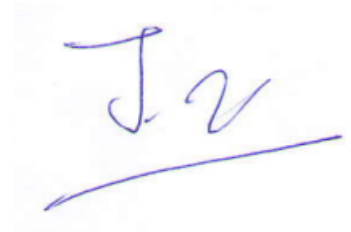


На правах рукописи



ДИНЬ ТХИ ЛЕ ХА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ СЕТЕЙ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ВО ВЬЕТНАМЕ**

Специальность: 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК)» на кафедре Прикладной геодезии.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Клюшин Евгений Борисович

Официальные оппоненты:

Шануров Геннадий Анатольевич
доктор технических наук, кафедра вышей геодезии,
профессор, Московский государственный университет
геодезии и картографии (МИИГАиК)

Визиров Юлий Васильевич
кандидат технических наук, кафедра геодезии,
геоинформатики и навигации, доцент, Московский
государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Ведущая организация:

Государственный университет по землеустройству (ГУЗ)

Защита состоится « 30 » мая 2013 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний Ученого совета.

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

Автореферат разослан « 29 » апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Климков Юрий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вьетнам – страна с бурно развивающейся экономикой, но при этом производство электроэнергии в настоящее время не соответствует возрастающим потребностям. Интенсивность развития гидроэнергетических проектов определяет масштабы и уровень модернизации страны, поэтому проблема развития энергетической отрасли приобретает особое значение. Для этого необходимо оптимальное сочетание различных областей науки и техники, в том числе и геодезических работ, которые непосредственно участвуют в процессах изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации и исследований инженерных сооружений. При строительстве гидроэлектростанций наиболее важным и ответственным видом геодезических работ является создание плановых опорных геодезических сетей и их эффективное использование.

Опорная геодезическая сеть создаётся на начальном этапе строительства и является основой для всех дальнейших разбивочных работ и исполнительной съемки. Точность создания таких сетей выше по сравнению с геодезическими сетями, создаваемыми на этапе изысканий. Таким образом, разработка оптимальных методов создания и использования опорных геодезических сетей для строительства крупных инженерных сооружений является актуальной и важной научной задачей. Раньше во Вьетнаме при строительстве гидроэлектростанций создавались геодезические опорные сети с использованием триангуляции, а в настоящее время геодезические опорные сети могут создаваться с использованием спутниковой аппаратуры, которая наиболее экономически эффективна и обеспечивает высокую точность. Применение спутниковых технологий при создании опорной геодезической сети является важным дополнением к традиционным методам создания наземных сетей.

Цель работы. Разработка методики создания плановой опорной сети без этапа преобразования координат с использованием спутниковых методов измерений.

Научная новизна работы.

1. Выполнен анализ особенностей метода преобразования координат, вычисленных по результатам спутниковых измерений.
2. Проанализирована методика создания плановой опорной геодезической сети с

использованием спутниковых методов измерений.

3. Выполнен анализ точности и разработана оптимальная методика создания высокоточных опорных геодезических сетей при строительстве гидроэлектростанций.

4. Разработанная методика позволяет одновременно с определением координат пунктов плановой опорной сети в местной системе координат определять и координаты пунктов, закрепляющих оси плотины.

5. Обосновано, что при использовании предложенной методики нет необходимости в вычислении параметров преобразования координат – наиболее сложного и ответственного этапа всех ранее известных методик.

6. Разработана методика выноса на местность осей сооружений по результатам спутниковых измерений.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается совпадением результатов анализа точности с результатами математического моделирования, а также с результатами производственных измерений.

Практическая значимость. В диссертации подробно проанализированы различные пути построения планового обоснования для строительства плотин ГЭС, как наиболее важного и ответственного объекта строительства, и сделан вывод, что на современном этапе наиболее перспективным является разумное сочетание традиционных методов измерений с использованием современных высокоточных электронных тахеометров и спутниковых средств измерений. Для обеспечения эффективного сочетания современных средств измерений в диссертации приведена новая методика построения плановых опорных сетей при строительстве гидроэнергетических объектов.

Апробация работы. По материалам диссертации опубликованы три статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, основное содержание диссертации докладывалось и обсуждалось на четырех научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в 2010, 2011, 2012 и 2013 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 145 страниц машинописного текста, состоит из введения, четырех разделов с подразделами, включающих в себя 24 таблицы и 29 рисунков, заключения и приложения. Список литературы содержит 76 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, определена цель работы и сформулированы основные направления исследований.

Глава 1. Спутниковые технологии в современной геодезии

Рассмотрены особенности спутниковых технологий в современной геодезии; изучены основные источники ошибок спутниковых методов измерений; методы и режимы наблюдений; обобщен опыт применения спутниковых технологий в геодезических работах во Вьетнаме. Отмечается, что во Вьетнаме применение спутниковых технологий в геодезии не столь широко применяется, как в других странах, но оно постепенно заменяет традиционные методы измерений при создании геодезических сетей.

Спутниковые методы были широко использованы при развитии геодезических сетей Вьетнама в таких областях как Минь Хай, Шонг Бе, Тхай Нгуен. Также была создана опорная сеть на острове Хоанг Ша (главный остров Вьетнама), которая связана с государственной геодезической сетью. В результате такой работы выполнена связь островов Вьетнама с материком. Тем не менее, во Вьетнаме при создании опорных геодезических сетей с использованием спутниковых технологий больше доверяют опыту, а не тщательным исследованием точности сетей. При обработке GPS-измерений используют программы, которые предоставляются производителями с неизвестными алгоритмами обработки, а проблемы обработки результатов GPS-измерений при строительстве ГЭС до сих пор всесторонне не изучены. В имеющихся нормативных документах не приводятся сведений о методах проектирования и расчёта точности опорных геодезических сетей, которые создаются с использованием спутниковых технологий при строительстве ГЭС. В связи с этим разработки, выполненные автором диссертации, исключительно актуальны для Вьетнама.

Глава 2. Опорные геодезические сети при строительстве гидроэлектростанций

При создании гидротехнической сети выбор поверхности относимости и системы координат имеет целью обеспечение достаточной точности при выносе осей ГЭС и сооружений. Сеть редуцируют не на поверхность референц-эллипсоида, как это делается для государственных сетей, а на поверхность относимости с высотой H_0 . Поправка за отнесение базисной стороны на поверхность относимости ΔS_H вычисляется по форму-

ле: $\Delta S_H / S = -(H_m - H_0) / R_m$, где S – длина измеренной стороны; H_m – средняя отметка измеренной стороны; H_0 – отметка поверхности относимости; R_m – средний радиус кривизны земного эллипсоида.

