

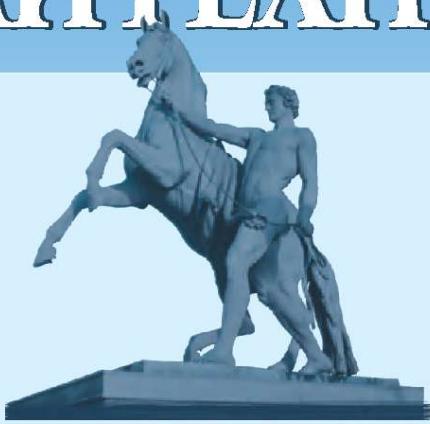
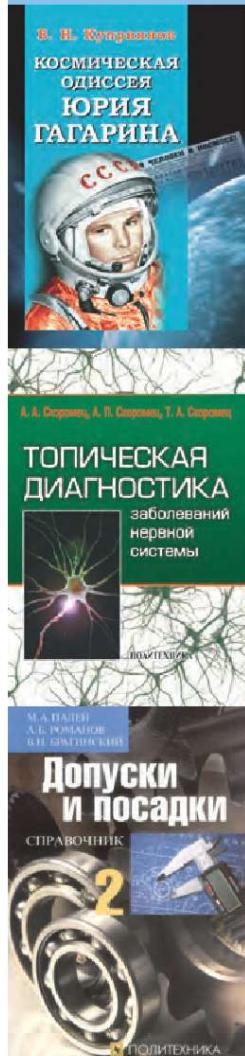


И. С. Пандул

# ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ



# ИЗДАТЕЛЬСТВО ПОЛИТЕХНИКА



Издательская и полиграфическая  
деятельность с 1938 года

Основная тематика:  
машиностроение  
приборостроение  
медицина

Издательство выпускает  
монографии, справочники,  
учебники, словари,  
альбомы и журналы  
в различных областях науки,  
технологии и техники

ОАО «Издательство «ПОЛИТЕХНИКА»

191023, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

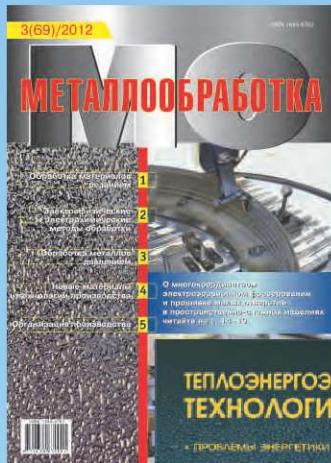
Тел.: (812) 312-44-95, 710-62-73, тел./факс: (812) 312-57-68.

<http://www.polytechnics.ru> E-mail: [gfm@polytechnics.ru](mailto:gfm@polytechnics.ru), [710-62-73@polytechnics.ru](mailto:710-62-73@polytechnics.ru)





# ОАО «Издательство “ПОЛИТЕХНИКА”» предлагает серию научно-технических журналов



«Металлообработка» (подписной индекс в агентстве «Роспечать» № 14250)

Для технологов предприятий, ученых НИИ и преподавателей вузов машиностроительной отрасли.

**Тематика:** новые технологии обработки металлов резанием, давлением, электрофизическими и электрохимическими методами; свойства материалов; заводской опыт.

Основан в 2001 г. Входит в перечень ВАК.  
E-mail: mo@polytechnics.ru.

## ТЕПЛОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 2012 2 (66)

- ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ
- СИСТЕМЫ ЖИЗНЬЕСРЕДЫ
- ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ



«Биотехносфера» (подписной индекс в агентстве «Роспечать» № 45886)

Для специалистов медико-технического профиля.

**Тематика:** создание наукоемкой биомедицинской техники; исследования и разработки в области биоинженерии, биомедицинской информатики, бионанотехнологий, медико-технического менеджмента и образования.

Основан в 2009 г. Входит в перечень ВАК.  
E-mail: bts@polytechnics.ru.

Издательство приглашает авторов и рекламодателей для размещения статей и рекламы по тематике журналов.

Все выпуски журналов можно приобрести в бумажном и электронном виде формата pdf на сайте издательства [www.polytechnics.ru](http://www.polytechnics.ru).

Электронный аналог печатного издания: Геодезические работы при изысканиях и строительстве гидротехнических сооружений : учеб. пособие. /И. С. Пандул — СПб. : Политехника, 2008. — 154 с. : ил.

УДК 528.489:626 (075.80)

ББК 38.2; -021\*3.2)

П16



*Рекомендовано  
Учебно-методическим объединением вузов РФ  
по высшему образованию в области геодезии и картографии  
в качестве учебного пособия  
для студентов специальности 120101 «Прикладная геодезия»*

Р е ц е н з е н т ы: заведующий кафедрой инженерной геодезии Петербургского государственного университете путей сообщения профессор *М. Я. Брынь*; доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного института кандидат технических наук *В. Г. Потюхляев*

**Пандул, И. С.**

П16 Геодезические работы при изысканиях и строительстве гидротехнических сооружений : учеб. пособие / И. С. Пандул. — СПб. : Политехника, 2012. — 156 с. : ил.

ISBN 978-5-7325-0906-9

Сжато рассмотрены вопросы выполнения геодезических работ при водно-технических изысканиях, на площадках гидроузлов, водохранилищах, при строительстве мелиоративных систем и портов. Приведены данные о гидротехнических сооружениях, освещены методики выноса проекта на местность и наблюдений за деформациями сооружений.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 120101 «Прикладная геодезия», очной и заочной форм обучения. Может быть полезно для студентов мелиоративных, строительных, лесотехнических, аграрных и сельскохозяйственных вузов при изучении курса «Инженерная геодезия».

УДК 528.489:626 (075.80)

ББК 38.2; -021\*3.2)

ISBN 978-5-7325-0906-9

© Издательство «Политехника», 2012

# 1. ВОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

## 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

*Гидротехнические сооружения — объекты, предназначенные для использования водных ресурсов или для борьбы с вредными воздействиями воды.*

Область гидротехники — строительство ГЭС, превращающих механическую энергию падающей воды в электрическую, сооружение судоходных каналов, улучшение существующих водных путей, водоснабжение населенных пунктов и их канализация, работы по мелиорации болот и излишне увлажненных земель, ирригация засушливых земель, строительство объектов рыбного хозяйства, сооружений для борьбы с разрушительным действием водной стихии и др.

*Совокупность мероприятий, направленных на изучение и использование природных водных ресурсов, называется водным хозяйством и составляет часть народного хозяйства.*

Основные отрасли водного хозяйства: 1) гидроэнергетика; 2) водный транспорт; 3) водоснабжение и канализация; 4) мелиорация и ирригация; 5) рыбное хозяйство; 6) добыча руд из рассолов (комплексное использование водных недр); 7) борьба с разрушающим действием водной стихии.

Естественно, на стадии изысканий и проектирования ГЭС, водохранилищ, каналов, мелиорации выполняются десятки тысяч квадратных километров топографических съемок разных масштабов, десятки тысяч километров нивелировок, создаются тысячи пунктов триангуляции и полигонометрии. На стадии строительства выполняются большие объемы геодезических работ по выносу основных осей сооружений, по строительным разбивкам и ведется подготовка к геодезическим работам по наблюдениям за деформациями сооружений.

*Наука об использовании водных ресурсов для различных хозяйственных целей и в борьбе с вредными проявлениями водной стихии называется гидротехникой.*

Первые гидротехнические сооружения появились примерно 7 тыс. лет тому назад; примерно в это же время зародилась и наука геодезия. С тех пор две эти научные дисциплины — гидротехника и геодезия идут рядом. Человек начал селиться вдоль рек и наблюдать за их режимом в глубокой древности. Почти все крупнейшие города и густонаселенные области расположены у больших рек и по берегам морей. С давних времен на реках строились водяные мельницы. Теперь водные потоки приводят в движение мощные гидротурбины, от которых вращаются генераторы,рабатывающие электроэнергию. Люди научились управлять водной стихией. Они проводят воду в степи и пустыни. Отводят ее от болот и переувлажненных земель.

Приведу лишь один классический пример: в древнем Египте надо было заранее вычислять, когда начнется разлив Нила. Ведь когда Нил разливается, многие селения оказываются островками. Значит, надо было вовремя увести стада из низких мест, внимательно следить, чтобы не размыло многочисленные плотины и дамбы. Чем отличается плотина от дамбы? Оба этих объекта относятся к водонапорным сооружениям.

*Плотина — подпорное сооружение, преграждающее водоток для удержания воды с одной стороны на более высоком уровне, чем с другой.*

*Дамба — сооружение, по устройству аналогичное земляной плотине, но может быть как напорной (для защиты низменности от затоплений), так и безнапорной — для регулирования рек.*

Вернемся к Нилу. От его разлива зависело благосостояние людей: запоздалый и низкий разлив грозил голодом, зато высокий разлив приносил счастье и радость. Чтобы не зависеть от милостей разлива, люди стали создавать оросительные каналы. Что такое канал?

*Канал — водопроводящее сооружение в виде искусственно созданного русла правильной формы с безнапорным движением воды, выполненное путем открытой выемки или насыпи грунта.*

Нил — вторая по длине река на Земле — до сих пор основной источник орошения и получения питьевой воды в Египте. Каналы проложены в основном для орошения плантаций хлопчатника. Длина Нила — 6,5 тыс. км, а общая протяженность оросительных каналов в Египте более 25 тыс.км.

### 1.2. ЗНАЧЕНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Вода играет огромную роль в жизни Земли. В телах всех растений и животных имеется вода, много воды, обычно больше чем 50 % от их массы. Эта биологическая вода (а ее на Земле суммарно насчитывается более 1 тыс. км<sup>3</sup>) участвует в кругообороте. А потому организм нуждается в ее пополнении.

В теле человека содержится не менее 3 больших ведер воды (это примерно 65 % от массы тела). Если без пищи человек может прожить 40–50 дней, то без воды погибает через четверо суток.

Наша Земля богата водой, вода покрывает 71 % ее поверхности и общие запасы воды в морях, реках, озерах составляют около 1,4 млрд. км<sup>3</sup>. Если ее распределить по поверхности Земли, то образуется сплошной слой толщиной 3,8 км. Но 96,5 % всей воды сосредоточено в Мировом океане, она в различной степени соленая. Если исключить еще соленые озера и заболоченные воды, то на долю пресной воды останется всего 2,53 %. Общий объем ледников на Земле 24 млн. км<sup>3</sup>, и в них законсервировано 1,76 % пресной воды, 0,76 % приходится на подземные воды. В атмосфере планеты в газообразном состоянии содержится 19,2 тысячи км<sup>3</sup> влаги. Следовательно, на реки и озера остается всего меньше 0,01 %. Это 105 тыс. км<sup>3</sup> — примерно пять Балтийских морей. Но и эта вода распределена на Земле далеко не равномерно. Население Земли часто не имеет возможности обеспечить себя достаточным количеством пресной воды. Четвертая часть людей на Земле

испытывает трагический недостаток питьевой воды, в некоторых странах Ближнего Востока літр воды в два-три раза дороже літра нефти. По данным ООН, 89 % сельских жителей и 23 % горожан на нашей планете не обеспечены доброкачественной водой. Нехватка чистой воды — главная причина большинства заболеваний, 80 % всех болезней в мире связаны с водой. От употребления воды плохого качества в мире ежедневно умирают 25 тыс. человек, в основном дети.

Проблема охраны водных ресурсов — актуальнейшая проблема. Что касается нашей страны, то в целом мы не можем пожаловаться на недостаток воды. По ресурсам поверхностных вод наша страна занимает первое место в мире. Но и в нашей стране к воде надо относиться бережно. В сутки каждый среднестатистический житель СНГ потребляет 350 л воды, а житель ФРГ — около 140 л.

Охрана водных ресурсов у нас осуществляется согласно водному кадастру России.

Водный кадастр — систематизированный регистр сведений о водных ресурсах страны.

Наша страна насчитывает 150 тыс. рек и 250 тыс. озер. Реки СНГ несут примерно восьмую часть (12 %) мирового стока.

### 1.3. РЕКИ, ИХ ЭЛЕМЕНТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Гидротехнические сооружения возводят большей частью на реках (табл.1).

*Река — непрерывно действующий водоток, текущий в разработанном ею русле и питающийся стоком атмосферных осадков с площади своего бассейна.*

Реки текут по дну долин — отрицательных форм рельефа, обычно извилистых и длинных. Со склонов речной долины атмосферные осадки непосредственно стекают в реку. Пересечение двух склонов создает низшую полосу дна долины — тальвег. Русло реки обычно пролегает по тальвегу.

Т а б л и ц а 1  
Крупнейшие реки СНГ

Река	Длина, км	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>
1. Амур (с Шилкой и Ононом)	4350	1843
2. Лена	4320	2418
3. Енисей (с Бий-Хем)	4130	2707
4. Обь (с Катунью)	4070	2425
5. Волга	3690	1380
6. Сырдарья (с Нарыном)	2850	219
7. Амударья (с Патджем и Вахджиром)	2600	465
8. Днепр	2280	503
9. Дон	1950	422
10. Днестр	1410	188
11. Западная Двина	1020	84
12. Кубань	906	51
13. Онега	416	58
14. Нева	74	282

*Русло реки — пониженная часть долины, по которой осуществляется устойчивый речной сток.*

Та же часть дна долины, которая затапливается только в половодье, называется поймой. Древние поймы, лежащие выше современного уровня реки, называют террасами. Реки являются одним из главнейших элементов ландшафта.

