и меридиана:

$$\delta Ri = \frac{S_i^2}{2\rho_{Ai}} - \frac{S_0^2}{2M} = \frac{S_i^2 M - S_0^2 \rho_{Ai}}{2M\rho_{Ai}}. \quad (3)$$

На основании изложенного, на объекте рекомендуется вычислять поправку за кривизну поверхности относимости, используя в качестве этой поверхности эллипсоид, и вводить её на стадии вычисления проектных высот оси тоннеля.

Впервые при строительстве инженерного сооружения, на сравнительно небольшой площади, были проведены астрономические наблюдения на 6-ти астропунктах, включённых в наземную сеть УНК. Они позволили для оценки влияния аномального гравитационного поля на высотные измерения при монтаже технологического оборудования воспользоваться методом астрономо-геодезического нивелирования. Использование метода даёт возможность сделать выводы о характере изменений высот квазигеоида в районе УНК.

Схема астрономо-геодезической сети представляет собой полигон с привязкой к исходному пункту (рисунок 5). Среднее расстояние между пунктами - 4км. В качестве измерений выступают разности высот квазигеоида, вычисляемые по составляющим уклонений отвесных линий.

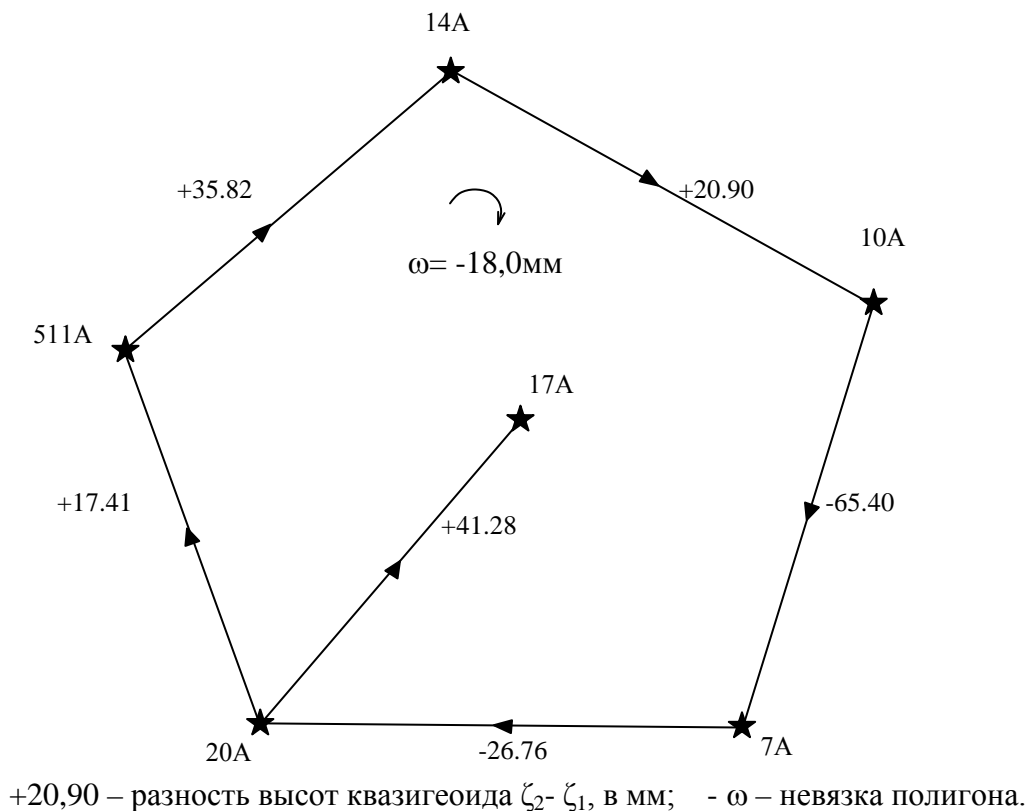


Рисунок 5 - Схема астрономо-геодезической сети

Формула для вычисления разности высот квазигеоида имеет вид:

$$\zeta_2 - \zeta_1 = -\frac{D_{12}}{2\rho} [(\xi_1 + \xi_2)\cos A_{12} + (\eta + \eta_{21})\sin A_{12}], \quad (4)$$

где D_{12} – расстояние между пунктами 1 и 2;

ξ, η – составляющие уклонения отвеса;

A_{12} – геодезический азимут направления с пункта 1 на пункт 2.