Точность современных спутниковых методов измерений составляет единицы миллиметров при коротких расстояниях, следовательно, $\Delta S_H R / S = \pm 13$ м, т. е. при разности отметок местности и поверхности относимости меньше 13 м поправку ΔS_H можно не учитывать. Современные плотины существенно превышают этот допуск. Положение поверхности относимости должно быть строго оговорено: она должна быть перпендикулярна к отвесной линии на строящемся объекте. Если электронный тахеометр расположен на разных пунктах опорной сети, то редуцирование результатов измерений будет производиться на различные поверхности относимости, нормальные к отвесной линии в точке стояния инструмента, а выносимые стороны плотины будут развернуты относительно друг друга на угол $\varphi = \rho S_{AB} / R$, где S_{AB} – расстояние между пунктами; R – радиус Земли. Это приведет к искажениям длин линий на монтажном горизонте на величину $\delta_s = S_{AB} H / R$; $\delta_s \approx 1 \cdot 10^{-4} H$ при расстоянии 630 м, что при $H > 100$ м существенно превосходит современные допуски искажений в опорных сетях. По мнению автора диссертации, допустимое искажение, как отношение средней квадратической ошибки редуцирования к длине линии m_s / S , должно быть ужесточено (табл. 1).

Таблица 1. Допустимые искажения

Класс опорной сети	Относительная ошибка стороны, m_s / S	Расстояния между поверхностями относимости ΔH , м
I	1: 500 000	26
II	1: 300 000	43
III	1: 200 000	64

Величины ΔH в табл. 1 и $(H_m - H_0)$ находятся в соотношении $\Delta H = 2 |H_m - H_0|$. По глубокому убеждению автора диссертации, разность высот поверхностей относимости ΔH более показательна, чем уклонения от средней высоты $(H_m - H_0)$.

При использовании высокоточных современных средств измерений целесообразно пересмотреть допуски в сторону уменьшения допустимых искажений координат пунктов в государственных геодезических сетях, вызванных удалением от осевого меридиана. Рекомендуемые автором диссертации допуски приведены в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендуемые допуски

Класс опорной сети	Относительная ошибка стороны	Удаление от осевого меридиана Y_m , км
I	1: 500 000	12,7
II	1: 300 000	16,4
III	1: 200 000	20

При строительстве крупных инженерных сооружений следует использовать следующий прием: главные оси объекта выносятся с использованием пунктов государственной геодезической сети; создается локальная сеть, редуцированная на выбранную поверхность относимости; разбивочные работы выполняются относительно пунктов локальной сети. Этот прием обладает определенными преимуществами, но и он не лишён недостатков.

При создании опорных геодезических сетей для строительства ГЭС предрасчёт точности сети производят строгим способом по следующей методике: выбор неизвестных – неизвестными являются определяемые величины – координаты пунктов; формирование матрицы коэффициентов уравнений поправок; формирование матрицы коэффициентов нормальных уравнений; вычисление обратной матрицы; предвычисление точности построения сети.

На основе языка программирования Visual Basic автор диссертации написала программу предрасчёта точности опорной геодезической сети. В качестве примера выполнен предрасчёт точности опорной геодезической сети ГЭС Сон Ла. Оценка показала, что относительная ошибка определения длины слабой стороны сети составляет 1:157100, а самый слабый дирекционный угол сети определяется с точностью 1,42". Эта точность достигается при использовании высокоточных электронных тахеометров и длительных полевых измерений. Длительность линейных и угловых измерений на одном пункте занимает ~3 ч, а при использовании спутниковых методов измерений достаточную точность можно обеспечить при длительности сеанса наблюдений ~40 мин.

Глава 3. Обработка результатов измерений опорной геодезической сети

В настоящее время во Вьетнаме параллельно используются две системы координат: Вьетнамская государственная система геодезических координат 2000 г. VN-2000 и Ханойская государственная система геодезических координат 1972 г. HN-72.

При использовании спутниковых методов измерений в государственных геодезических сетях Вьетнама в зависимости от решаемых задач приходится переходить из системы координат ПЗ-90 или WGS-84 в систему координат HN-72 или VN-2000. При

этом целесообразно использовать два основных метода преобразования координат, которые графически можно представить в следующем виде.

Первый путь (для системы координат VN-2000). Порядок обработки результатов спутниковых измерений при преобразовании координат показан на рис. 1.

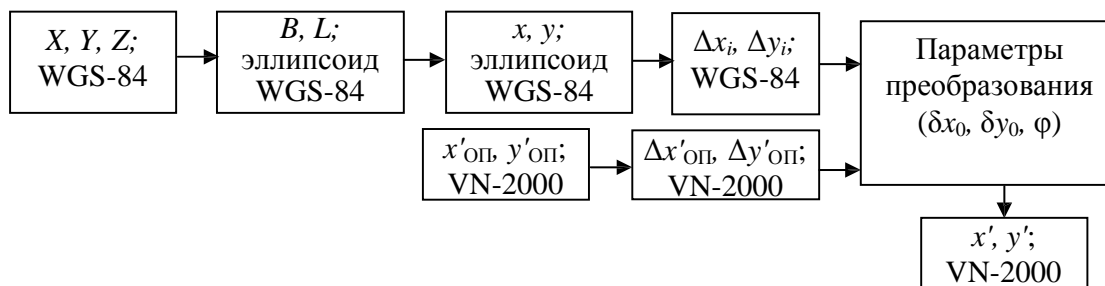


Рисунок 1

На рис. 1: X, Y, Z ; WGS-84 – пространственные прямоугольные координаты опорных пунктов в системе координат WGS-84, полученные по результатам спутниковых измерений; B, L ; эллипсоид WGS-84 – криволинейные координаты опорных пунктов в системе координат WGS-84 на общеземном эллипсоиде WGS-84; x, y ; эллипсоид WGS-84 – прямоугольные координаты опорных пунктов в системе координат WGS-84 на общеземном эллипсоиде WGS-84 в проекции UTM; $\Delta x_i, \Delta y_i$; WGS-84 – разности координат между опорными пунктами, вычисленные по результатам спутниковых измерений; $x'_{оп}, y'_{оп}$; VN-2000 – прямоугольные координаты опорных пунктов в государственной геодезической системе координат VN-2000 на общеземном эллипсоиде WGS-84; $\Delta x'_{оп}, \Delta y'_{оп}$; VN-2000 – разности координат между опорными пунктами в государственной геодезической системе координат VN-2000; параметры преобразования $\delta x_0, \delta y_0, \varphi$ – параметры преобразования прямоугольных координат x, y , полученных по результатам спутниковых измерений в системе координат VN-2000 (проекция UTM); x', y' ; VN-2000 – преобразованные прямоугольные координаты пунктов по результатам спутниковых измерений в государственной системе координат VN-2000 (проекция UTM).