*Ландшафт — природный территориальный комплекс, однородный по условиям развития.*

Каждая река имеет исток и устье. Разность высот между истоком  $H_1$  и устьем реки  $H_2$  называется падением реки. Падение реки на разных участках различно.

Продольным уклоном реки  $i$  называется отношение падения реки к ее длине  $L$ :

$$i = (H_1 - H_2) / L.$$

В верхнем течении рек уклоны и удельная кинетическая энергия воды велики. В среднем и нижнем течении уклоны реки и ее удельная кинетическая энергия уменьшаются, так как эта энергия затрачивается на внутреннее трение, интенсивную разработку долин и перенос разрушенного материала вниз по течению.

В плане изображение любой реки напоминает развесистое дерево. Главная река — ствол, притоки — ветви (это притоки первого порядка), а притоки притоков (притоки второго порядка) — веточки. Главная река вместе со своими притоками первого, второго и т. д. порядков образует речную систему.

*Площадь, с которой река с помощью притоков собирает воду, называется водосборным бассейном или водосбором.*

По величине водосборов выделяются следующие типы рек:

1) большие реки — протекающие через несколько географических зон; условно к этой категории относятся равнинные реки, имеющие водосбор площадью больше 50 тыс. км<sup>2</sup>.

2) средние реки — протекающие в пределах одной географической зоны; площадь водосбора таких рек в пределах 2–50 тыс. км<sup>2</sup>;

3) малые реки — небольшие, иногда временные водные потоки; условно к этой категории относят реки, имеющие водосбор площадью 1–2 тыс. км<sup>2</sup>.

Любой бассейн реки ограничен линией водораздела.

*Водоразделом называется линия, проходящая по возвышенным точкам местности и ограничивающая площадь водосбора.*

Различают главные и второстепенные водоразделы.

Все реки стремятся к морю, а их направление определяют четыре фактора:

- 1) рельеф местности;
- 2) прочность горных пород (одни легко поддаются размыву, другие заставляют воду искать обходные пути);
- 3) кинетическая работа воды в реке (размыв русла);
- 4) техногенная деятельность человека, изменяющая течение рек.

При стекании водные потоки сливаются, образуя русло все больших и больших размеров. При этом возрастание глубины по мере увеличения реки происходит медленнее, чем рост ширины. Если обозначить глубину  $h$ , а ширину  $b$ , то они приблизительно подчиняются закону

$$h = A/\sqrt{b},$$

где  $A$  — постоянный коэффициент, зависящий от размеров частиц грунта.

Форма русла, вследствие непрерывного воздействия потока, испытывает изменения. В большинстве случаев реки берут свое начало в возвышенных или горных районах страны. Так, Волга начинает свой путь с Валдайской возвышенности, на высоте 228 м над уровнем моря; Кубань зарождается в горах Кавказа, она вытекает из ледников Эльбруса на высоте около 2970 м, а впадает в Азовское море; Обь образуется от слияния рек Бии и Катуни, берущих начало на Алтае, и впадает в Карское море.

В зависимости от характера рельефа реки делятся на равнинные и горные.

Равнинные реки протекают в хорошо разработанных руслах, в широких и неглубоких долинах с обширными поймами, обычно имеют песчаные или илистые грунты. В плане их русла имеют извилистые очертания — меандры, и характеризуются чередованием более глубоких участков — плёсов, с более мелкими — перекатами. Такие реки имеют плавный профиль, малые уклоны водной поверхности (не более 0,2 м/км) и медленное течение — в межень 0,2–0,5 м/с. Следует иметь в виду, что поток воды со скоростью 0,3 м/с уже захватывает и переносит тонкий песок. Течение в половодье — 1–3 м/с. Уже со скоростью 1 м/с поток воды передвигает не только крупный песок, но и мелкий гравий. Со скоростью 2 м/с он переносит гальку и камни диаметром до 10 см.

*Межень* — продолжительное сезонное стояние низких (меженных) уровней воды. Оно обусловлено периодами сухой или морозной погоды, когда водоносность реки под-

держивается главным образом грунтовым питанием (при сильном уменьшении поверхностного стока).

Горные реки, многие из которых берут начало на высоте 3–4 км, образуют очень глубокие и узкие долины, протекают в руслах с трудноразмываемым каменистым ложем, характеризуются незначительными глубинами и большими уклонами водной поверхности (от 1 до 100 м/км). Продольный профиль таких рек ступенчатый, с изломами. Скорость течения в половодье и при паводках 3–7 м/с.

**Паводок** — кратковременное и нерегулярное поднятие уровня воды в результате быстрого таяния снегов (ледников) при оттепели или при обильных дождях.

Рассмотрим теперь кратко русловый процесс.

**Русловый процесс** — взаимодействие между водным потоком и руслом.

В каждый момент времени скоростное поле потока определяется формой русла. В тех местах русла, где скорости потока больше размывающих, происходит его деформация в сторону углубления дна, а там, где скорости малы, — отложение наносов.

Русловые процессы бывают естественными и искусственными.

Естественный русловый процесс действует многие тысячелетия и приводит к устойчивой форме речного русла. Он определяется следующими факторами: 1) расходом воды и его изменением во времени; 2) рельефом местности; 3) структурой и расположением геологических пластов; 4) мощностью растительного покрова по берегам реки.

Искусственный русловый процесс имеет место в двух случаях: 1) когда на реке возводятся сооружения, создающие для потока новые, неразмываемые берега (укрепление берегов, продольные и поперечные дамбы, устои и быки мостов и др.); 2) когда изменяется водный режим реки вследствие возведения плотин, сооружения водохранилищ и устройства регулирования стоков.

**Сток** — количество воды, стекающей с данного участка водосбора за определенный промежуток времени.

Размер стока определяется по расходам воды  $Q$ , суммированным за указанный промежуток времени, и выражается обычно в кубических единицах. Иногда для характеристики стока применяют модуль стока.

**Модуль стока  $M$  — среднее количество воды, стекающей за 1 с с 1  $\text{км}^2$  площади водосбора.**

Связь модуля  $M$  с расходом  $Q$  следующая:

$$M = Q / F,$$

где  $F$  — площадь бассейна,  $\text{км}^2$ .

Средний многолетний годовой сток называется нормой годового стока. Нормы стока определяются размерами бассейна, климатом, рельефом, почвами, растительностью, а также техногенной деятельностью человека. Норма стока не является постоянной величиной. На равнинной территории СНГ норма годового стока около 10 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ); в северных районах страны уменьшается до 0,5 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ). В засушливых южных районах полупустынь и пустынь она еще ниже. В горах норма стока увеличивается с высотой: на Кавказе, в горах Средней Азии и на Дальнем Востоке соответственно 75–100; 25–50 и 6–15 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ).

Существуют карты речного стока с линиями равных значений норм стока, они позволяют определять приближенно нормы стока тогда, когда нет фактических данных о расходах воды  $Q$ .

**Фактический расход воды  $Q$  — количество воды, протекающей в единицу времени через живое сечение реки (перпендикулярное направлению скорости течения воды).**

**Регулирование стока — искусственное перераспределение расходов воды по времени с помощью гидротехнических устройств. Бывает суточным, недельным, сезонным, годичным и многолетним.**

Расход воды влияет на основные элементы водного режима реки. Изменение расхода воды влечет за собой изменение уровня воды, глубин, уклона водной поверхности, скорости течения и др. Расход воды в каждой реке непостоянен. На равнинных реках он резко возрастает весной в

половодье, в связи со стоком талых вод. Летом расход воды колеблется в зависимости от количества осадков, к осени он увеличивается. Расход воды заметно убывает в бездождливые периоды и зимой, когда река питается только за счет стока подземных вод.

На горных реках, в бассейне которых имеются ледники, наибольшие расходы воды наблюдаются, наоборот, в жаркие летние месяцы, когда интенсивно тают ледники и снег на больших высотах. Расход воды в горных реках целиком зависит от накопления снега в горах, интенсивности его таяния, количества выпадающих осадков. Порой эти реки так мелеют, что их можно перейти вброд. Иногда же бывают полноводны и могучи, и их воды с угрожающим шумом мчатся в скалистых берегах. На горных реках наблюдаются значительные колебания расхода воды даже в течение суток, так как снег и лед в горах интенсивнее тают в дневное время.

В силу большой изменчивости расход воды является характеристикой только в данный момент времени. Поэтому для характеристики расхода воды  $Q$  в кубических метрах в секунду в данном створе используют статистические зависимости, выведенные из многолетних наблюдений:

$$Q = W / T,$$

где  $W$  — объем воды;  $T$  — время.

Расход воды или измеряют непосредственно, или определяют по найденной зависимости между расходом воды и уровнем воды в данном сечении реки (по так называемой кривой расхода).

Ранее мы отметили, что по расходу воды определяют размер стока, который изменяется в зависимости от количества осадков, температуры воздуха и других условий.

Очень часто размер стока определяется коэффициентом стока.

**Коэффициент стока** — отношение количества воды, стекающей с определенной площади, к сумме атмосферных осадков, выпадающих на эту площадь. Вычисляется

обычно за многолетний период и указывает, какая часть осадков стекает в реку (остальное испаряется обратно в атмосферу).

Коэффициент стока зависит главным образом от климатических факторов, а также от рельефа, почвы, растительности и прочего. Среднее многолетнее его значение для всего земного шара примерно равно 0,3. В тундровой зоне значение этого коэффициента составляет 0,6–0,8, а в за-сушливых районах 0,1–0,05, местами и ниже.

#### 1.4. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ РЕКИ И РАСХОДОВ ВОДЫ В НЕЙ

Существует несколько способов определения расходов воды  $Q$ . Наиболее распространен аналитический или геодезический способ, при котором находят глубины по ширине реки — промерные вертикали, и определяют скорость течения в диапазоне скоростных вертикалей. На основании данных промеров вычисляется площадь живого сечения реки между скоростными вертикалями. Обозначим  $\omega$  — площадь живого сечения. Произведение этой площади на скорость течения реки  $v$  определяет расход воды:

$$Q = \omega v.$$

Полевые работы выполняют следующим образом. Выбирают прямолинейный участок реки с однообразным уклоном, длиной примерно в 4 раза больше ширины (так, чтобы продолжительность хода поплавка была не менее 20 с). Выбранный участок реки должен иметь правильную корытообразную форму поперечного сечения. Глубина и ширина реки должны быть одинаковыми по всей длине участка.

В начале и в конце выбранного участка перпендикулярно струям средней части реки и параллельно друг другу закрепляют на местности верхний 2 и нижний 4 скоростные створы (рис. 1). Строго между ними и параллельно им закрепляется главный (промерный) створ 3. В 20–30 м выше верхнего скоростного створа закрепляют четвертый — пусковой створ 1. Работу по определению скоростей и расходов

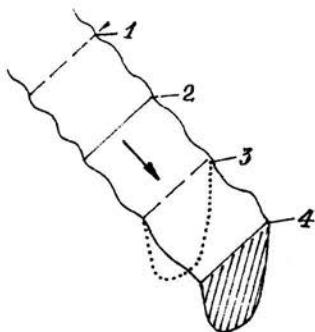


Рис. 1. Расположение створов на реке

ку на стрежне, руководитель работ бросает поплавок так, чтобы тот двигался с наибольшей скоростью. Наблюдатели на створах сигнализируют флагками о прохождении поплавка через свои створы, а руководитель в лодке отмечает время по секундомеру. Зная расстояние между скоростными створами и время прохождения поплавка между ними в секундах, легко подсчитать скорость течения. Обычно забрасывают 3–4 поплавка, причем поплавки, которые в пути цеплялись за траву или крутились в водовороте, в расчет не берут. По поплавку, прошедшему расстояние между скоростными створами за наименьшее время, определяют наибольшую скорость течения  $v_{\max}$ , а по ней фиктивный расход воды в кубических метрах в секунду:

$$Q_{\Phi} = \omega v_{\max}.$$

Расход воды назван фиктивным (недействительным) потому, что он вычисляется не по средней скорости, а по поверхности, которая больше средней. В результате трения более глубокие слои воды текут медленнее поверхностных, их скорость зависит также от характера русла реки. Для получения действительного расхода воды нужно использовать переходный коэффициент  $K$ , который зависит от характера дна русла:

воды следует выполнять исключительно в безветренную погоду.

При измерениях на каждом створе стоит наблюдатель с флагком. На пусковом створе в лодке находится руководитель с секундомером. Лодка выводится на стрежень.

*Стрежень — линия наибольших течений, обычно совпадает с линией наибольших глубин.*

Заранее из сухого бревна диаметром 10–12 см готовят поплавки, отпиливая от бревна кружки толщиной 3–4 см. Установив лод-

Характер дна	Коэффициент К
Крупные валуны или заросло камышом . . . . .	0,55
Грубый камень . . . . .	0,65
Гравий . . . . .	0,70
Песок и глина . . . . .	0,75

Тогда

$$Q = Q_{\phi} K.$$

При определениях расхода воды записывают дату, время, уровень воды и характер дна.