Уравнивание астрономо-геодезической сети выполнено коррелятным способом. Для астропункта 20А аномалия высоты принята равной нулю. Пользуясь уравненными значениями аномалий высот ζ_i , построим плоскость, наилучшим образом приближенную к астропунктам на поверхности квазигеоида. Отклонения от неё v_{ζ_i} будут характеризовать степень неоднородности гравитационного поля. Именно они могут оказывать влияние на результаты физических экспериментов. В таблице 3 приведены значения отклонений v_{ζ_i} . Величины отклонений v_{ζ_i} от вероятнейшей плоскости не превышают ср. кв. погрешности их определения ($\sim 1,1$ мм).

Использование астрономических наблюдений позволило выявить характер гравитационного поля в пределах объекта строительства: наклон проектной плоскости орбиты ускорителя, вызываемый постоянной составляющей аномалий высот на 5-ти астропунктах, уверенно прослеживается в направлении с северо-востока на юго-запад. По отношению к заданному наклону проектной плоскости (0,67мрад) эта величина невелика (0,01мрад) и может не учитываться.

Т а б л и ц а 3

Результат вычисления положения вероятнейшей плоскости по значениям аномалий высот астропунктов наземной сети УНК

астропункт	Уравненные аномалии высот ζ_i , мм	Составляющие аномалий высот	
		образуют вероятнейшую плоскость ζ_i' , мм	отклонения от вероятнейшей плоскости v_{ζ_i} , мм
20А	0,00	-0,19	+0,19
511А	24,19	+25,15	-0,96
14А	61,43	+60,25	+1,18
10А	85,08	+85,68	-0,60
7А	25,58	+25,37	+0,20

В пятой главе «Разработка методики анализа результатов наблюдений за деформациями плановой наземной геодезической основы» рассматриваются теоретические основы оценивания внутренних деформаций плановых сетей на основе принципа конформного преобразования. В связи с тем, что для кольцевых ускорителей важно знать величины деформаций по радиусу и азимуту, алгоритм доработан с целью применения его в системе полярных координат.

Накопление случайных и систематических погрешностей в протяженных геодезических сетях приводит к тому, что значения полной деформации, определенные как разность координат одноимённых пунктов из 2-х циклов измерений, не всегда соответствуют фактическим смещениям. В результате уравнивания наземной сети УНК координаты наиболее удалённых от исходного пунктов определяются с погрешностями, достигающими 50мм. Поэтому при обработке деформационных измерений было принято решение использовать метод разделения полной деформации δx_j и δy_j на две составляющие – внутреннюю $\delta x_j^+ \delta y_j^+$ и внешнюю $\delta x_j(\beta) \delta y_j(\beta)$:

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j &= \delta x_j(\beta) + \delta x_j^+ \\ \delta y_j &= \delta y_j(\beta) + \delta y_j^+ \end{aligned} \right\} . \quad (5)$$

Внутренняя деформация характеризует взаимное смещение плановых пунктов. Внешняя деформация пунктов сети определяется набором параметров, связанных с её разворотом относительно исходной точки, изменением линейного масштаба, параллельным сдвигом по осям координат. Нормальная работа кольцевого ускорителя не зависит от внешней деформации, но чувствительна к взаимному смещению пунктов. Автором предлагается следующая последовательность оценивания внешних и внутренних деформаций.

1. Уравниваются начальный и текущий циклы измерений с одной твёрдой точкой и исходным дирекционным углом (нуль-свободная сеть).
2. Вычисляется полная деформация сети:

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j &= x_j - x_j^0 \\ \delta y_j &= y_j - y_j^0 \end{aligned} \right\} . \quad (6)$$

3. Осуществляется переход от нуль-свободной сети к свободной: координаты j -ой точки вычисляются от центра тяжести:

$$\left. \begin{aligned} x_j &= x_0 + L_j \cos \alpha \\ y_j &= y_0 + L_j \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $x_0 = [x_j]/N$, $y_0 = [y_j]/N$.

4. Полный дифференциал от выражения (7) даёт формулу определения внешней составляющей деформации (8) с учётом того, что $\delta m = \delta L/L$. Её компоненты интерпретируются как дифференциалы изменения координат в определенной системе, обусловленные конформным преобразованием, сохраняющим геометрию сети:

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j(\beta) &= \delta x_0 - \Delta y_j \delta \alpha + \Delta x_j \delta m \\ \delta y_j(\beta) &= \delta y_0 + \Delta x_j \delta \alpha + \Delta y_j \delta m \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $\Delta x_j = x_j^0 - x_0$, $\Delta y_j = y_j^0 - y_0$;

δx_0 , δy_0 - параметры конформного преобразования, приводящие к сдвигу сети относительно центра тяжести по осям координат x и y ;

δm - параметр изменения масштаба;

$\delta \alpha$ - параметр связанный с разворотом системы координат.