В связи с тем, что в данном алгоритме использовались значения координат, которые по определению являются зависимыми величинами, а не измеренными величинами (время, фаза), оценка точности по стандартной методике приводит к искаженным значениям. Тем не менее, этот метод не требует знания аномалий высот, и ошибки вычисления геодезических высот не искажают преобразованные координаты.

Второй путь: в этом случае схема последовательности вычислений иная (рис. 2).

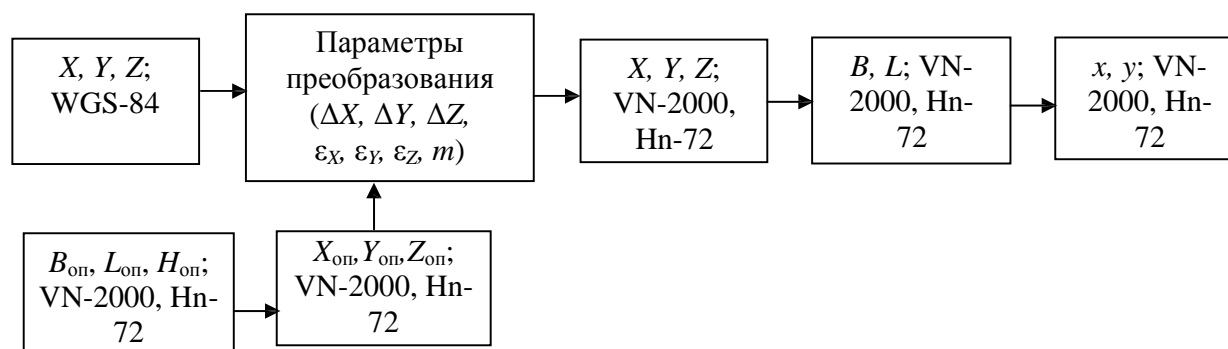


Рисунок 2

На рис 2: параметры преобразования $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z, m)$ – параметры преобразования координат пунктов, вычисленных по результатам спутниковых измерений из системы координат WGS-84 в государственную геодезическую систему координат VN-2000 или Hн-72; $X, Y, Z; VN-2000, Hн-72$ – пространственные прямоугольные координаты определяемых пунктов в системах координат VN-2000 или Hн-72, полученные из результатов спутниковых измерений; $X_{оп}, Y_{оп}, Z_{оп}; VN-2000, Hн-72$ – пространственные прямоугольные координаты опорных пунктов в системе координат VN-2000 или Hн-72; $B_{оп}, L_{оп}, H_{оп}; VN-2000, Hн-72$ – криволинейные координаты опорных пунктов в государственных геодезических системах координат VN-2000 (на эллипсоиде WGS-84) или Hн-72 (на эллипсоиде Красовского); $x, y; VN-2000, Hн-72$ – прямоугольные координаты определяемых пунктов в государственной геодезической системе координат VN-2000 (на эллипсоиде WGS-84 в проекции UTM) или в государственной геодезической системе координат Hн-72 (на эллипсоиде Красовского в проекции Гаусса).

Как и в первом случае, применение метода наименьших квадратов в случае зависимых величин не позволяет выполнить объективную оценку точности. В результате создаётся иллюзия, что возможно вычисление смещений начал координат с точностью до миллиметров, а углов разворота – до малых долей угловой секунды. Необходимо помнить, что начало координат в наиболее точной системе координат – WGS-84 определено с ошибкой 1 м, а в системах координат VN-2000 и Hн-72 существенно грубее. И невозможно с опорных пунктов, удаленных друг относительно друга на 5–6 км, засечь начало координат (центр Земли) под углом засечки $\sim 3'$ с ошибкой до миллиметра. Реально эта ошибка составляет несколько десятков метров.

Получив параметры преобразования, вычисляют декартовы координаты пунктов в системах координат VN-2000 или Нп-72, а затем криволинейные координаты этих пунктов (B , L , H), используя параметры эллипсоида WGS-84 (для системы координат VN-2000) или эллипсоида Красовского (для системы координат Нп-72), а затем координаты в проекции Гаусса или UTM. Подводя итог выполненному анализу, следует признать, что первой путь более предпочтителен, так как потенциально обладает более высокой точностью. Основное, что следует помнить при вычислении параметров преобразования с использованием координат пунктов в проекции Гаусса – это то, что они могут иметь существенные искажения при удалении от осевого меридиана (в проекции Гаусса) или от линий нулевых искажений (в проекции UTM). Следовательно, прежде чем приступать к обработке результатов измерений, необходимо перенести осевой меридиан в район работ так, чтобы строительная площадка была удалена от осевого меридиана не более чем на 20 км.

В геодезии нет единой трехмерной системы координат. Имеется лишь криволинейная двумерная система координат (широта B и долгота L относительно отсчетного эллипсоида), либо ее аналог в координатах проекции Гаусса, которая, по сути, также является криволинейной системой координат, где по оси абсцисс откладывается длина дуги меридиана, а по оси ординат используют ограниченную зону в 3° или в 6° , причем внутри зоны искажения считаются допустимыми. Третья координата – нормальная высота – практически не имеет связи с центром масс Земли, а отсчитывается от собственной поверхности относимости – квазигеоида.

Отсутствие информации о точном значении аномалии высот существенно осложняет переход из прямоугольной системы координат в криволинейную и может вносить заметные искажения в координаты. Для перехода из системы координат WGS-84 в геодезическую систему координат, используемую на конкретном объекте, рекомендовано определять три угла разворота осей координат (α , β и γ), три величины смещения начал координат (ΔX , ΔY , ΔZ) и, если это необходимо, масштабный коэффициент μ . Точность определения масштабного коэффициента существенно зависит от точности взаимного положения пунктов в криволинейной системе координат. В тех случаях, когда

используются местные системы координат, например, в зоне строительства, в которых координаты пунктов не соответствуют реальной кривизне Земли, искажения могут быть еще больше. Отсутствие тщательного анализа точности метода преобразования координат, рекомендуемого фирмами, распространяющими геодезические спутниковые приемники, приводит к ошибочному выводу о том, что возможно определение смещения начал координат с точностью до 1 мм, а разворота осей координат – до малых долей угловых секунд.

Таким образом, для сохранения высокой точности определения приращений координат, вычисленных по результатам фазовых измерений, необходим иной алгоритм преобразования координат, свободный от перечисленных недостатков, причем каждый шаг преобразования должен сопровождаться детальным анализом точности.

Считается, что локальные геодезические сети – это плоские сети. Анализ искажений, вносимых кривизной Земли в плановые геодезические сети, показывает, что при размерах сети >4 км необходимо учитывать эти искажения.