Измерения расходов воды производят на отдельных створах в различных участках течения реки, чтобы получить представление об изменении расходов по длине.

На спокойных реках скорости течения измеряют на ряде вертикалей, число которых зависит от ширины реки:

Ширина реки, м . . . . .	< 50	50–100	100–200	200–500
Число вертикалей . . . . .	5	5–7	7–9	10

Измерение скоростей течения до 3 м/с осуществляют как поплавками, так и гидрологическими вертушками, а при  $v > 3$  м/с — только поплавками.

Уровень воды измеряется на равнинных реках в 8 и в 20 ч, а на горных — в 8, 14 и 20 ч. При резком суточном изменении уровней воды в реке вследствие интенсивного дождя или таяния снега уровни надо измерять каждый час, от начала подъема воды до конца паводка.

На горных реках с бурным течением по камням расход воды определяют следующим образом: в реку вводят раствор обычной соли высокой концентрации, а несколько ниже по течению, на расстоянии, достаточном для перемешивания всей массы потока, берут пробы воды и определяют в них концентрацию соли. По объему и концентрации соли в растворе, внесенном в реку, и по конечной концентрации соли в пробе легко вычислить расход воды  $Q$  в реке.

*Профиль равновесия реки — продольный вертикальный разрез русла при стабильном базисе эрозии.* При построении продольного профиля реки глубины измеряют

по фарватеру через 50–200 м, в зависимости от размера реки и характера русла, фиксируя измеряемые точки с помощью мензуры или теодолита.

При промерах по отдельным поперечным профилям расстояния между промерными точками должно быть не более 1/10 ширины реки.

При промерах записывают дату и время суток, глубину, уровень воды на это время и характер дна.

## 1.5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СХЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕКИ

На реках строят гидроузлы.

*Гидроузел — группа гидротехнических сооружений, объединенных по расположению и условиям совместной работы.*

В зависимости от назначения гидроузлы подразделяют на энергетические, водно-транспортные, водозаборные и др., от чего и зависит состав входящих в них сооружений. Наиболее эффективного, одновременно энергетического и транспортного, использования реки можно достигнуть путем строительства каскада гидроузлов, у которых нормальные подпорные уровни (НПУ) последовательно сопряжены между собой. При этом предусматривается такое размещение гидроузлов на реке, чтобы напор, создаваемый нижним гидроузлом, распространялся до верхнего гидроузла, не оставляя свободного незарегулированного участка между гидроузлами (рис. 2).

Изыскания по выбору мест будущего расположения гидроузлов начинается с изучения особенностей речной долины по топографической карте и уклонов поверхности уровня воды по продольному профилю водной поверхности и дна реки. Наиболее узкие участки долины реки обеспечивают сооружение плотин наименьшей длины и являются наиболее вероятными местами расположения гидроузлов. При этом учитываются также залегание и состав горных пород.

При составлении схемы использования реки напоры Н и высоты нормальных проектных (подпорных) уровней

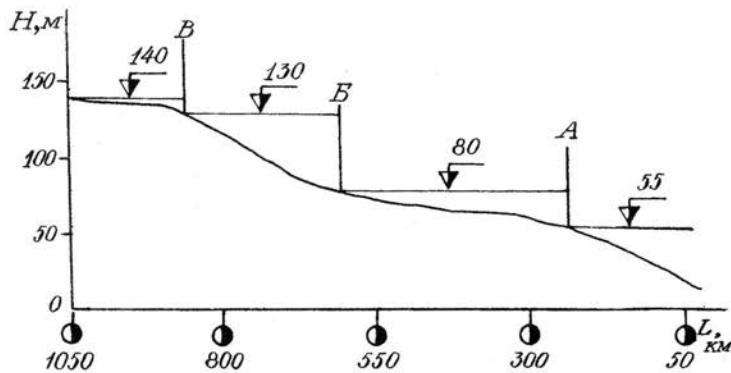


Рис. 2. Схема регулирования реки  
А, Б, В — гидроузлы

(НПУ) сопрягающихся гидроузлов  $A$  и  $B$  (рис. 3) определяют по продольному профилю реки, составленному на период межени. НПУ гидроузла  $A$  определяется высотой меженного уровня воды  $H_m$  около него. Напор гидроузла  $B$  вычисляют так:

$$H_B = \text{НПУ}_B - H_{\text{к.п.}},$$

где НПУ $B$  — высота НПУ у плотины  $B$ ;  $H_{\text{к.п.}}$  — высота кривой подпора (свободной уровенной поверхности) в водохранилище гидроузла  $A$  у плотины  $B$ .

В водохранилище примерно до половины его длины уровень воды горизонтальный (уровень НПУ), а потом повышается по кривой подпора. Отметку (высоту)  $H_{\text{к.п.}}$  получают из специальных гидравлических расчетов. Когда разность  $H_{\text{к.п.}} - H_m$  значительно уменьшает напор  $H_B$  за счет подтопления его напором плотины  $A$  — уменьшается высота НПУ $B$ . Окончательные значения высоты НПУ и напора  $H$  на гидроузлах устанавливают после выполнения гидравлических расчетов свободной водной поверхности водохранилища.

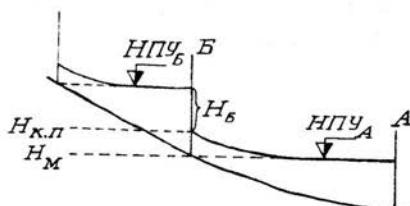


Рис. 3. Схема сопряжения гидроузлов

Для составления схемы использования реки необходимы топографические карты масштабов от 1:300 000 до 1:10 000, подробный профиль бытовой водной поверхности и русла реки (бытовой — в период межени) и сокращенный — обзорный профиль на одном стандартном листе бумаги размером 57 × 81 см. В результате составления схемы использования реки должны быть определены выгоднейшие напоры Н, места расположения и мощности ГЭС для максимальной выработки электроэнергии, обеспечения наилучших транспортных, ирригационных и других показателей гидроузлов. На стадии составления схемы использования реки практически достаточно высоту НПУ каждой ГЭС определять с точностью до 1 м, на стадии проектного задания — до 0,5 м. Уровень воды для расчетов кривой подпора надо знать с ошибкой не более 0,05 м.

## 1.6. ПРОДОЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ РЕКИ

Для составления продольного профиля реки обычно выполняют следующие работы.

1. Анализ уже имеющихся профилей и их высотной основы. Это делается с целью выяснения возможности полного или частичного их использования для проектирования.

2. Создание планового обоснования для съемки реки и непосредственно съемка. Плановое обоснование создается в виде триангуляционных сетей сгущения (цепочек треугольников вдоль реки) или же продолжением магистральных полигонометрических ходов разных разрядов. Эти построения опираются на пункты государственной геодезической сети. Съемку реки в зависимости от ее протяженности производят стереофотограмметрическим и комбинированным методами, при помощи мензулы или тахеометра. При стереофотограмметрической съемке реки контурная и высотная часть карты получается с помощью аэрофотосъемки. При комбинированном методе контурная

часть получается методом аэрофотосъемки, а рельеф снимают при помощи мензулы на фотоплане.

На малых реках съемку выполняют мензулой или тахеометром, или одиночными нивелирными поперечниками через 100 м по обе стороны от магистрального хода.

3. Создание высотной основы и нивелирование уровней воды в реке. Чтобы иметь возможность точно определять уклоны поверхности воды и правильно строить продольный профиль реки, все реперы на данном участке реки должны иметь отметки в одной системе — условные или абсолютные. Высотное обоснование обычно создают виде магистральных ходов II и III класса, на горных или малых реках — IV класса. Постоянные нивелирные реперы устанавливают по ходу через 6 км, а временные — через 2,5–3 км. Эти реперы могут быть одновременно центрами пунктов планового обоснования.

Все реперы располагают по возможности ближе к руслу реки, но примерно на 1 м выше отметки НПУ. Реперы следует располагать вблизи уровнемерных постов, гидрометрических станций, а также вблизи характерных точек уровня (у притоков рек, против речных перекатов и т.д.).

**Гидрометрическая станция** — участок реки, выбранный для измерения ее скорости, уклона, расхода воды  $Q$ .

Обязательное условие: реперы надо закладывать в местах, где обеспечивается их длительная сохранность и удобный подход с нивелиром к берегу и урезу воды.

4. Сгущение существующей сети уровнемерных постов временными и эпизодическими постами, организация наблюдений на них.

5. Промеры глубин.

6. Камеральные работы.

Рассмотрим подробнее, что представляет собой уровнемерный пост. Уровнемерные посты бывают четырех видов: речные, свайные, передаточные и лимнографы.

1. Речные, где за колебаниями уровня воды следят по отчетам по рейке, которую устанавливают у обрывистого берега или у стенки набережной; длина рейки должна пре-

вышать разность ГВВ — ГНВ, где ГВВ — горизонт высокой воды, ГНВ — горизонт низкой воды.

Место установки рейки выбирают так, чтобы она была укрыта от льда и плывущих бревен. Рейку устанавливают вертикально или наклонно (например, на откосе канала), в последнем случае длина одного деления в сантиметрах (обычно 2 см) делается увеличенной, в соответствии с углом наклона к горизонтали:  $a = 1/\cos \alpha$  (рис. 4).

2. Свайные посты устанавливают на пологих берегах. Сваи забивают в одном створе, они могут быть деревянные, металлические или бетонные. Превышение головок свай между собой обычно различается на 0,7–0,8 м. Глубина забивки свай должна быть на 0,5 м больше границы сезонного промерзания грунта. Верхние торцы их должны быть строго горизонтальны и иметь отметки из нивелирования от репера поста. Сваи нумеруют сверху вниз (рис. 5). Уровень воды определяют по рейке, установленной на сваю, он слагается из суммы отметки сваи и отчета по рейке.

3. Передаточные посты оборудуют на обрывистых берегах горных рек, где подход к воде затруднен. Над водой сооружается консольный вынос (стрела). С берега через блок на конце стрелы перекидывают трос с грузом в 2–5 кг. При измерении уровня груз опускается до соприкосновения с водой.

С помощью указателя, закрепленного на тросе, определяют положение уровня в реке.

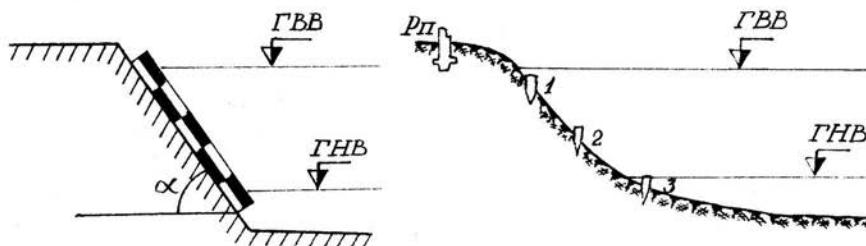


Рис. 4. Наклонная уровнемерная рейка  
 $\alpha$  — угол наклона

Рис. 5. Свайный уровнемерный пост  
 1, 2, 3 — номера свай

4. Лимниграфы — автоматические уровнемерные посты, снабженные самописцами типа «Валдай» или «ГГИ» (рис. 6), которые вычерчивают на бумажной ленте барабана кривую колебания уровня воды. Барабан снабжен часовым механизмом и соединен тросиком с поплавком. На всех опорных уровнемерных постах закладывают два репера — основной и контрольный.

Временные уровнемерные посты обычно состоят из двух свай, одна из которых на сухом берегу служит временным репером и включается в нивелирный ход, а другую забивают в воду на 15–20 см ниже уровня воды, и она служит для производства наблюдений. Иногда, чтобы не пользоваться переносной рейкой для замера уровня воды, к свае прибивают рейку длиной 1–1,5 м.

За нуль уровнемерного поста принимают нуль рейки, или нуль самой нижней сваи, или начальный штрих лимниграфа. Нуль уровнемерного поста называют еще «нуль

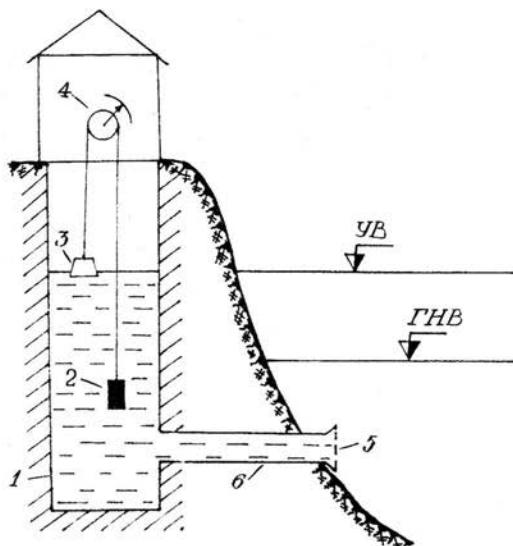


Рис. 6. Лимниграф

1 — успокоительный колодец; 2 — груз;  
3 — поплавок; 4 — самописец; 5 — защитная сетка;  
6 — соединительная труба

графика». Но вообще это может быть и некоторая условная плоскость. Единственное требование к «нулю графика» — чтобы он был ниже ГНВ. Наблюдения за уровнями воды ведут с точностью до 1 см два раза в сутки: в 8 и в 20 ч, но в периоды половодья и паводков — чаще: через 6 ч, 3 ч или даже ежечасно.