5. Вычисляется величина внутренней деформации как разность между полной деформацией и её внешней составляющей:

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j^+ &= \delta x_j - (\delta x_0 - \Delta y_j \delta \alpha + \Delta x_j \delta m) \\ \delta y_j^+ &= \delta y_j - (\delta y_0 + \Delta x_j \delta \alpha + \Delta y_j \delta m) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Параметры конформного преобразования определяются по способу наименьших квадратов под условием $[\delta x_j^{+2}] + [\delta y_j^{+2}] = \min$.

6. Ср.кв. погрешность внутренней деформации вычисляется по известной формуле:

$$m_{\delta z_b^+} = \mu \sqrt{Q_{\Delta z_b^+}}, \quad (10)$$

в которой матрица весовых коэффициентов для декартовой системы координат:

$$Q_{\Delta z_b^+} = 2GQG^T. \quad (11)$$

В формуле (11) матрица $G = I - e(e^T e)^{-1} e^T$, (12)

где I - единичная матрица размера $2N(2N - \text{количество пунктов в сети})$;

e - матрица, составленная из частных производных равенств (7):

$$e = \begin{pmatrix} -\Delta y_1 & \Delta x_1 & 1 & 0 \\ \Delta x_1 & \Delta y_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\Delta y_N & \Delta x_N & 1 & 0 \\ \Delta x_N & \Delta y_N & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

7. Внутренняя деформация в декартовой и полярной системах координат представляется в матричном виде:

$$\Delta Z_D^+ = \begin{pmatrix} \delta x_1^+ \\ \delta y_1^+ \\ \dots \\ \delta x_N^+ \\ \delta y_N^+ \end{pmatrix}; \quad \Delta Z_p^+ = \begin{pmatrix} \delta R_1^+ \\ \delta A_1^+ \\ \dots \\ \delta R_N^+ \\ \delta A_N^+ \end{pmatrix}. \quad (14)$$

8. Переходим от декартовой системы координат к полярной следующим образом:

$$\Delta Z_p^+ = B_{2N \times 2N} \Delta Z_D^+, \quad (15)$$

где B – матрица, составленная из коэффициентов равенств, выражающих смещение координат по радиальному и азимутальному направлениям:

$$B = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 & & & & 0 \\ -\sin \alpha_1 \cos \alpha_1 & & & & \\ & \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 & & & \\ & -\sin \alpha_2 \cos \alpha_2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \cos \alpha_N \sin \alpha_N & \\ 0 & & & -\sin \alpha_N \cos \alpha_N & \end{pmatrix}. \quad (16)$$

9. Получаем матрицу весовых коэффициентов для полярной системы координат, пользуясь аналогичной матрицей для декартовой системы из уравнения текущего цикла нуль-свободной сети:

$$Q_{\Delta Z_p^+} = B Q_{\Delta Z_D^+} B^T. \quad (17)$$

10. Вычисляется ср. кв. погрешность определения внутренней деформации по приведённой ниже формуле (в общем виде) при использовании погрешности единицы веса для текущего цикла измерений:

$$m_{\delta Z_p^+} = \mu \sqrt{Q_{\Delta Z_p^+}}. \quad (18)$$

Алгоритм был использован при составлении вычислительной программы для компьютерной обработки деформационных измерений на УНК.

Достоверность определения внутренней деформации по приведённой методике подтверждалась проведённым сравнительным анализом результатов её вычисления с результатами, полученными по способу гармонического анализа и при уравнивании сети как свободной по методу наименьших квадратов. По известным формулам были получены величины внутренней деформации в полярной системе координат и их ср.кв. погрешности для модели полигонометрической сети в виде правильного 6-угольника, совпадающие при вычислении разными методами.

В шестой главе «Практическая реализация методических положений по развитию геодезического обоснования для обеспечения строительства и монтажа технологического оборудования УНК» обобщены результаты практической реализации разработок автора.

При создании наземной локальной астрономо-геодезической сети СКП измерения сторон была задана величиной $\pm 5\text{мм}$, углов – $1,2''$, астрономические измерения на 6-ти пунктах Лапласа проводились по 1-ому классу точности. Обработка геодезических измерений включала редуцированные вычисления с учётом выбранного осевого меридиана плоскости проекции Гаусса и приведением к принятой поверхности относимости. Анализ уравнивания нескольких циклов измерений показал, что наиболее слабым в точностном отношении пунктом оказался пункт 0012. СКП определения его координат: $m_x = 15,0\text{мм}$, $m_y = 22,0\text{мм}$ не превысили заданной техническим заданием предельной величины 25мм. Выбранная схема, метод создания наземной сети и качественные измерения позволили создать наземную геодезическую основу, соответствующую проектным требованиям.