О плоскости, в которой используются привычные в геодезии расчетные формулы, можно говорить лишь в пределах одной стоянки инструмента. При смене точки стояния инструмента организуется новая плоскость, нормальная по отношению к отвесной линии, но отличающаяся от предыдущей. При разности расстояний между точками стояния инструмента на 2 км линии горизонта различаются на величину около $1'$; это означает, что угол наклона линии, соединяющей два пункта, не является однозначной величиной, так как каждая точка линии имеет собственную величину угла наклона.

При выполнении измерений кривизна Земли учитывается методическими приемами путем установки инструмента по отвесной линии с помощью уровня. Это обстоятельство необходимо учитывать при обработке результатов спутниковых измерений.

Глава 4. Методика создания плановой опорной сети для строительства плотин

Разработка проекта плановой инженерно-геодезической сети, создаваемой спутниковым методом, принципиально отличается от проектов инженерно-геодезических сетей с использованием традиционных геодезических приборов. В сетях, создаваемых спутниковым методом, взаимное расположение определяемых пунктов не влияет на точность оп-

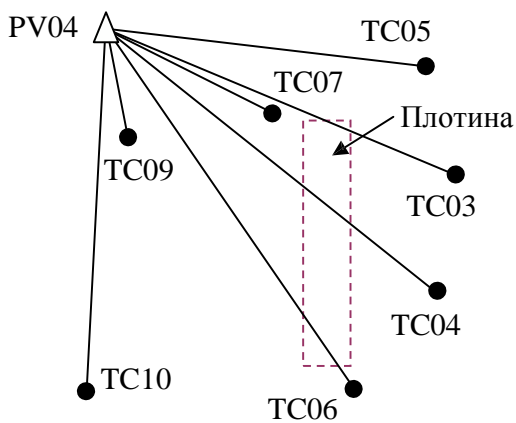


Рисунок 3

располагается на остальных пунктах. В пунктах TC01, TC02, TC08, TC11 выполнять измерения не обязательно, так как они использовались в линейно-угловой сети как вспомогательные, обеспечивающие избыточные измерения в сети. В такой сети нет избыточных измерений, и не возникает задача уравнивания приращений координат, но имеются два серьёзных недостатка.

1. Сеть опирается только на один твердый пункт, и если в случае потери этого пункта или в процессе строительства обнаружится, что он не стабилен, то могут возникнуть серьёзные проблемы при разбивочных работах.

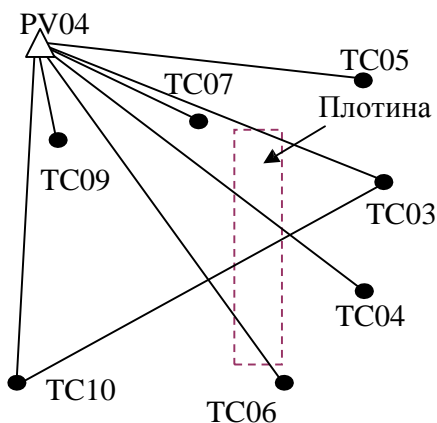


Рисунок 4

нужно дополнительное измерение на пункте TC03 и TC10.

2. В сети нет избыточных измерений, что не позволяет выполнить объективный контроль качества полевых измерений. Избыточные измерения могут быть обеспечены, если в полевых работах используется большее количество спутниковых приемников, либо пара приемников была установлена дополнительно на пунктах TC03 и TC10 (рис. 4).

В треугольнике, образованном пунктами PV04, TC03, TC10, приращения координат вдоль сторон PV04-TC03, TC03-TC10, TC10-PV04 вычислены по парам спутниковых приемников. В таких сетях возникают дополнительные условия замкнутых полигонов, позволяющие выполнить уравнивание сети. Такое уравнивание не является строгим, так как вычисляются поправки не к измеренным величинам, а к их функциям – приращениям координат $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$, вычисленным по одним и тем же фазовым циклам. Учитывая, что

результаты спутниковых измерений являются весьма точными величинами, а невязки полигонов в инженерно-геодезических сетях не превышают, как правило, 7–8 мм, этот прием вполне удовлетворяет задачам инженерной геодезии. Для того чтобы повысить надежность обеспечения сохранности плановой опорной сети, следует использовать не менее двух опорных пунктов, расположенных в местах, обеспечивающих их сохранность и стабильность положения (рис. 5). Такая сеть имеет ряд преимуществ: достаточная надежность сети; имеется объективный контроль качества полевых измерений; высокая

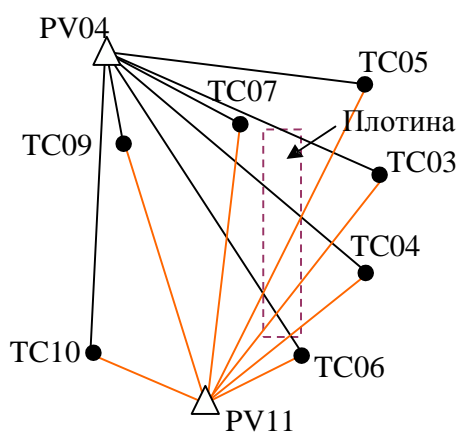


Рисунок 5

точность определения координат пунктов при минимальном количестве измерений. В сети на каждом определяемом пункте выполнены двойные измерения, и ошибки координат определяемых пунктов будут, по крайней мере, в $\sqrt{2}$ раз меньше, т.е. иметь среднюю квадратическую ошибку $\sim 3 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6}S$, что соответствует точности, полученной при использовании линейно-угловой сети при существенно меньшем количестве полевых измерений.

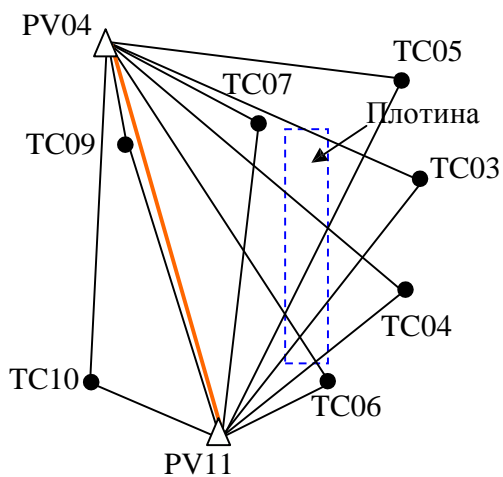


Рисунок 6

В качестве примера выполнен предрасчет точности плановой опорной инженерно-геодезической сети для ГЭС Сон Ла. В качестве опорных пунктов используются два пункта: PV04, PV11. Определяемыми пунктами будут только те, с которых планируется вести разбивочные работы. На опорных пунктах постоянно установлены базовые спутниковые приемники. На определяемых пунктах полевые измерения выполняются одним спутниковым приемником (сеанс измерений 1 ч). Такая схема измерений будет отличаться от схемы (рис. 5), так как дополнительно будут определены разности координат пунктов PV04 и PV11 (рис. 6).