В периоды половодья, когда вода поднимается или опускается быстро, применяют остроумно придуманные максимальные и минимальные зубчатые рейки системы Фролова. На зубчатую рейку надевают поплавок *A* с пружиной *B*. Рейка крепится к свае. При понижении уровня воды (УВ) поплавок минимальной рейки опускается вместе с уровнем воды. При последующем повышении уровня воды поплавок останется в самом низком положении, так как пружины не дадут ему подняться (рис. 7). Аналогично устроена и максимальная рейка.

Продольный профиль реки требует знания падения водной поверхности на всем протяжении реки, зафиксированного в один физический момент времени. На большой реке это сделать практически невозможно. Задача решается разделением реки на участки (15–30 км и более). Для приближенного определения расстояний, на которых должны располагаться уровнемерные посты на реке, предложен ряд

формул. Наиболее простой является формула профессора Трощенко

$$L_{\text{км}} = 140\Delta / (ph'),$$

где  $\Delta$  — точность отсчета уровня воды, см;  $p$  — заданная точность определения уклона реки, %;  $h'$  — падение реки на 1 км, см.

На уровнемерных постах обязательно устанавливают нивелирные реперы. Постоянные реперы закладывают также вдоль магистрального нивелирного хода. Они слу-

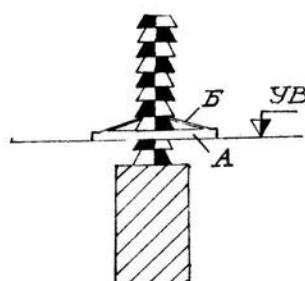


Рис. 7. Уровнемерная рейка системы Фролова

*A* — поплавок; *B* — пластиничатая пружина

жат для надежного определения проектного уровня воды в течение длительного времени.

Магистральный ход прокладывают на реках шириной до 800 м по одному ведущему берегу — с переходом на другой берег в местах перевала динамической оси потока. Уклон реки, имеющей значительную ширину, определяется по обоим берегам отдельно. Из полученных результатов берут среднее значение  $i$ . На реках шириной более 800 м магистральный нивелирный ход прокладывают по обоим берегам. Значит, и постоянные реперы в таком случае закладывают на обоих берегах реки.

На постоянных уровнямерных постах закладывают постоянные реперы, а на временных постах и на точках однодневной связи (ТОС) — временные реперы. В качестве постоянных используют нивелирные реперы в соответствии с инструкцией [3]; в качестве временных — деревянные или бетонные столбы, металлические трубы или «уголок» длиной 1,0–1,2 м, опоры мостов или ЛЭП. Временные реперы у ТОС можно закреплять также штырями (кованые гвозди) в стволах растущих деревьев. Исследования показали, что за год отметка временного репера вследствие роста дерева изменяется от 0,4 до 1,8 мм (максимум 2 мм), а при однодневной связке уровней воды этим фактором можно пренебречь.

Основной целью наблюдений на уровнямерных постах является выявление всех изменений колебания уровня воды в годовом и многолетнем периодах над нулем графика поста. По этим данным выбирают проектный уровень воды (ПУ), который используют для построения продольного профиля реки и для других целей. В свою очередь, ПУ реки зависит от частоты и обеспеченности уровней за определенный период (за год или за несколько лет).

**Частота (повторяемость)** — количество дней с определенным уровнем за данный период наблюдений.

**Обеспеченность (продолжительность)** — количество дней стояния данного уровня и всех уровней выше него, т. е. уровней, его обеспечивающих.

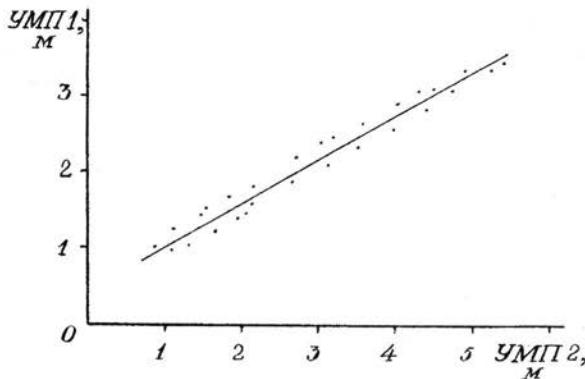


Рис. 8. Связь уровней двух смежных уровнемерных постов

Частоту и обеспеченность также выражают в процентах к общему количеству дней периода наблюдений.

Еще один важный результат наблюдений на уровнемерных постах (УМП) следующий: для характеристики уровней воды на соседних участках реки строят графики связи уровней по двум уровнемерным постам. График связи постов строят по характерным уровням: минимальному, максимальному и другим устойчивым уровням характерных фаз водного режима (рис. 8). С помощью такого графика можно заранее определить уровень воды и дату его наступления на нижнем посту по показаниям верхнего уровнемерного поста и по времени добегания воды.

#### 1.7. ПРОЕКТНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ И СРЕЗКА

Из-за непостоянства стока воды уровень ее все время изменяется, следовательно, изменяются и глубины. Для того, чтобы получить достоверный продольный профиль реки и качественные русловые съемки, выбирают проектный уровень воды в реке. От него вычисляют все глубины в реке, отметки берегов при русловой съемке, проводят изобаты (линии равных глубин). От него определяют га-

рантированные габариты судовых ходов и отметки гидротехнических сооружений.

Проектные уровни называют еще одним термином — «ноль глубин», ПУ определяют по данным постоянных уровнемерных постов, имеющих длительный (многолетний) ряд наблюдений. Такие посты, по которым определяют ПУ реки, называют опорными уровнемерными постами. Их располагают по реке обычно через 200–300 км. На каждом опорном уровнемерном посту выполняют расчет обеспеченности стояния навигационных уровней через 5 см, а затем по обеспеченности определяют высоту ПУ над нулем графика данного уровнемерного поста. На свободных реках с интенсивным судоходством ПУ должен иметь обеспеченность 95–99 %, т.е. он практически является низким, меженным уровнем воды. На реках с неинтенсивным судоходством ПУ может иметь обеспеченность 80–90 %.

На шлюзованных участках рек и на каналах за проектный уровень принимается НПУ каждого бьефа. Слово «бьеф» происходит от французского *bief* — плёс, это участок реки между двумя соседними плотинами. Часть реки выше подпорного сооружения называется **верхним бьефом**, а часть реки ниже подпорного сооружения — **нижним бьефом**.

В нижних бьефах гидроэлектростанций, где уровень воды значительно колеблется в течение суток, за суточный ПУ принимают обычно минимальный уровень воды. Этот уровень определяют по колебаниям уровня воды на перекатах. Помимо опорных уровнемерных постов на реке имеются промежуточные уровнемерные посты. Это те же постоянные уровнемерные посты, расположенные между опорными.

Выбранный проектный уровень воды переносят на все промежуточные и временные уровнемерные посты путем построения графиков связи уровней на опорном и на каждом из промежуточных постов. Графики связи уровней строят на миллиметровой бумаге по данным натурных наблюдений за уровнями воды.

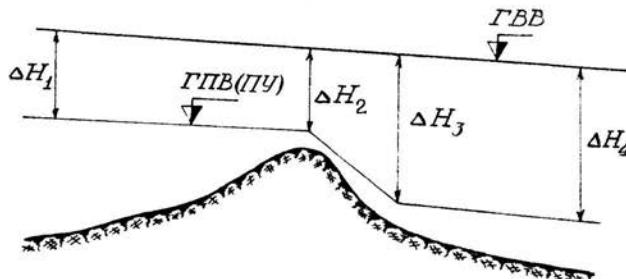


Рис. 9. Срезка уровней воды в реке

Временные уровнемерные посты устанавливают на характерных переломах профиля реки, т. е. в местах впадения крупных притоков, на участках резкого расширения или сужения русла и на лимитирующих перекатах (на основных перекатах).

Нули всех уровнемерных постов связывают нивелированием. Уровень воды в реке в момент нивелирования называют рабочим, а приведенный к одному моменту времени для всей реки — приведенным или мгновенным.

Чтобы правильно составить продольный профиль реки или план русловой съемки, необходимо от рабочих глубин, т.е. глубин реки, полученных фактически во время промеров, перейти к глубинам при ПУ — проектном уровне воды. Обозначим  $H_{\text{пр}}$  — отметка ПУ воды, а  $H_p$  — отметка рабочего уровня воды (уровня в момент промеров).

Тогда

$$\Delta H = H_p - H_{np}.$$

Эта разность и называется срезкой.

Срезку вычитают (или прибавляют) из каждой измеренной глубины. На разных частях реки срезка — величина переменная. Это подтверждает рис. 9. В верхней части переката срезка  $H_1$  и  $H_2$  будет значительно меньше срезки  $H_3$  и  $H_4$ .

## 1.8. ОДНОДНЕВНАЯ И МГНОВЕННАЯ СВЯЗКИ УРОВНЕЙ ВОДЫ

Для правильного вычисления размера срезки  $\Delta H$  и для определения продольного уклона реки  $i$  необходимо заданный проектный уровень воды перенести на основные перекатные реперы. Следует помнить, что перекаты на реке всегда обследуют особенно тщательно. На несложных перекатах устанавливают не менее двух реперов, а на сложных — три-четыре репера. Во всех случаях один репер устанавливают в верхней части переката, а другой — в нижней. Если принято решение заложить третий репер, то его устанавливают в районе гребня переката. Если должно быть установлено четыре репера, то два из них располагают на противоположных берегах реки по направлению оси переката. Перенос (привязку) проектного уровня на значительном участке реки производят методом однодневной связки уровней воды, а на небольшом участке — методом мгновенной связки уровней воды.

Сущность связки уровней воды заключается в фиксации в определенный момент времени (дата, часы, минуты) рабочего уровня воды против реперов между уровнемерными постами и последующем вычислении отметок проектного уровня воды. Для этого в заранее выбранных местах в землю прочно забивают урезные колья длиной не менее 70 см на глубину не менее 40 см. Такие урезные колья называют точками однодневной связи (ТОС). Колья ТОС забивают вертикально в твердый грунт русла реки так, чтобы верхний срез колья был на одном уровне со свободной поверхностью воды. Работу эту можно выполнять только в безветренную погоду. Можно забивать кол в вырытую на сухом берегу ямку, соединенную канавкой с основным водотоком. Такая методика установки ТОС практикуется на участках устойчивых нагонных ветров. В каждом месте ТОС забивают не менее двух урезных кол (основной и контрольный), записывая время их установки.

Существует и другая методика установки ТОС: в ряд вдоль течения реки забивают три кола так, чтобы они были ниже горизонта воды на разных уровнях и в определенной день и час линейкой измеряют высоту воды над кольями ТОС. Нумерацию ТОС ведут снизу вверх по течению реки, т.е. со стороны устья. Связку выполняют всегда в период наиболее устойчивого стояния меженных уровней воды, близких к проектному. Во всяком случае, рабочий уровень воды при связке не должен превышать проектный уровень воды больше, чем на 1 м.

Практически ТОС располагают через 1–3 км, а также на характерных перегибах профиля реки (пороги, перекаты, плесы, повороты, устья притоков и т. д.). Вообще говоря, название «однодневная связка» — довольно условное название. Если амплитуда суточного колебания воды в реке не более 3 см, то забивка кольев ТОС может быть растянута и на 2–3 дня. Мгновенная связка осуществляется путем одновременной забивки кольев ТОС в заранее намеченный момент времени.

Немедленно после забивки всех намеченных кольев ТОС приступают к их привязке к соответствующим реперам. Осуществляется привязка нивелированием IV класса в возможно кратчайший срок. Для этого работа выполняется несколькими нивелирными бригадами (рис. 10). Нивели-

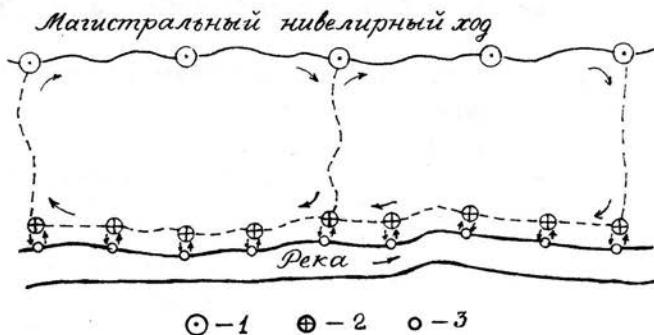


Рис. 10. Расположение точек однодневной связки  
1 — реперы магистрального хода; 2 — временные реперы  
ТОС; 3 — урзные колы

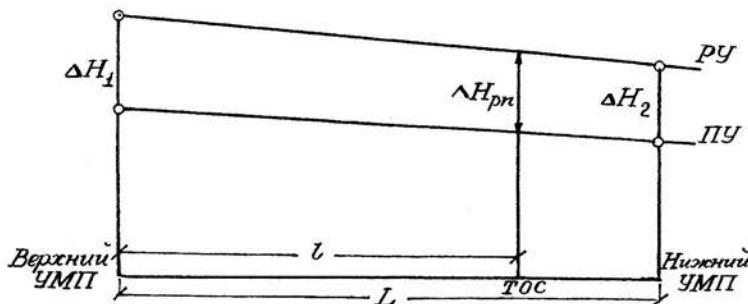


Рис. 11. Определение срезки у репера ТОС

рование кольев ТОС осуществляется двойным ходом. Допустимая невязка по ходу

$$f_{\text{мм}} = 20\sqrt{L_{\text{км}}} \text{ или } f_{\text{мм}} = 5\sqrt{n},$$

где  $L$  — длина хода, км;  $n$  — число штативов.