Разработанная технология геодезических работ по развитию наземного и подземного обоснования при сооружении тоннеля обеспечила одну из главных задач – сбойку встречных подземных выработок в соответствии с заданными в техническом задании допусками. По результатам 6-ти сбоек макси-

мальная величина несбойки встречных осей тоннелей в плане составила 21мм при допуске 25мм, а по высоте – 13мм при допуске 15мм.

В результате математической обработки геодезических измерений и последовательного уравнивания маркшейдерской и монтажной сети с СКП исходных данных были получены результаты, приведённые в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты оценки точности исходных пунктов на отдельных этапах создания подземного геодезического обоснования

Средняя квадратическая погрешность (СКП)	Минимальное значение		Максимальное значение		Среднее значение	
	m_x , мм	m_y , мм	m_x , мм	m_y , мм	m_x , мм	m_y , мм
СКП приствольного пункта на поверхности относительно пункта тоннельной сети					3,9	4,1
СКП исходных пунктов маркшейдерской сети относительно пунктов наземной сети (из 19-ти передач)	4,0	2,8	9,9	10,3	6,1	6,1
СКП исходных пунктов маркшейдерской сети после уравнивания с ошиб. исход. данных	3,6	2,7	6,0	6,7	4,5	4,4
СКП исходных пунктов монтажной сети после уравнивания с ошибками исходных данных (12 пунктов)	1,6	2,6	4,8	5,3	3,6	3,7

Точность определения координат исходных пунктов маркшейдерской сети после уравнивания повысилась в 1,4 раза, после уравнивания монтажной сети – в 1,2 раза. При погрешности передачи координат на исходные квадруполи $0,5 \div 1,0$ мм, СКП определения их положения относительно пунктов наземной сети не превысят заданной техническим заданием величины 5,0мм.

Предложенная методика вычисления деформаций применялась при обработке восьми циклов плановых измерений наземной сети. Предварительно оценивалась точность полевых измерений. Усреднённые значения погрешностей определения углов и сторон $m_\beta = 1,18''$, $m_S = 4,8$ мм не превысили проектных значений. В результате уравнивания по специальной программе вычислялись величины деформаций в декартовой и полярной системах координат. На рисунке 6 приведены графики внутренней деформации пунктов по радиусу R и азимуту A в восьмом цикле измерений относительно первого.

Величины внутренних деформаций пунктов в радиальном направлении по результатам четырёхлетних наблюдений не превысили 13мм для кольцевой сети диаметра 6км. Точность определения внутренней деформации составила в среднем $m_{\delta R} = 9,8\text{мм}$.