На рис. 6 стабильные пункты PV04 и PV11 соединены двойной чертой, потому что эта пара приемников совместно работала весь период времени, пока третий прием-

ник перемещался по всем определяемым пунктам. В сети возникает семь замкнутых полигонов, невязки которых целесообразно использовать для контроля качества полевых измерений и для уравнивания сети. Оценка точности выполнялась по формуле

$$m_{\Delta X} = m_{\Delta Y} = m_{\Delta Z} = m_{\Delta} = 5 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} S.$$

Максимальная средняя квадратическая ошибка приращений координат составила величину 8,9 мм.

В качестве исходного пункта с произвольными исходными координатами прием один стабильный пункт PV04, чтобы избежать процесса преобразования координат. Второй стабильный пункт PV11 также будет определяемым, но, если на определяемых пунктах выполнять измерения длительностью, например, 1 ч, то на пунктах PV04 и PV11 спутниковые приемники работают весь период, например, общей длительностью 11 ч. В таких случаях на практике считается целесообразным разделить весь период наблюдений на 11 часовых сеансов и обработать их отдельно. За окончательное значение приращений координат принимается среднее арифметическое значение. Средняя квадратическая ошибка осреднённых значений разностей координат пунктов PV04–PV11 будет близка к величине: $m_{\Delta_{PV04-PV11}} = 5 \text{ мм} / \sqrt{11} + 1 \cdot 10^{-6} S = 2,9 \text{ мм}$.

В таком случае в плановой опорной геодезической сети ГЭС Сон Ла, создаваемой спутниковым методом, будет семь избыточных измерений, которые позволят вы-

числить 21 условие вида: $\sum_{i=1}^n \Delta X_i + \omega_x = 0$; $\sum_{i=1}^n \Delta Y_i + \omega_y = 0$; $\sum_{i=1}^n \Delta Z_i + \omega_z = 0$.

Контроль полевых измерений позволяет объективно судить о качестве полевых измерений, а избыточные измерения позволяют выполнить уравнивание сети. Результат предрасчета точности геодезической сети показал, что наибольшая средняя квадратическая ошибка имеет величину 5,9 мм для пунктов TC03, TC04.

Из приведенного примера видно, что точность уравненных значений приращений координат не уступает точности сети, создаваемой линейно-угловым методом, а по трудозатратам существенно выгоднее.

После того как выполнено уравнивание результатов полевых измерений, необходимо вычислить координаты пунктов плановой сети в системе координат, удобной для

выполнения разбивочных работ как с использованием спутниковых методов, так и с использованием электронных тахеометров. По результатам кодовых измерений вычисляются координаты опорного пункта PV04 и, используя уравненные значения приращений координат, вычисляются координаты всех остальных пунктов. Используя вычисленные декартовы координаты пунктов плановой опорной сети и параметры вспомогательного эллипсоида $a' = a[1 + (H_{cp}/R)]$; $b' = b[1 + (H_{cp}/R)]$, вычисляются криволинейные координаты B_i и L_i . Затем определяются координаты этих пунктов x_i и y_i в проекции Гаусса. За окончательный результат обработки спутниковых измерений необходимо взять только разности координат пунктов Δx_i , Δy_i . Назначив координаты исходного пункта PV04, вычисляются локальные координаты всех остальных пунктов плановой опорной сети. Координаты стабильного пункта PV11 будут использоваться в дальнейшем в основном для контроля стабильности положения исходных пунктов плановой опорной сети, устанавливая на пунктах PV04 и PV11 спутниковые приемники раз в квартал, контролируя стабильность приращений координат между твердыми пунктами PV04 и PV11 в геоцентрической декартовой системе координат WGS-84.

Особенности создания плановой опорной геодезической сети позволяют сделать следующие выводы:

- независимо от того, в какой системе координат выполнены спутниковые измерения, WGS-84 или ПЗ-90, из пространственной декартовой системы координат в инженерно-геодезических сетях целесообразно переходить к криволинейным координатам и использовать в дальнейшем высокоточные приращения координат в проекции Гаусса;

- координаты вспомогательных пунктов для выноса осей сооружений должны быть определены в государственной системе координат;

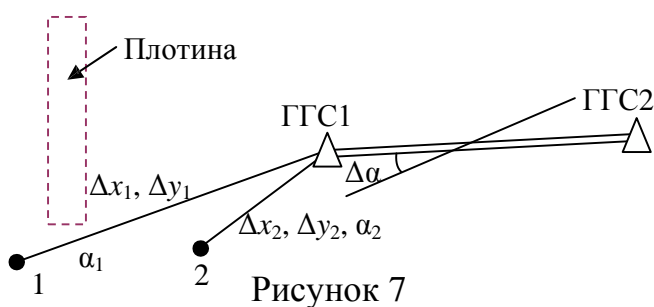
- координаты пунктов плановой разбивочной сети следует редуцировать на поверхность относимости, высота которой равна средней высоте строящейся плотины, т.е. на строительной площадке должны быть пункты, координаты которых отнесены к двум различным системам координат;

- переход от государственной системы координат к местной выгодно осуществлять на том этапе, где допуски на выполнение геодезических работ наиболее слабые.

Таким этапом геодезических работ является вынос на местность главных или основных осей объекта со средней квадратической ошибкой не менее 5–10 см.

Для выноса осей строящегося сооружения на местность спутниковым методом целесообразно выбрать два пункта ГГС, наиболее близко расположенных к району будущего строительства, установить на них спутниковые приемники и выполнить фазовые измерения длительностью 20–40 мин. В результате измерений вычисляются: декартовы координаты одного из пунктов X, Y, Z , со средней квадратической ошибкой не более 5 м и разности координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ со средней квадратической ошибкой – 5 мм + $2 \cdot 10^{-6} S$. По вычисленным координатам пунктов вычисляются криволинейные координаты пунктов для того эллипсоида, который использовался при вычислении координат ГГС; для Вьетнама либо эллипсоид Красовского, либо эллипсоид WGS-84 (в районе ГЭС Сон Ла – эллипсоид WGS-84). Затем вычисляются координаты и разности координат пунктов в проекции Гаусса: $\Delta x_s, \Delta y_s$. Эти величины позволяют выполнить контроль качества спутниковых измерений и качества координат выбранных пунктов ГГС, так как расстояние, вычисленное по координатам этих пунктов, должно равняться расстоянию, вычисленному по результатам спутниковых измерений:

$\sqrt{\Delta x_{ГГС}^2 + \Delta y_{ГГС}^2} = \sqrt{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2}$. По этим же координатам вычисляются дирекционные углы $\text{tg}\alpha_{ГГС} = \Delta y_{ГГС} / \Delta x_{ГГС}, \text{tg}\alpha_s = \Delta y_s / \Delta x_s$, и находится их разность $\alpha_{ГГС} - \alpha_s = \Delta\alpha$.