Последнюю формулу применяют, когда на 1 км хода приходится более 15 штативов.

По разности рабочих и проектных уровней вычисляют размеры срезок (рис. 11)  $\Delta H_1$  и  $\Delta H_2$  соответственно у верхнего и нижнего уровнемерных постов, а потом срезку у каждого репера ТОС:

$$\Delta H_{\text{рп}} = \Delta H_1 - \frac{\Delta H_1 - \Delta H_2}{L} l,$$

где  $L$  — расстояние между постами;  $l$  — расстояние от верхнего поста до данного репера ТОС. Эти расстояния определяют по топографической или лоцманской картам.

Временные уровнемерные посты должны быть оборудованы за 15–20 дней до начала нивелирования реки, а наблюдения на них начаться не позже чем за 5 дней до привязки ТОС. В день наблюдений ТОС замеры уровней воды на уровнемерных постах ведут через 3–4 ч.

## 1.9. ТОЧНОСТЬ НИВЕЛИРОВАНИЯ РЕКИ

### 1.9.1. Допустимые ошибки определения падения водной поверхности

Для вычисления допустимых ошибок при определении падения  $h$  реки в первую очередь примем во внимание следующее: многолетний опыт проектирования показывает, что на стадии технического проектирования ошибку в падении  $h$  водной поверхности на протяжении участка между двумя гидроузлами  $A$  и  $B$  (рис. 12) принимают равной 0,5 м. Обозначим эту ошибку как предельную:  $h = 0,5$  м. Тогда средняя квадратическая ошибка в определении падения верхнего бьефа гидроузла  $B$

$$m_h = \Delta h / 2,5 = 0,2 \text{ м.}$$

Принимая схематически, что ТОС, с помощью которых мы определяем уклоны реки, размещаются, в среднем, примерно на одинаковых расстояниях друг от друга, мы тем самым как бы разбиваем верхний бьеф рассматриваемого гидроузла  $B$  на  $n$  равных частей:

$$n = S / S_n = h / h_n,$$

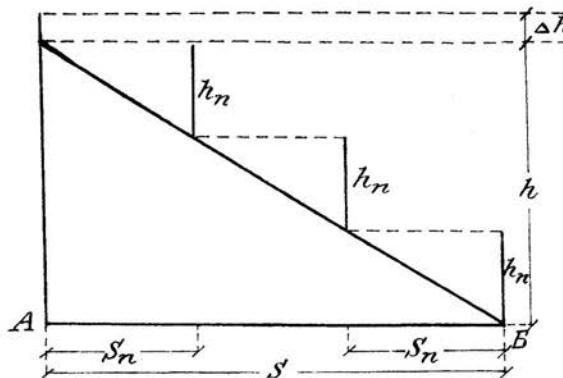


Рис. 12. Падение реки между гидроузлами  $A$  и  $B$  и между ТОС

где  $S$  — длина всего бьефа;  $h$  — падение бьефа на всем его протяжении;  $S_n$  и  $h_n$  — соответственно то же самое для части бьефа между ТОС.

Тогда ошибка падения водной поверхности на участке  $S_n$  между ТОС

$$m_{h_n} = \frac{m_h}{\sqrt{n}} = \frac{m_h}{\sqrt{h/h_n}} = \frac{0,2}{\sqrt{h}} \sqrt{h_n},$$

где  $h_n$  — падение реки между смежными ТОС;  $m_{h_n}$  — средняя квадратическая ошибка  $h_n$ .

Поскольку на равнинных реках для ГЭС обычно проектируется напор воды порядка 25–30 м, можно написать

$$m_{h_n} = \frac{0,2}{\sqrt{30}} \sqrt{h_n} = \pm 0,036 \sqrt{h_n} \text{ или } m_{h_n} = \pm (36 \sqrt{h_n}),$$

где  $h_n$  — в метрах;  $m_{h_n}$  — в миллиметрах.

Для предрасчета ошибок между ТОС практически поступают следующим образом:

1. По карте определяют длину  $S$  и общее падение  $h$  исследуемого участка реки, а также длины, уклоны и падения отдельных ее участков.

2. На карте соответствующего масштаба (в зависимости от длины реки масштабы колеблются от 1:100 000 до 1:25 000) для каждого участка реки намечают ТОС для нивелирования урезов воды.

3. Вычисляют средние падения по каждому участку:

$$h = i_{cp} S_n,$$

где  $i_{cp}$  — средний уклон.

4. Вычисляют допустимые значения  $m_{h_n}$  и  $m_{h_n} / h_n$  в процентах.

### 1.9.2. Точность нивелирных работ

Средняя квадратическая ошибка геометрического нивелирования на 1 км хода

Таблица 2  
Точностные характеристики нивелирования

Класс нивелирования	$\eta$ , мм	$\sigma$ , мм	$f_h$ , мм	
I (среднее значение)	0,8	0,08	$3\sqrt{L_{\text{км}}}$	$0,3\sqrt{n}$
I (предельное значение)	1,0	0,2	$5\sqrt{L_{\text{км}}}$	$1,2\sqrt{n}$
II	2	0,4	$5\sqrt{L_{\text{км}}}$	$1,2\sqrt{n}$
III	5	1,0	$10\sqrt{L_{\text{км}}}$	$2,5\sqrt{n}$
IV	10	2,0	$20\sqrt{L_{\text{км}}}$	$5\sqrt{n}$
Техническое повышенной точности	12	2	$30\sqrt{L_{\text{км}}}$	$6\sqrt{n}$
Техническое	20	4	$50\sqrt{L_{\text{км}}}$	$10\sqrt{n}$
Тригонометрическое	80	15	$200\sqrt{L_{\text{км}}}$	—

Примечание.  $f_h$  — допустимая невязка по ходу, мм;  $L_{\text{км}}$  — длина хода, км;  $n$  — число штативов в ходе

$$m_{\text{км}} = \sqrt{\eta^2 + \sigma^2},$$

где  $\eta$  и  $\sigma$  — соответственно случайная и систематическая ошибка на 1 км.

Принятые в нашей стране значения  $\eta$ ,  $\sigma$  и  $f_h$  сведены в табл. 2.

Средняя квадратическая ошибка нивелирования по ходу

$$m = \sqrt{\eta^2 L + \sigma^2 L^2}.$$

При предрасчетах систематической частью ошибки можно пренебречь, так как она значительно меньше случайной, тогда приближенно

$$m = \eta \sqrt{L_{\text{км}}},$$

где  $L_{\text{км}}$  — длина хода.

### 1.9.3. Точность нивелирования урезов воды

Нивелирование урезных колец ТОС производят от пунктов магистрального нивелирного хода по схеме (рис. 13). В этом случае ошибку  $m_h$  в определении падения  $h$  водной поверхности реки на данном участке можно определить по формуле

$$m_h^2 = m_L^2 + m_{l_1}^2 + m_{l_2}^2 + 2m_\Phi^2,$$

где  $m_L$  — ошибка магистрального хода;  $m_{l_1}$  и  $m_{l_2}$  — средние квадратические ошибки рабочих ходов;  $m_\Phi$  — ошибка фиксации уровня воды.

Известно, что

$$m_L = \eta \sqrt{L_{\text{км}}}, \quad m_\Phi = \pm 10 \text{ мм.}$$

Принимая во внимание, что

$$m_{l_1} = \eta' \sqrt{l_1}, \quad m_{l_2} = \eta' \sqrt{l_2},$$

т. е. большинство рабочих ходов следует нивелировать одним и тем же классом нивелирования, а также то, что  $m_h \leq m_{h_n}$ , отношение  $m_h/m_{h_n}$  должно быть меньше единицы, но в то же время желательно, чтобы оно было как можно ближе к единице.

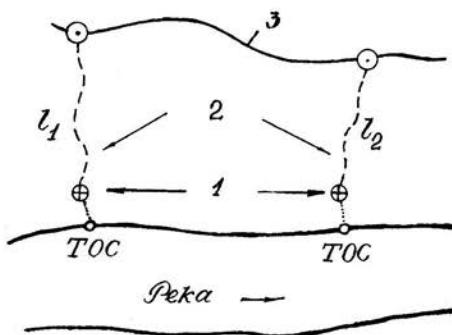


Рис. 13. Схема нивелирования урезов воды ТОС

1 — временные реперы ТОС; 2 — рабочие нивелирные ходы; 3 — магистральный ход

При  $m_h/m_{h_n} \approx 1$  ошибка

$$m_h = m_{h_n} = 36\sqrt{h_m},$$

где  $h_m = i_{cp} S_n$  (см. 1.9.1).

Тогда

$$m_h^2 = (\eta')^2 (l_1 + l_2) + (m_L^2 + 2m_\Phi^2),$$

откуда

$$\eta' = \sqrt{\frac{m_h^2 - (m_L^2 + 2m_\Phi^2)}{l_1 + l_2}}.$$

По этой формуле можно определить класс нивелирования рабочих ходов по среднему уклону участка реки и по конкретным значениям расстояний между реперами.

Если рабочие нивелирные ходы нивелируют с той же точностью, что и магистральный ход (при близости магистрального хода к руслу реки), то

$$\eta = \sqrt{\frac{m_h^2 - 2m_\Phi^2}{L + l_1 + l_2}}.$$

Точность магистральных нивелирных ходов зависит от уклона реки, но она обычно не выше II класса. Нивелирование I класса в практике гидротехнических изысканий вообще не применяется. Точность рабочих ходов обычно на одну ступень ниже точности магистральных ходов (или такая же). Значения в табл. 3 характеризуют класс нивелирования в зависимости от уклона (падения) реки.

Как видим, для создания высотной основы вдоль реки в большинстве случаев прокладывают магистральный (основной) ход или систему нивелирных ходов III-IV класса. При этом протяженность ходов III класса определяется расстоянием между исходными реперами II класса. Практически всегда удается разделить нивелирный ход IV класса на ряд секций с опорой на реперы высшего класса. Поэтому

Т а б л и ц а 3

**Выбор класса нивелирования**

Падение реки на 1 км, см	Магистральный ход	Привязка урезов
До 10	II класс	II класс
10–25	III класс	IV класс
25–50	IV класс	Техническое нивелирование
50–100	Техническое нивелирование	Тригонометрическое нивелирование

му для выбора отметок НПУ почти во всех случаях достаточна точность нивелирования IV класса

Допустимая длина ходов нивелирования IV класса между реперами высших классов не должна превышать 75 км для одиночных ходов и 150 км для двойных ходов. Висячие ходы прокладываются всегда в прямом и обратном направлениях, и их длина (в одном направлении) должна быть не более 50 км.

В случае весьма малых уклонов реки (3 см/км и менее) — класс нивелирования устанавливается особым расчетом.

#### 1.10. ПРОМЕРЫ ГЛУБИН

Для построения продольного (и поперечного) профиля реки и для решения различных задач судоходства выполняют промерные работы. Промеры производят для определения глубин и для выявления характера рельефа дна. Результаты промеров используют для судоходства, для составления проектов гидротехнических сооружений, для получения плана русла реки, для построения продольных и поперечных профилей дна.

Глубина воды измеряется по вертикали от поверхности до дна. Места, где измеряются глубины, называют промерными вертикалями. Глубины, измеренные в разное

время, часто несопоставимы из-за колебаний уровня воды. Поэтому при промерах ведут наблюдения за уровнем воды в течение всего периода измерений, чтобы затем все глубины привести к одному расчетному уровню. Промеры глубин для построения продольного профиля ведут по осевой линии русла или по фарватеру. Для построения поперечных профилей измерения глубин реки ведут по поперечникам.

Приборы — наметка, лот и эхолот. Кратко рассмотрим их.

Для измерения глубин до 5 м применяют наметку — шест длиной 6–7 м и диаметром 4–5 см, лучше из ели. Наметку делят на двухдцатиметровые интервалы, попеременно окрашивая деления нечетных метров белым и черным цветом, а четных — белым и красным цветом. Начальный (первый) метр делят на дециметры. Порядковые номера делений подписывают краской или выжигают на дереве.

При глубинах более 6 м применяют ручной или механический лот (в зависимости от глубины и скорости течения). Приборы для измерения глубин можно разделить на три группы по принципу действия: ручные, механические и акустические.

Ручной лот применяют при глубинах до 20 м и скорости течения не более 1 м/с. Он состоит из груза — это обычно чугунная, цилиндрическая болванка массой от 3 до 10 кг. К ушку болванки-грузила крепится лотлинь — пеньковый или капроновый трос диаметром 6–8 мм или стальной трос диаметром 2–4 мм. Лотлинь, начиная от нижней плоскости груза, маркируют марками-разметками по стальной рулетке: первые 10 м — через дециметр, а от 10 до 20 м — через 20 см.