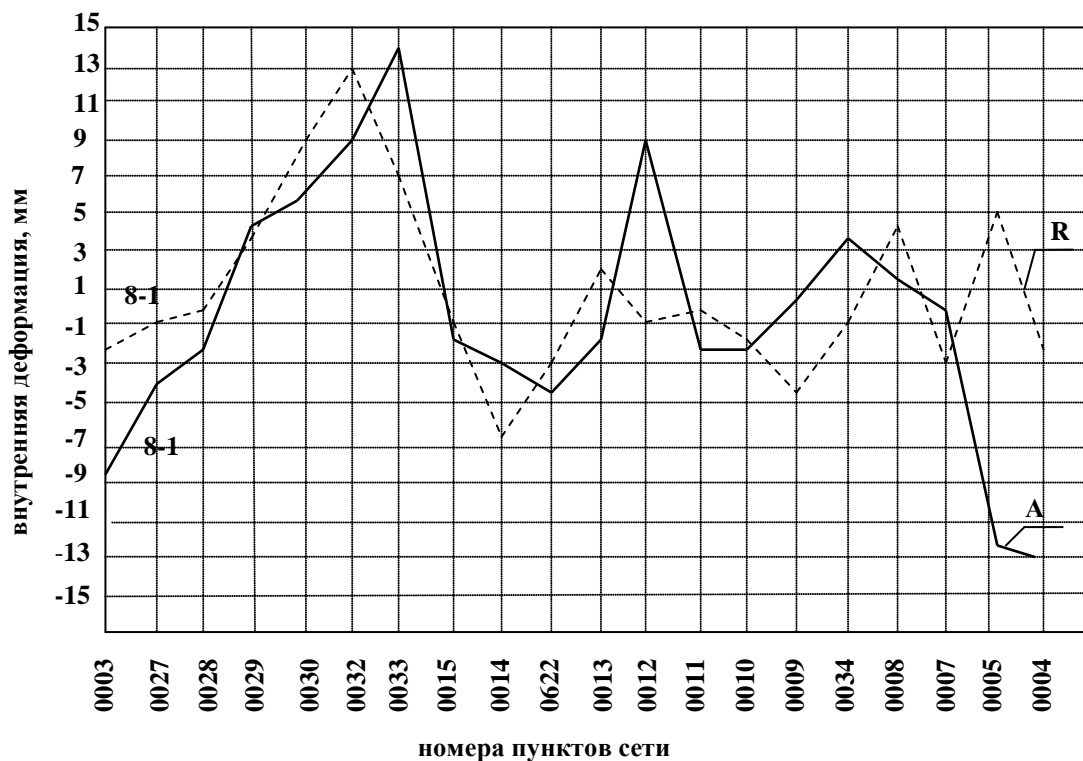


Рисунок 6- График внутренней деформации наземной плановой сети

Основные результаты исследований состоят в следующем:

1. Анализ результатов математического моделирования вариантов построения наземной геодезической основы (триангуляции, трилатерации, линейно-угловой сети, полигонометрии и специальной полигонометрии с измеренными астрономическими азимутами) показал, что выбор полигонометрической сети с измеренными астрономическими азимутами является наиболее оптимальным и с точки зрения обеспечения проектной точности, и по экономико-организационным показателям.
2. В результате решения редуционных задач автором предложено при вычислениях использовать осевой меридиан, максимально приближенный к центру кольцевого ускорителя. Расчёты показали, что при этом условии поправки в линейные и угловые измерения за переход на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера не вводятся на всех этапах создания наземного и подземного

обоснования. Необходимо вводить редуцирующие поправки в измеренные линии наземной полигонометрии (при длинах более 400м) при переходе к поверхности относимости со средней отметкой оси тоннеля 118м.

3. Теоретическое исследование, связанное с учётом влияния на результаты высотных измерений кривизны поверхности относимости при строительстве тоннеля и монтаже технологического оборудования, доказало достаточность использования в качестве этой поверхности в первом случае – сферы, во втором случае – эллипсоида. Автором рекомендуется вычисления производить относительно поверхности эллипсоида и вводить поправки за кривизну поверхности относимости при расчёте проектных высот орбиты ускорителя.

4. Разработанный метод оценки степени влияния неоднородности гравитационного поля на результаты высотных измерений по данным астрономо-геодезического нивелирования позволил выявить дополнительный наклон проектной плоскости кольцевого ускорителя (0,014мрад). Составляющая аномалии высоты, характеризующая однородность гравитационного поля ζ'_i , не учитывается, т.к. не деформирует плоскость орбиты ускорителя. Переменная составляющая V_{ζ_i} , характеризующая неоднородность гравитационного поля в пунктах Лапласа, имеет максимальную величину 1,18мм, соответствующую пределу точности измерений.

5. Разработан и применён алгоритм определения внутренней деформации плановых геодезических сетей на основе принципа конформного преобразования в полярной системе координат.

6. Выполненные исследования по оценке точности внедрённой технологии на всех этапах создания геодезического обоснования УНК позволили получить точностные данные для метрологической аттестации методик геодезических измерений в рабочих условиях строительства и монтажа УНК.

Публикации по теме диссертации

1. В.А.Горелов, Г.В.Глухов, Е.Д.Лавриненко. Создание планового геодезического обоснования при строительстве УНК. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка - 2002. №3 - с.3-14.

2. В.А.Горелов, Г.В.Глухов, Е.Д.Лавриненко. Принцип преемственности и его роль при построении геодезических сетей на поверхности и в тоннеле УНК. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка - 2002.№3 - с.15-21.
3. В.А.Горелов, Е.Д.Лавриненко, В.П.Савушкина. Влияние кривизны поверхности относимости при строительстве тоннеля и монтаже оборудования УНК по высоте. Современные методы проектирования, технической эксплуатации и реконструирования зданий и сооружений: Сборник трудов МГСУ - М, 2005 - с.145-147.
4. В.А.Горелов, Е.Д.Лавриненко. Методика обработки плановых деформаций наземной геодезической основы ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Геодезия. Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК: Сборник докладов – М, 2004 - с.242-250.
5. Е.Д.Лавриненко, В.А.Горелов, Л.Г.Шкулепова. Учёт влияния гравитационного поля по данным астрономо-геодезического нивелирования при монтаже технологического оборудования ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Современные технологии геодезического обеспечения строительства, монтажа и геотехнического мониторинга зданий и сооружений: Юбилейный сборник трудов МГСУ- М, 2006 - с.133-139.