Вблизи будущей плотины закладываются пункты 1 и 2 (рис. 7), в качестве опорного пункта целесообразно использовать пункт, наиболее близко расположенный к месту строительства (ГГС1). На пунктах 1 и 2 совместно с опорным пунктом ГГС1 выполняются спутниковые наблюдения сеансом 20–40 мин.

Для пунктов 1 и 2, также как и для пунктов ГГС1, ГГС2, вычисляются разности координат между пунктами ГГС1 и 1, 2: $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2$ и Δy_2 , расстояния

$S_1 = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}; S_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2}$ и дирекционные углы $\text{tg}\alpha_1 = \Delta y_1 / \Delta x_1; \text{tg}\alpha_2 = \Delta y_2 / \Delta x_2$.

Дирекционные углы исправляются с учетом поправки $\alpha_{ГГС} - \alpha_S = \Delta\alpha$:

$$\alpha_{1ис} = \alpha_1 + \Delta\alpha; \alpha_{2ис} = \alpha_2 + \Delta\alpha$$

и вычисляются координаты вспомогательных пунктов 1 и 2 в системе координат ГГС:

$$x_1 = x_{ГГС1} + S_1 \cos \alpha_{1ис}; y_1 = y_{ГГС1} + S_1 \sin \alpha_{1ис}; x_2 = x_{ГГС1} + S_2 \cos \alpha_{2ис}; y_2 = y_{ГГС1} + S_2 \sin \alpha_{2ис}.$$

Разбивку осей с пунктов 1 и 2 при наличии прямой видимости можно выполнить как спутниковым методом, так и электронным тахеометром.

Разработанная автором методика обладает рядом преимуществ:

- нет необходимости в вычислении параметров преобразования с использованием значений геодезических высот, которые обычно известны недостаточно точно;
- все вычисления координат и их функций выполнены с использованием строгих формул;
- переход от координат пунктов в государственной геодезической системе координат к местной системе координат осуществлен на пунктах, закрепляющих оси строящегося объекта, точность выноса которых составляет ~ 10 см, следовательно, спутниковые измерения практически не вносят заметных искажений в этот этап работ.

Отличительной особенностью разработанной в диссертации методики является то, что одновременно с определением координат пунктов плановой опорной сети в местной системе координат определяются и координаты пунктов, закрепляющие оси плотины. Таким образом, координаты пунктов опорной сети и пунктов осей плотины определяются в единой системе координат с высокой точностью, свойственной спутниковым методам измерений. В таком случае отпадает необходимость в вычислении параметров преобразования координат – наиболее сложного и ответственного этапа всех ранее известных методик.

После того как оси объекта вынесены в натуру и закреплены, можно приступать к созданию плановой опорной разбивочной сети. При этом плановая разбивочная сеть, созданная спутниковым методом, должна учитывать кривизну Земли в районе работ на средней высоте строящегося объекта за счет использования вспомогательного эллипсоида, поверхность которого проходит через среднюю высоту строящегося объекта.

Создание плановых опорных сетей при строительстве крупных плотин сопряжено с некоторыми трудностями: пункты опорной сети не всегда удается разместить

вблизи оси плотины из-за значительных территорий, затопляемых водохранилищем; при изменении нагрузки, вызванной массой плотины и воды водохранилища, неизбежны осадки территории вблизи водохранилища; вблизи создаваемого водохранилища существенно изменяется уровень грунтовых вод, что приводит к деформациям земной поверхности. Эти обстоятельства вынуждают располагать пункты плановой опорной сети в нижнем бьефе на значительных расстояниях (1–2 км) от оси плотины, а это приводит к новым трудностям при выполнении разбивочных работ.

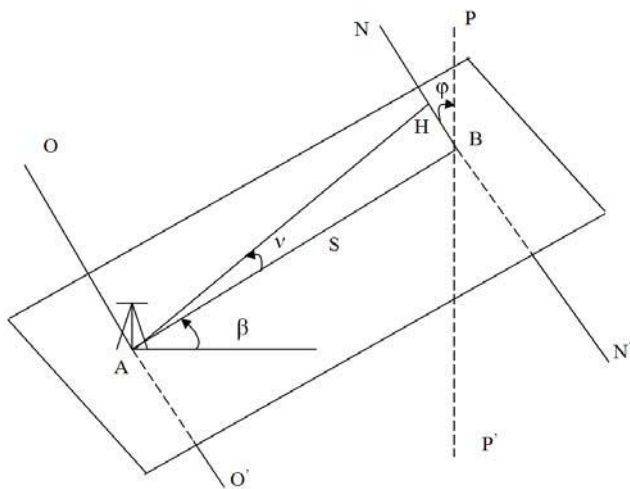


Рисунок 8

При строительстве высоких плотин, когда пункты опорной сети удалены на значительные расстояния, использование прямых и обратных засечек при разбивочных работах может приводить к существенным рассогласованиям из-за непараллельности отвесных линий в пунктах стояния инструментов. На рис. 8 демонстрируется ситуация выполнения разбивочных работ, когда инструмент установлен на пункте плановой

опорной сети A . В этом случае плоскость, к которой будут приведены все результаты расчета, перпендикулярна отвесной линии OO' в точке стояния инструмента. В этой системе отсчета плотина будет считаться отвесной, если она будет построена вдоль оси $NN' \parallel OO'$. Однако, если на оси плотины в пункте B будет поставлен прибор вертикального проецирования, то плотина будет возводиться по оси PP' , что и должно соответствовать условиям строительства. Если на монтажный горизонт координаты будут передаваться полярным методом, то плотина будет построена по оси NN' , которая будет отстоять от оси PP' на величину

$$\delta = (H - H_A) \sin \varphi = \frac{S(H - H_A)}{R},$$

где H – высота монтажного горизонта; H_A – высота пункта A ; S – расстояние между опорным пунктом и плотиной; R – радиус Земли.

Например, при $S = 1000$ м, $H - H_A = 200$ м, $R = 6371$ км, $\delta = 31,4$ мм, что недопустимо при разбивочных работах, и при больших высотах плотины эта величина будет возрастать.