Отсчет по ближайшей марке лота берут в момент, когда лотлинь занимает вертикальное положение. Лотлинь надо ежедневно компарировать стальной рулеткой, поскольку в процессе промеров он растягивается, а после сушки укорачивается. Если лотлинь растянут, то поправки за компарирование вводят со знаком плюс, а если укорочен — со знаком минус.

Механический лот (его чаще называют рыболов) применяют при скорости течения больше 1 м/с и на глубинах до 100 м. Груз у него обтекаемый и с хвостом-оперением, как у рыбы, за что он и получил свое название — рыболов. Масса груза — от 10 до 60 кг. Опускается в воду рыболов с кормы движущегося судна при помощи лебедки. В момент, когда рыболов коснется дна, делают отсчет по счетчику длины вытравленного лотлиня и одновременно по специальному угломеру, который фиксирует с точностью 1-2° угол отклонения лотлиня от вертикали. В дальнейшем при вычислении глубин вводят поправку за этот угол, поправка всегда вычитается.

Эхолот — прибор для измерения глубин, основанный на принципе звуковой локации. Измеряют время прохождения ультразвукового импульса от излучателя до дна реки и обратно к приемнику. Зная скорость распределения ультразвуковых колебаний (в пресной воде  $v = 1462$  м/с) и время прохождения импульса  $t$ , можно определить глубину:

$$h = H + a = \sqrt{\left(\frac{vt}{2}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} + a,$$

где  $a$  — расстояние от излучателя до поверхности воды;  $l$  — расстояние между излучателем и приемником.

Запись профиля дна (батиграмма) ведется прожиганием на бумажной ленте в масштабе 1:100 с точностью измерения 2 %.

Эхолот отличается большей производительностью работ. В настоящее время применяют эхолоты ПЭЛ-2 (промерный эхолот) с диапазоном измерений от 3 до 20 м и его аналог «Кубань»; ПЭЛ-3 с диапазоном от 3 до 200 м; ИРЭЛ (инженерно-разведывательный эхолот), «Язь», «Сибирь». Диапазон ИРЭС — от 0,2 до 20 м, «Язи» — от 0,6 до 160 м.

Наиболее точно, хотя и крайне медленно, выполняются промеры глубин со льда (зимой) через лунки, расположенные в определенном створе. Летом промеры глубин выполняют во время движения промерного судна по опреде-

ленным направлениям, называемым промерными профлиями или галсами.

*Галс — отрезок пути судна, идущего зигзагообразным курсом, от поворота до поворота.*

Промеры выполняют от рабочего уровня реки, а затем измеренные глубины «срезают» к проектному уровню — к «нулю глубин».

Положение уровенной поверхности воды при различном наполнении русла изменяется непараллельно проектному уровню и поэтому размер срезки изменяется. Следовательно, в период промеров надо определить размер срезки в створе каждого репера.

### 1.11. СРЕЗКА УРОВНЕЙ

В периоды изменения уровня воды промеры глубин дают несопоставимые результаты. В этих случаях производят «срезку уровня», приведя результаты промеров к некоторому условному уровню (мгновенный уровень). Рабочие глубины, исправленные за размер срезки уровня, записывают в общую таблицу промеров глубин гидрометрической книжки.

Практически всегда поступают так: одновременно с определением размера срезки на ТОС берут отчет по рейке временного или эпизодического уровнемерного поста и записывают в журнал наблюдений. В дальнейшем этот отсчет позволяет вычислить срезку в течение всего периода производства промеров — надо лишь следить за изменением уровня воды по той же рейке.

Пример: путем нивелирования от репера определена срезка, равная 90 см, в тот же момент отсчет по рейке водомерного поста был равен 65 см. В момент промеров вода упала и отсчет уровня по рейке стал 45 см. Следовательно, срезка на время промеров

$$\Delta H = 90 - (65 - 45) = 70 \text{ см.}$$

Поскольку проектный уровень (ПУ) имеет высокую степень обеспеченности, срезка, как правило, имеет положительное значение и вычитается из промера  $T$ . Обозначим  $T_p$  — рабочий промер. Тогда срезанный промер

$$T_{\text{ср}} = T_p - \Delta H.$$

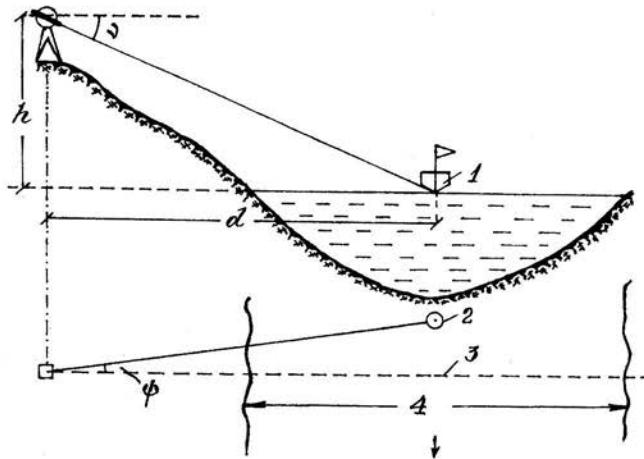
Измерение глубин сопровождается плановым координированием промерных вертикалей. Каждая промерная точка должна быть зафиксирована в плане, иначе она теряет свое значение. Определение планового положения промерных точек обычно называют одним словом: координирование. Координирование дает возможность нанести точки промеров на план или на профиль. На малых реках координирование поперечников можно осуществить при помощи натянутого через водоем троса с разметками.

На большой реке промеры глубин сопровождаются засечками:

А. Прямые засечки с берега двумя приборами (мензура или теодолит), установленными на пунктах постоянного или временного планового обоснования. При этом углы засечек должны быть  $30-150^\circ$ , а сами засечки выполняться синхронно по сигналу с судна. Это основной способ.

Б. Прямые засечки с берега одним прибором, когда судно движется по закрепленному створу. Створ обычно закрепляется массивными и устойчивыми вехами с топовыми (отличительными) фигурами в виде треугольника. При этом ближайшая к берегу веха имеет треугольник, обращенный острием вверх, а дальняя — острием вниз. Створ определяется совмещением треугольников в одной вертикальной плоскости. Цвет топовых фигур: на левом берегу — белый, а на правом — красный.

В. Вертикальные угловые засечки с одновременными отсчетами по горизонтальному кругу. Горизонтальную нить сети нитей трубы надо при этом наводить на ватерлинию промерного судна, на воду (рис. 14). Теодолит необходимо устанавливать как можно выше над водной поверхностью. Расстояние до промерной точки



**Рис. 14.** Вертикальная угловая засечка с одновременным измерением горизонтального угла  
 1 — судно; 2 — плановое положение судна; 3 — гидростратор; 4 — берега реки

$$d = h \operatorname{ctg} v,$$

где  $h$  — превышение оси вращения трубы над водной гладью;  $v$  — угол наклона.

На реках с большим продольным уклоном  $i$  формула приобретает второй член:

$$d = h \operatorname{ctg} v \pm \frac{h}{i} \operatorname{cosec} \psi,$$

где  $\psi$  — горизонтальный угол между гидростратором теодолита и направлением на промерную точку.

**Гидростратор** — линия, проходящая через теодолит перпендикулярно стрелке реки.

Все измерения на берегу осуществляются по команде с промерного судна (флажком или по радио) одновременно с промером.

Г. Обратные засечки с промерного судна двумя секстантами или одним секстантом, если судно движется строго по закрепленному створу.

**Секстант** — угломерно-отражательный прибор, основанный на принципе одновременного визирования по двум направлениям, которые образуют измеряемый угол.

Привязка промерных точек на галсах производится обычно не реже, чем через 10 мм (1 см) в масштабе плана или профиля. Погрешность определения места промера не должна превышать 1,5 мм на планшете ( $m = \pm 0,5$  мм).

### 1.12. ПОПРАВКИ В ИЗМЕРЕННЫЕ ГЛУБИНЫ

При измерении глубин следует учитывать поперечные уклоны водной поверхности, вызванные вращением Земли; действием центробежной силы, возникающей на поворотах русла; сильным боковым ветром; резким изменением уровня воды и другими причинами.

При резком подъеме уровня воды скорость течения увеличивается в средней части русла быстрее, чем у берегов. В результате на середине реки образуется выпуклость. При спаде воды наблюдается обратное явление. Внешние признаки: если мусор, плывущий по реке, прибивается к берегу, то уровень воды в реке поднимается (и наоборот).

Вследствие вращения Земли с запада на восток в северном полушарии в реках, текущих в меридиональном направлении под влиянием силы Кориолиса, масса движущейся воды отклоняется к правому берегу (если стать лицом по течению реки). На этом же принципе основан закон Бэра: реки, текущие в направлении меридиана, подмывают в северном полушарии правый берег. Сформулирован Карлом Максом Бером в 1867 г. (левый берег — пологий, правый — обрывистый). Значит, и уровень воды у правого берега всегда выше на

$$\Delta h_1 = (2\omega / g) \sin \varphi v B,$$

где — угловая скорость вращения Земли,  $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\varphi$  — широта места в градусах;  $v$  — скорость течения реки, м/с;  $B$  — ширина реки, сотни метров.

Эта формула в рабочем виде

$$\Delta h_1 = 1,49 \sin \varphi v B.$$

Если  $\varphi = 55^\circ$ ,  $v = 2$  м/с,  $B = 8$  (800 м), то  $\Delta h_1 = 19,5$  мм. Поправку  $\Delta h_1$  следует учитывать при передаче высотной отметки по уровню воды.

На поворотах реки возникает дополнительная центробежная сила, в результате которой внешняя сторона потока возвышается над внутренней на

$$\Delta h_2 = (v^2 / gR)B,$$

где  $R$  — радиус поворота реки, км.

При  $v = 2$  м/с,  $R = 2,3$  км,  $B = 800$  м превышение  $\Delta h_2 = 141,8$  мм.

### 1.13. МАСШТАБЫ ПРОФИЛЯ

Вычерчивание профиля реки в определенном масштабе на миллиметровой бумаге относится к стадии камеральных работ. Точность профиля характеризуется прежде всего точностью определения высот уровня воды и высот дна реки.

Масштаб продольного профиля зависит от ряда причин: от длины реки, ее уклона, от назначения профиля, т. е. от

Т а б л и ц а 4  
Масштабы профилей

Профиль	Масштаб	
	горизонтальный	вертикальный
Сокращенный продольный	<u>1:100 000–1:50 000</u> 1:50 000–1:100 000	<u>1:200–1:1 000</u> 1:200
Подробный продольный	<u>1:100 000–1:300 000</u> 1:25 000–1:100 000	<u>1:200–1:100</u> 1:50–1:200
Поперечный	1:5 000–1:2 000	1:200 или 1:100

*Примечание.* В числителе — для больших равнинных рек, в знаменателе — для горных и малых рек.

того, для какой стадии проектирования составляют профиль. Профили подразделяют на сокращенные и подробные (табл. 4).

Масштабы профиля не характеризуют его точность, а лишь показывают степень наглядности и подробности изображения, его общую картину. Точность всех последующих расчетов зависит от точности высот, подсчитанных на профиле. Мы рассмотрели все стадии создания продольного профиля реки.

## 2. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ ГЭС

### 2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Гидротехническими сооружениями называются специальные инженерные сооружения, позволяющие осуществлять различные водохозяйственные мероприятия.*

По сравнению с промышленными или гражданскими сооружениями они имеют ряд особенностей. Вот главнейшие из них:

1. Постоянное агрессивное воздействие воды — гидродинамическое (большинство гидротехнических сооружений работает под напором), химическое, биологическое и др.

2. Особые строительные условия — возведение гидротехнических сооружений отличается от других видов строительства необходимостью отвода воды, поэтому каждое сооружение в этом смысле уникально.

3. Серьезные изменения природы, а иногда и климата в районе строительства; крупные водохранилища преобразуют климат.

4. Требуются специальные меры борьбы с паводками, ледоходом и другими стихийными бедствиями.

5. Особая ответственность сооружений.

В России сейчас около 30 тыс. плотин и 150 тыс. гидротехнических сооружений.

Большинство гидротехнических сооружений работает под напором в условиях огромных динамических нагрузок. Возможны разрушения катастрофического характера. Так, например, в 1884 г. в США была разрушена земляная плотина высотой 20 м; катастрофа унесла 2 тыс. жизней.

Чем выше плотины — тем большее опасность. В 1963 г. в Италии на плотине Вайонт в чащу водохранилища обрушился оползень с соседней горы. Вытесненная им вода переклестнула через 250-метровую плотину, неся смерть и разрушения. В результате этой катастрофы погибли 2,5 тыс. человек. Сама же плотина не пострадала.

Сейчас 25 плотин в мире имеют высоту более 200 м. В СНГ строят и более высокие плотины. Плотина Ингурской ГЭС в Грузии имеет высоту 271,5 м; плотина Рогунской ГЭС на реке Вахш в Таджикистане достигает рекордной высоты — 335 м.

Чем же объясняется стремление к строительству высоких плотин, несмотря на определенный риск и огромные денежные расходы? Тем, что гидростанции являются самыми простыми и эффективными объектами для получения энергии. Постоянно возобновляющиеся гидроресурсы, отсутствие загрязнения окружающей среды, экономия природного (ископаемого) топлива — вот их преимущества. Каждые 3 тыс. кВт ч электроэнергии, получаемой от ГЭС, экономят около 1 т нефти или 2 т каменного угля.