Ситуация может существенно осложниться, если часть разбивочных работ выполнять с пунктов опорной сети (прямые засечки), а часть – с монтажного горизонта (обратные засечки). Ошибки выноса пунктов разбивочных сетей, расположенных на монтажном горизонте, в таком случае увеличатся более чем в два раза и могут почти на порядок превосходить требуемую точность разбивочных работ. В связи с тем, что в технической и нормативной литературе эти вопросы не рассмотрены, а величины возможных ошибок весьма значительны, рассмотрим влияние непараллельности отвесных линий на пунктах опорных сетей и монтажном горизонте более детально.

Обычно понятия прямая засечка и обратная засечка относятся только к угловым засечкам и не применяются при использовании линейных измерений. Однако, как будет показано далее, для разбивочных работ это имеет принципиальное значение. В связи с этим в данной работе под понятием прямая засечка (линейная или угловая) понимаются измерения с пунктов опорной геодезической сети на визирную цель, расположенную на монтажном горизонте. Под понятием обратная засечка (линейная или угловая) понимаются измерения с определяемого пункта на монтажном горизонте на визирные цели, расположенные на пунктах опорной геодезической сети.

Вначале рассмотрим особенности определения приращений координат между пунктами опорной геодезической сети. При создании опорной геодезической сети с использованием электронных тахеометров, как правило, линейные измерения выполняются в прямом и обратном направлениях. Однако в технической и нормативной литературе не оговаривается положение поверхности, в которой будут определены приращения координат. В статье: Ключин Е.Б., Кравчук И.М., Чинь Тхань Чыонг, Чан Куанг Хок «Учет влияния кривизны Земли при инженерно-геодезических работах» (Изв. вузов, «Геодезия и аэрофотосъемка», № 1, 2012 г.) показана целесообразность вычисления среднего значения горизонтального проложения из измерений длины линии в двух направлениях, или при измерении линии в одном направлении горизонтальное проложение S вычислять по формуле:

$$S = D \cos v - \frac{Dh}{2R} - \frac{D^3}{4R^2}, \quad (1)$$

где D – наклонное расстояние; v – вертикальный угол; h – превышение между пунктами; R – радиус Земли.

К аналогичному выводу пришла и автор диссертации, используя следующие положения. Часто горизонтальное проложение находят не по формуле $S = D \cos v$,

а по формуле
$$S' = \sqrt{D^2 - h_H^2}, \quad (2)$$

где h_H – разность высот пунктов на концах измеряемой линии, известная из результатов геометрического нивелирования либо по результатам тригонометрического нивелирования с поправкой за кривизну Земли.

Причем величина h , вычисленная по формулам тригонометрического нивелирования

$$h = D \sin v, \quad (3)$$

отличается от превышения, полученного из геометрического нивелирования, на величину поправки за кривизну Земли

$$h_H = h + (S^2 / 2R). \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) формулу (2) можно представить в виде

$$S' = \sqrt{D^2 - D^2 \sin^2 v - \frac{DS^2 \sin v}{R} - \frac{S^4}{4R^2}} \quad (5)$$

или после несложных преобразований (5) можно записать

$$S' = D \cos v \sqrt{1 - \frac{S^2 \sin v}{DR \cos^2 v} - \frac{S^4}{4R^2 D^2 \cos^2 v}}. \quad (6)$$

Полагая, что в инженерно-геодезической практике обычно $\frac{S^2 \sin v}{DR \cos^2 v} \ll 1$, и тем более $S^4 / 4R^2 D^2 \cos^2 v \ll 1$, после разложения в ряд Тейлора квадратного корня формулы (6), ограничиваясь членами разложения первого порядка, имеем:

$$S' = D \cos v \left(1 - \frac{S^2 \sin v}{2DR \cos^2 v} - \frac{S^4}{8R^2 D^2 \cos^2 v} \right) \text{ или } \Delta S = S' - S = -\frac{S^2 \sin v}{2R \cos v} - \frac{S^2 D \cos v}{8R^2},$$

или
$$\Delta S = -\frac{S^2 \operatorname{tg} v}{2R} - \frac{S^3}{8R^2} = -\frac{Sh}{2R} - \frac{S^3}{8R^2}. \quad (7)$$

Таким образом, получим хорошее согласие между формулами (1) и (7) при $S = 2$ км: $S^3 / 8R^2 \approx 0,03$ мм при углах наклона до 6° .

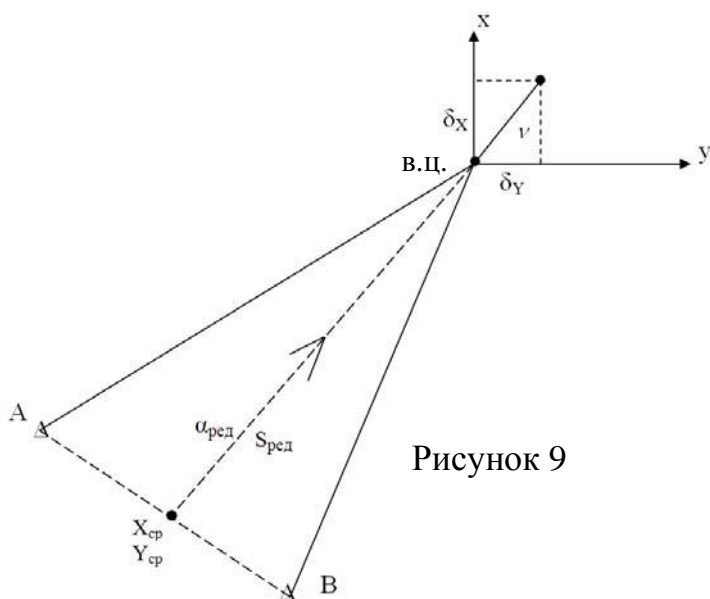


Рисунок 9

Приведенные доказательства убедительно демонстрируют целесообразность учета кривизны Земли при высокоточных инженерно-геодезических работах. Таким образом, если для выноса пунктов внутренней разбивочной сети используют прямую угловую или линейную засечку с измерениями с пунктов опорной сети на визирную цель, установленную на монтажном горизонте, необходимо осуществить следующие расчеты (рис. 9).

1. Вычислить координаты визирной цели, используя прямую угловую или линейную засечку, $X_{вц}$, $Y_{вц}$, $H_{вц}$.

2. Вычислить координаты средней точки между опорными пунктами A и B :

$$X_{ср} = \frac{X_A + X_B}{2}; \quad Y_{ср} = \frac{Y_A + Y_B}{2}; \quad H_{ср} = \frac{H_A + H_B}{2}.$$

3. Вычислить расстояния от средней точки до визирной цели и дирекционный угол этой стороны:

$$S_{ред} = \sqrt{(X_{вц} - X_{ср})^2 + (Y_{вц} - Y_{ср})^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha_{ред} = \frac{Y_{вц} - Y_{ср}}{X_{вц} - X_{ср}}.$$

4. Вычислить линейный элемент редукиции координат $v = \frac{S_{ред} (H_{вц} - H_{ср})}{R}$.