Мы привыкли к большим цифрам и не всегда ясно представляем себе, как они велики. Одного киловатт-часа энергии достаточно, чтобы выпечь 88 кг хлеба, или сварить 42 кг сахара, или изготовить 10 м хлопчатобумажной ткани. В настоящее время потребление энергии на одного человека в мире колеблется от 100 Вт/сутки в отсталых странах до 10 кВт/сутки в развитых.

Перейдем к классификации гидротехнических сооружений. Они подразделяются на сооружения общего и специального назначения. Первые используются во всех или не-

скольких отраслях водного хозяйства, а вторые — в какой-либо одной отрасли и являются специфическими.

Гидротехнические сооружения общего назначения бывают шести типов: 1) водоподпорные, 2) водопроводящие, 3) регуляционные, 4) водозаборные, 5) водосборные, 6) сопрягающие.

1. Водоподпорные — создающие и поддерживающие подпор воды (дамбы, плотины и т.д.)

2. Водопроводящие — отводящие воду из водоемов и подводящие ее к месту потребления (каналы, лотки, трубопроводы, туннели, акведуки, дюкеры и др.).

*Акведук — мост для перевода водопроводных труб через препятствия (реку, овраг, дорогу).*

*Дюкер — напорный водовод, устраиваемый при пересечении водотока с другим водотоком при небольшой разности уровней между ними.*

Например, судоходные каналы пересекают на своем пути ряд речек и ручьев, воды которых пропускают под руслом канала через дюкеры. Дюкер устраивают и при пересечении канала или трубопровода с полотном железной или шоссейной дороги, глубокой речной долиной, оврагом, суходолом. В отличие от акведука дюкер проходит обязательно по выемке под руслом или его укладывают по склонам оврага или долины.

3. Регуляционные (или выправительные) — предназначены для регулирования русел рек с целью создания благоприятных условий их эксплуатации (струенаправляющие и защитные дамбы, полузапруды, льдозащитные стенки, ограждающие валы, польдеры и др.)

4. Водозаборные — обеспечивающие водой отрасли народного хозяйства путем забора воды из источника питания (сюда относятся водоснабжение, орошение, рыбоводство, гидроэнергетика и др.)

5. Водосборные — сооружения, с помощью которых вода отводится в водоприемники, водосбросы и водоспуски.

*Водосброс — общее название сооружений в теле плотины для сброса лишней (паводковой) воды из водохранилища. Глубинный водосброс — водослив.*

**Водоспуск** — труба, устанавливаемая для пропуска воды через плотину и работающая в условиях напорного движения воды.

6. Сопрягающие — служащие для безопасного сопряжения потоков при наличии больших уклонов и больших напоров воды (например, перепады и быстротоки).

**Перепад** — сооружение на канале или другом водоводе, сопрягающее два участка с разными уровнями воды.

**Быстроток** — сооружение в виде канала (лотка), направляющее поток воды с большой скоростью из верхнего участка водовода в нижний. Сооружают для пропуска рыбы и сплавного леса.

Гидротехнические сооружения *специального назначения* также бывают шести типов: 1) гидроэнергетические; 2) водно-транспортные; 3) мелиоративные; 4) рыбохозяйственные; 5) шламохранилища; 6) водопровод и канализация.

1. Гидроэнергетические — возводимые для использования водной энергии рек, озер или морей (гидроэлектростанции различных устройств).

2. Водно-транспортные — служащие для целей судоходства и лесосплава; к этому типу сооружений относятся не только каналы, но и шлюзы, судоподъемники, бревноспуски и плотоходы, а также порты, пристани, доки и др.

3. Мелиоративные.

**Мелиорация** — (от латинского «улучшение») — совокупность мероприятий по улучшению земель.

Сюда относятся оросительные и осушительные системы и все сооружения, возводимые на них (водозаборы, регуляторы, отстойники, дренажные устройства и др.). Сюда же следует отнести работы по химической мелиорации и агролесомелиорации, которые тоже требуют выполнения различных геодезических работ.

4. Рыбохозяйственные — связанные с разведением ценных пород рыб (рыбоходы, рыбоводные бассейны, рыбоподъемники при плотинах и др.).

5. Шламохранилища — служащие для транспортирования и хранения (складирования) отходов (шламов) гор-

но-обогатительных фабрик — это глухие плотины, пуль-попроводы, хвостохранилища и др.

6. Водопровод и канализация — сооружения, служащие для водоснабжения населенных пунктов и для очистки и отвода сточных вод.

Часто общие и специальные сооружения объединяют в единый комплекс — гидроузел. В СНГ строят, как правило, комплексные гидроузлы, например, для энергетики и одновременно орошения и рыбного хозяйства.

Гидротехнические сооружения на гидроузлах по срокам службы делятся на постоянные и временные. Временные сооружения служат только в период строительства или ремонта (перемычки, дамбы и др.); постоянные рассчитаны на весь срок службы гидроузла.

По запасу прочности и устойчивости и по их роли в системе гидроузла гидротехнические сооружения подразделяются на четыре класса.

По своему значению сооружения на ГЭС делятся на основные и второстепенные. Основные — те, выход которых из строя снижает производство электроэнергии (плотина, машинный зал ГЭС). Второстепенные — те, временный выход которых из строя не снижает производства электроэнергии (например, рыбоподъемники, судоходные шлюзы и др.)

Наконец, по производственной эффективности ГЭС подразделяется на категории:

Категория . . . . .	I	II	III	IV
Мощность, кВт . . . . .	> 1000	301–1000	51–300	50

Сейчас повсеместно распространены большие гидростанции. В США лишь 11 % от общего производства гидроэлектроэнергии приходится на долю ГЭС мощностью менее 30 МВт каждая. ГЭС — дорогостоящие сооружения, поэтому их вводят в действие очередями, а каждую очередь — отдельными агрегатами. Окупаемость строительства ГЭС — не менее 8 лет.

Здесь следует сказать и о ГАЭС — гидроаккумуляторных электростанциях. Их отличительная особенность —

наличие двух водоемов, нижнего и верхнего. В часы «пик» используется энергия водного потока из верхнего водоема. В часы «затишья», когда снижается потребление электроэнергии, электростанция перекачивает воду из нижнего водоема в верхний, тем самым аккумулируя (запасая впрок) гидроэнергию. Такие ГАЭС значительно экономичнее. Срок их окупаемости — 5 или 5,5 лет. В Лодейнопольском районе Ленинградской области на р.Шапше — притоке Ояти — запроектировано строительство ГАЭС. Проектная высота плотины 20 м. На береговом холме высотой 90 м будет создан огромный бассейн емкостью 92 млн. м<sup>3</sup>. В утренние и вечерние часы (пятичасовые «пики») станция будет вырабатывать электроэнергию, а в семичасовые промежутки между ними — запасать воду, работая в насосном режиме. Мощность ГАЭС превысит 1,5 млн. кВт.

## 2.2. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Мощностью  $N$  называется работа, производимая в единицу времени. По заданной мощности гидроузла строители выбирают количество и мощность отдельных станций и тип гидротурбин. Мощность ГЭС в киловаттах рассчитывается по формуле

$$N = 9,81\eta QH,$$

где  $Q$  — расход воды, проходящей через турбины ГЭС, м<sup>3</sup>/с (расчет производится для того времени года, когда горизонт воды в реке наиболее низок);  $H$  — напор воды в агрегатах, м;  $\eta$  — КПД турбин и генераторов, в среднем  $\eta = 0,75$ .

*Установленная мощность ГЭС — это суммарная мощность всех ее агрегатов.*

*Фактическая мощность — величина переменная, зависит от  $Q$ ,  $H$  и других факторов.*

В начале курса мы рассмотрели геодезический способ определения скорости течения и расхода воды на гидро-

метрической станции. Во многих расчетах гидротехнической практики необходимо и достаточно среднюю скорость воды в живом сечении вычислять теоретически. Для этого применяют формулу французского гидравлика Шези\*

$$v_{\text{ср}} = c\sqrt{Ri},$$

где  $c$  — скоростной коэффициент Шези, зависящий от шероховатости русла и гидравлического радиуса  $R$ ;  $i$  — продольный уклон поверхности уровня воды (уклон реки).

В свою очередь, гидравлический радиус  $R$  — отношение площади живого сечения к длине смоченного периметра  $P$ :  $R = \omega / P$ .

*Смоченный периметр  $P$  — длина линии соприкосновения воды со стенками русла в данном живом сечении.*

При относительно широких естественных руслах равнинных рек, где ширина русла больше средней глубины реки в 20 раз и более,  $P = B$ , где  $B$  — ширина реки. Тогда за гидравлический радиус можно принять среднюю глубину живого сечения  $T_{\text{ср}}$ :

$$R = T_{\text{ср}} = \omega / B.$$

Уклоном уровня воды  $i$  называется отношение падения уровня  $h$  на данном участке к длине этого участка  $L$  в горизонте (рис. 15):

$$i = h / L,$$

$$\text{или } i = (H_1 - H_2) / L.$$

Обычно уклон выражается падением реки в сантиметрах на километр, или безразмерной величиной —

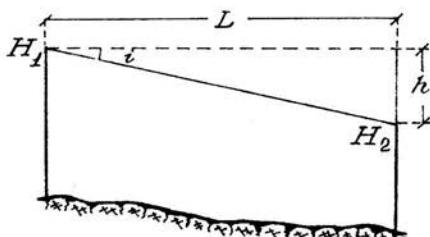


Рис. 15. Продольный уклон уровня воды в реке

Антуан Шези (1718–1798), закончил Училище путей сообщения, свою формулу, устанавливающую закон соотношения между количеством воды и скоростью потока, вывел в 1775 г. Впервые формула опубликована в США в 1897 г.

десятичной дробью, или в десятых долях процента — промилле. Например,  $L = 20$  км,  $h = 0,8$  м,  $i = 4$  см/км, или  $i = 0,00004$ , или  $i = 0,04\%$ .

Равнинные реки имеют, как правило, в верховьях уклоны  $0,1\text{--}0,15\%$ , в среднем течении —  $0,06\text{--}0,08\%$ , в низовьях —  $0,02\text{--}0,03\%$ .

Для вычисления коэффициента Шези с имеется много разных эмпирических формул. В инженерных расчетах наиболее распространена формула Маннинга. Ее предложил в 1885 г. ирландец Роберт Маннинг (1816–1897):

$$c = R^{1/6} / n.$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости, определяемый по специальным таблицам (для естественных русел в обычном состоянии он колеблется от 0,025 до 0,040).

Формула Шези справедлива для равномерного устанавившегося движения потока воды. Для случаев неравномерного и неустановившегося движения (паводки, половодья) формула неприемлема. Движение воды, близкое к равномерному, наблюдается на прямолинейных участках с правильной корытообразной формой русла в периоды устойчивой межени. Если есть данные измерений расходов и уровней воды, то можно вычислить коэффициент с по формуле

$$c = Q / \sqrt{\frac{\omega^3}{B} i};$$

где  $i$  — уклон водной поверхности, определяется нивелированием.

Подсчитав по этой формуле  $c$  при нескольких значениях уровня  $H$ , можно построить график зависимости  $c = f(H)$  и экстраполировать его до необходимых пределов изменения уровней. Расход воды в кубических метрах в секунду

$$Q = v_{cp} \omega$$

значительно колеблется в течение года. Например, на р.Дон (Ростов-на-Дону)  $Q_{\max} = 14290$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_{\min} = 150$  м<sup>3</sup>/с.

Если  $v_{cp}$  взять из формулы Шези, то

$$Q = \omega c \sqrt{Ri},$$

откуда

$$Q / \sqrt{i} = \omega c \sqrt{R} = K,$$

где  $K$  — модуль расхода воды данного русла, выражает пропускную способность русла реки.

Тогда

$$Q = K \sqrt{i}.$$

В тех случаях, когда имеются измеренные в натуре расходы воды, по ним строят кривые расхода. Между расходом воды и высотой стояния уровня существует определенная зависимость  $Q = f(H)$ . Чем выше уровень воды, тем больше и ее расход  $Q$ . Для построения кривой расхода на вертикальной оси графика откладывают уровни  $H$  над нулем поста или в абсолютных высотах, а по горизонтальной оси — расходы  $Q$ , полученные в натурных условиях. Получаемые точки располагаются узкой полосой, кривую расхода проводят по середине поля точек. Зависимость  $Q = f(H)$  всегда стремится представить в виде одной плавной кривой. Считается надежным, если кривая расхода, построенная по натурным наблюдениям, охватывает не менее 80 % всей амплитуды уровней ( $H$ ). Остальные 20 % достраиваются методом экстраполяции по формуле Шези. Так поступают, например, когда вода при высоких уровнях выходит на пойму. Экстраполированные участки кривой расходов изображают пунктирной линией.

По кривой расхода можно определять  $Q$  в данном живом сечении на каждый день, пользуясь только наблюдениями за высотой стояния уровня в данном створе (рис. 16). При разных условиях водного режима значения  $Q$  различны, потому что продольные уклоны  $i$  поверхности уровня при подъеме и спаде воды различны при одном и том же уровне. Значит, надо строить кривые расхода отдельно для периодов подъема и спада уровней, для зимних условий и для других характерных фаз водного режима (рис. 16).