5. Вычислить поправки к координатам визирной цели на монтажном горизонте:

$$\delta x = v \cos \alpha_{ред}; \quad \delta y = v \sin \alpha_{ред}.$$

6. Вычислить координаты визирной цели, отнесённые к плоскости монтажного горизонта: $X_{вред} = X_{вц} - \delta x$; $Y_{вред} = Y_{вц} - \delta y$.

Такой метод редуцирования результатов измерений наиболее рационален, так как он не использует для разбивочных работ понятия поверхности относимости, а каждая новая поверхность монтажного горизонта является новой поверхностью относимости. На поверхность относимости ранее редуцировались лишь результаты линейных изме-

рений. Складывалось впечатление, что при использовании прямой угловой засечки редуционные проблемы решать не требуется, что приводило к искажению результатов обработки полевых измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ нормативных документов, посвященных строительству гидротехнических сооружений, показал, что некоторые допуски устарели и требуют дальнейшего совершенствования. В диссертации даются рекомендации для Вьетнама по использованию основных положений классификации по стандарту, разработанному в России.

В диссертации подробно проанализированы различные пути построения планового обоснования для строительства плотин ГЭС, как наиболее важного и ответственного объекта строительства, и сделан вывод, что на современном этапе наиболее перспективным является разумное сочетание традиционных методов измерений с использованием современных высокоточных электронных тахеометров и спутниковых средств измерений. Для обеспечения эффективного сочетания современных средств измерений в диссертации приведена новая методика построения плановых опорных сетей при строительстве гидроэнергетических объектов.

В диссертации выполнен анализ наиболее распространенного алгоритма преобразования координат, который заключается в том, что координаты пунктов в Государственной геодезической системе координат переводят в декартову систему координат и, сопоставляя их с координатами, полученными по результатам спутниковых определений, для тех же пунктов вычисляют семь параметров преобразования.

В диссертации обращено внимание на то, что к ошибкам координат пунктов B и L , которые обычно составляют в линейной мере метры, добавляются ошибки, обусловленные ошибками вычисления геодезической высоты δH :

$$\delta X = \delta H \cos B \cos L; \delta Y = \delta H \cos B \sin L; \delta Z = \delta H \sin B.$$

В инженерно-геодезических сетях расстояния между пунктами небольшие, и криволинейные координаты пунктов B_i и L_i различаются на единицы угловых минут. Следовательно, ошибки декартовых координат δX , δY , δZ будут практически одинаковыми для всех пунктов опорной сети и будут являться систематическими ошибками,

причем различными по каждой оси координат. Такие искажения сети введением одного масштабного коэффициента устранить невозможно.

В тоже время показано, что переход от декартовых координат к криволинейным вплоть до координат в проекции Гаусса, не требует знания геодезических высот и осуществляется без дополнительных искажений, вызванных ошибками вычисления геодезической высоты.

Методика создания плановых опорных сетей учитывает следующее:

- независимо от того, в какой системе координат выполнены спутниковые измерения, WGS-84 или ПЗ-90, вначале из пространственной декартовой системы координат для плановых сетей необходимо переходить к криволинейным координатам и использовать в дальнейшем высокоточные приращения координат в проекции Гаусса;

- координаты вспомогательных пунктов для выноса осей сооружений должны быть определены в государственной системе координат независимо от того, каким методом они определяются (линейно-угловыми построениями, полигонометрией или спутниковым методом);

- координаты пунктов плановой разбивочной сети следует редуцировать на поверхность относимости, высота которой равна средней высоте строящейся плотины, следовательно, на строительной площадке должны присутствовать пункты, координаты которых отнесены к двум различным системам координат;

- переход от государственной системы координат к местной выгодно осуществлять на том этапе, где допуски на выполнение геодезических работ наиболее слабые. Таким этапом геодезических работ является вынос на местность главных или основных осей объекта. Средняя квадратическая ошибка выноса осей строящегося объекта на местность обычно не менее 5–10 см; выдержать такую точность при современных методах измерений не представляет каких-либо трудностей;

- вынос координат на монтажный горизонт выгоднее выполнять обратными засечками, устанавливая электронный тахеометр на монтажном горизонте. Следовательно, пункты плановой опорной сети следует располагать так, чтобы они были хорошо видны с монтажных горизонтов строящегося объекта.

Учитывая вышеизложенное, разработанная автором диссертации методика соз-

дания плановой опорной сети не содержит этапа преобразования координат с вычислением параметров преобразования.

Отличительной особенностью разработанной в диссертации методики является то, что одновременно с определением координат пунктов плановой опорной сети в местной системе координат определяются и координаты пунктов, закрепляющих оси плотины. Таким образом, координаты пунктов опорной сети и пунктов осей плотины определяются в единой системе координат с высокой точностью, свойственной спутниковым методам измерений. В таком случае отпадает необходимость в вычислении параметров преобразования координат – наиболее сложного и ответственного этапа всех ранее известных методик. Таким образом, поставленная перед автором научная задача полностью решена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динь Тхи Ле Ха. Редукция координат пунктов плановой опорной сети при строительстве плотин. // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – № 6. – 2012. – с. 21–24.
2. Чан Куанг Хок, Чинь Тхань Чьонг, Динь Тхи Ле Ха. Оценка точности вычисления приращений координат в проекции Гаусса–Крюгера по результатам спутниковых измерений // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2. – С.30–35.
3. Ключин Е.Б., Динь Тхи Ле Ха. Особенности вычисления горизонтального проложения в полигонометрии // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2013. – № 2.
4. Динь Тхи Ле Ха. Обзор состояния нескольких гидроэлектростанций во Вьетнаме // Доклад на 65-й научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК. 6–7 апреля 2010 г.
5. Динь Тхи Ле Ха. Геодезическое обеспечение строительстве гидроэлектростанций // Доклад на 66-й научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, посвященной 50-й годовщине первого полета человека в космос – летчика-космонавта СССР Юрия Алексеевича Гагарина, 5–6 апреля 2011 г.
6. Динь Тхи Ле Ха. Преобразование координат спутниковой навигационной системы в локальную систему координат // Доклад на 67-й научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в рамках проводимого в Российской Федерации года Российской истории, 3–4 апреля 2012 г.
7. Динь Тхи Ле Ха. Особенности создания плановых опорных сетей для строительства крупных инженерных объектов с использованием спутниковых технологий // Доклад на 68-й научн.-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК. 9–10 апреля 2013 г.

Подписано в печать Гарнитура Таймс
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 1,5
усл. печ. л. Тираж 80 экз. Заказ №.... Цена договорная
Издательство МИИГАиК 105064, Москва, Гороховский пер., 4