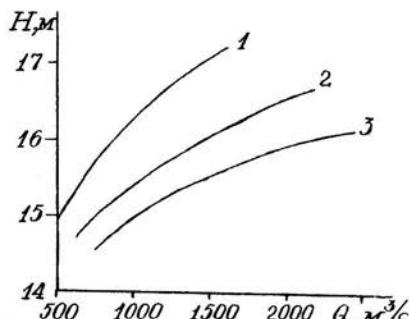


Рис. 16. Графики кривых расхода воды  $Q$

1 — ледостав; 2 — ледоход; 3 — открытое русло

до НПУ,  $м^3$ ;  $V_m$  — мертвый объем, расположенный ниже отметки сработки (наименьшего рабочего уровня),  $м^3$ ;  $T$  — время опорожнения водохранилища до  $V_m$ , с.

*Сток — количество воды, стекающее с площади водосбора за время  $T$ .*

Естественно, что разность  $V - V_m = V_{\pi}$  равна полезному объему водохранилища, называемому еще призмой сработки водохранилища.

Отношение объема сливной призмы к объему естественного (транзитного) стока  $W_e$  называется относительной емкостью водохранилища:

$$\rho = V_{\pi} / V_e.$$

Чем ближе  $\rho$  к единице, тем лучше зарегулирован сток и тем эффективнее работает ГЭС.

Определяя мощность турбин, надо учитывать, что в процессе работы напор  $H$  будет понижаться, поскольку станция будет срабатывать и ту воду, что приносит река, и ту, что запасена в водохранилище.

Расходы воды, проходящей через ГЭС, состоят из естественного (транзитного)  $Q_e$  расхода и попуска воды из водохранилища  $Q_b$ . При условии, что  $Q_e$  и  $Q_b$  равномерны, расход воды определяют так:

$$Q = \frac{W_e + (V - V_m)}{T},$$

где  $W_e$  — естественный сток за время  $T$ ,  $м^3/с$ ;  $V$  — объем водохранилища, заполненно-

## 2.3. ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ПЛОТИН

Плотина как подпорное гидротехническое сооружение преграждает водоток и создает выше себя водохранилище, которое тоже является гидротехническим сооружением, предназначенным для накопления и хранения воды. Сооружаемые для этой цели плотины в зависимости от создаваемого напора воды  $H$  — разности уровней верхнего и нижнего бьефа — делятся на малонапорные (8–10 м), средненапорные (10–40 м) и высоконапорные (более 40 м).

До начала нашего века не было плотин высотой более 40 м, но с широким внедрением в строительство бетона стали создавать высотные плотины. В мире 25 плотин уже перешагнули 200-метровую отметку. Плотина Ронгунской ГЭС в Таджикистане (р. Вахш) имеет высоту 335 м.

По основному материалу, из которого сложено тело плотины, различают плотины деревянные, земляные, каменные, камненабросные, бетонные и железобетонные.

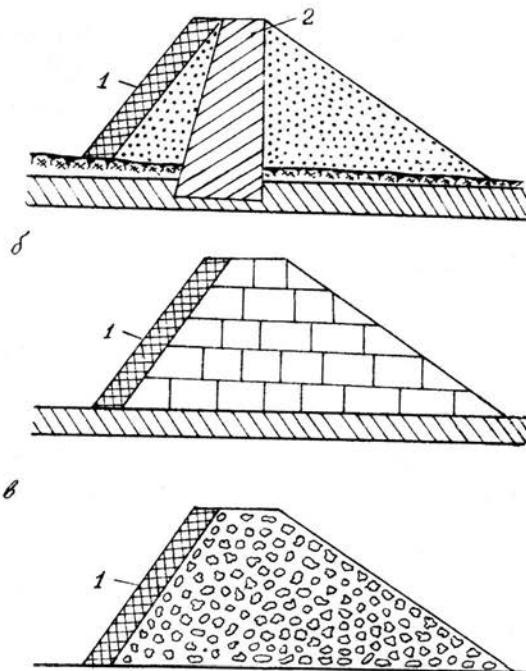
Земляные плотины, как правило, малонапорные и создаются как из однородного грунта — огромная насыпь, облицованная камнем или бетоном, так и из разнородных грунтов, где важным компонентом является глина или тяжелый суглинок.

Земляные плотины бывают: а) с верховой водонепроницаемой призмой (рис. 17, а); б) с водонепроницаемым ядром (когда плотину строят из материала, который легко фильтруется, то в теле плотины делают ядро из глины или камня, рис. 17, а); в) с центральной призмой; г) с диафрагмой.

Каменные плотины бывают: а) сухой кладки (рис. 17, б); б) камненабросные (наброска с бетонным экраном) — рис. 17, в — и их комбинации.

Высотные плотины сооружают только из железобетона. Строительный бетон имеет небольшую прочность на разрыв, но отлично выдерживает большие напряжения на сжатие.

Бетонные плотины бывают: а) гравитационные; б) арочные; в) контрфорсные.

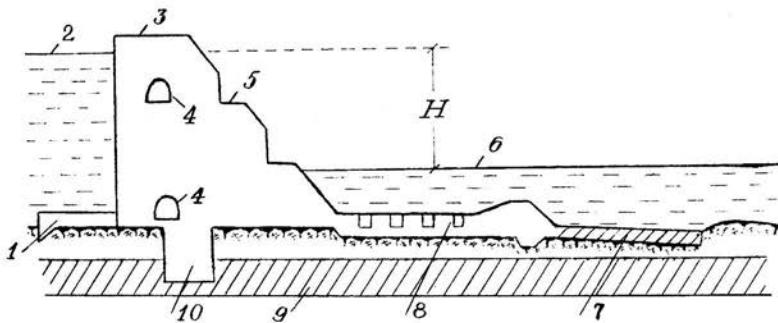


**Рис. 17.** Типы плотин: *а* — земляная плотина с водонепроницаемой призмой; *б* — каменная плотина сухой кладки; *в* — камненабросная плотина с экраном  
1 — экран; 2 — призма

Гравитационные плотины массивные, они сдерживают напор воды за счет собственной массы. Возводятся как на мягких, так и на твердых грунтах. Общая форма гравитационной плотины — прямоугольный треугольник с гипотенузой, обращенной вниз по течению (рис. 18). Катеты этого треугольника передают горизонтальное давление воды на основание.

**Понур** — водонепроницаемое покрытие дна со стороны верхнего бьефа для уменьшения фильтрационного расхода воды и опасности разрушения основания плотины.

Для создания понура применяют глину, тяжелый суглинок, бетон и железобетон.



**Рис. 18.** Гравитационная плотина на мягком грунте

1 — понур; 2 — верхний бьеф; 3 — гребень плотины; 4 — потерна; 5 — берма; 6 — нижний бьеф; 7 — рисберма; 8 — водобой; 9 — водонепроницаемый грунт; 10 — зуб (замок до водонепроницаемого слоя грунта)

**Берма** — уступ на откосе, который придает откосу большую устойчивость. Служит берма и для иных технических целей, например для транспортных (дороги). Особенno часто бермы встречаются на низовых откосах земляных плотин, где они создаются для устойчивости от размыва атмосферными осадками. Бермы на земляных плотинах располагаются через 10–15 м и имеют ширину 1,5–2 м. Имеют они поперечный наклон к внутреннему краю для сбора воды и общий продольный уклон для отвода воды к одному из берегов.

Не надо путать берму с рисбермой.

**Рисберма** — укрепленный участок русла в нижнем бьефе, который выравнивает скорость потока и защищает русло от размыва.

Рисбермы сооружают только на мягких грунтах. Они предохраняют русло от размыва потоком и защищают лежащее под ней дно реки от вымывания подземными водами. Рисберма гасит избыточную энергию потока путем перераспределения скоростей, для чего в плане расширяется, а также за счет трения воды о шероховатую поверхность.

Рисберма обеспечивает свободный выход подземного фильтрационного потока, поэтому выполняется в виде водопрони-

цаемой конструкции из бетонных плит, каменной наброски или фашических тюфяков. Выше рисбермы, но ниже плотины, ниже водослива или водосброса располагается водобой.

**Водобой** — сооружение ниже плотины в виде бетонной плиты, служит для гашения энергии водного потока и защиты русла от размыва.

Этой же цели служат водобойные колодцы в теле водобоя.

В теле плотины на рис. 18 две потерны (в переводе с французского буквально «боковой ход»).

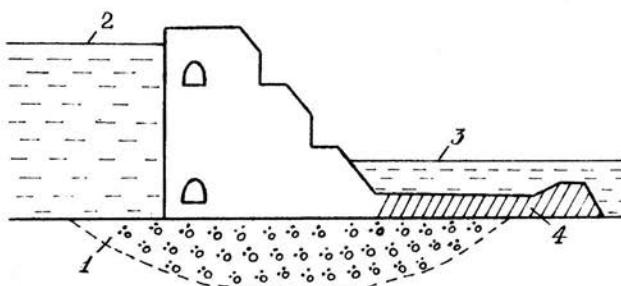
**Потерна** — смотровая галерея внутри массивного сооружения или под землей.

В теле плотины потерна служит для отвода воды, собираемой дренажем, а также для наблюдений за фильтрацией воды сквозь плотину и за состоянием внутренних частей плотины.

Весь комплекс рассмотренных гидротехнических сооружений: понур, водосливный порог (плотина), водобой, рисберма — вместе образуют флютбет (*flut-bett* — поток-ложе).

**Флютбет** — искусственно укрепленное ложе открытого водного потока.

Термин обычно применяют при возведении малонапорных плотин (с низким порогом) на мягких грунтах. Под флютбетом происходит фильтрация воды, поэтому флютбет работает в сложных условиях. На скальном грунте комплекс водосливного порога проще (рис. 19).



**Рис. 19.** Гравитационная плотина на скальном грунте

1 — зона цементации; 2 — верхний бьеф; 3 — нижний бьеф; 4 — водобой

На арочные плотины расходуется значительно меньше бетона, чем на гравитационные. На сооружение современных высотных плотин гравитационного типа требуется так много бетона и расходы столь высоки, что данный тип плотин становится экономически невыгодным. Арочная плотина — более изящное инженерное сооружение (рис. 20). Наружная грань плотины — верховая, внутренняя грань — низовая.

Размеры современных высотных арочных плотин велики: например, высота плотины Саянской ГЭС — 237 м. В плане арочные плотины имеют криволинейную форму, которая обращена своей выпуклой поверхностью навстречу потоку воды (рис. 20). Благодаря этому давление воды передается на скальные породы, залегающие по берегам реки, таким образом, плотина работает как арка, опирающаяся на берега. Такие плотины сооружают только на крепких стальных грунтах.

Обтекаемая чашеобразная дуга арочной плотины требует значительно меньшего количества бетона.

Выбор конструкции плотины определяется геологическими условиями района. Могут возникать и комбинированные варианты плотин, например, сочетание в одной плотине элементов арочной и гравитационной конструкций.

Контрфорсные плотины строят главным образом на скальных и полускальных основаниях. Контрфорсные плотины — это плотины, опирающиеся на контрфорсы — вер-

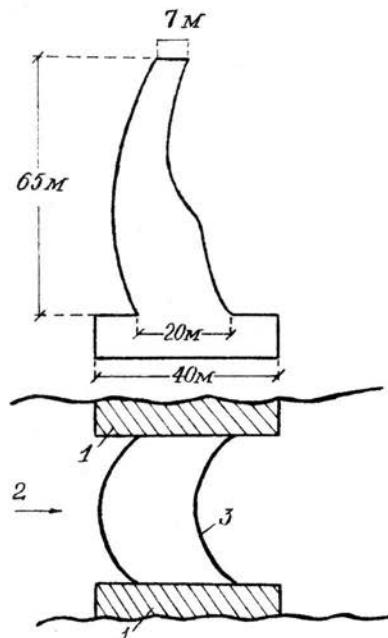


Рис. 20. Разрез и план арочной плотины

1 — анкер; 2 — направление течения реки; 3 — тело плотины

тикальные уступы, укрепляющие основную конструкцию плотины. Контрфорсы служат для передачи давления воды верхнего бьефа на основание. Высота контрфорсных плотин нередко превышает 100 м. К настоящему времени построено около 500 плотин, самая высокая — Зейская ГЭС, ее высота — 115 м.

#### 2.4. ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ГЭС

*Прирусовые ГЭС* бывают двух видов.

В первом варианте — машинный зал электростанции находится непосредственно в теле плотины и участвует в создании напора.

На равнинных реках сооружают сразу и плотину и здание ГЭС, оставляя проран, который позднее засыпают. Так строили первую очередь ДнепроГЭСа, плотины на Волге. В других случаях вначале строят две перемычки, осушают часть русла реки, возводят водосливную часть плотины. Затем пропуск воды ведется через донные отверстия плотины. Место под строительство здания ГЭС осушают перемычками. Так строили Братскую и Усть-Илимскую ГЭС.

Во втором варианте здание машинного зала не принимает непосредственного участия в создании напора воды (вторая очередь ДнепроГЭСа) (рис. 21).

*Деривационные гидроузлы* передают напор воды на лопатки гидротурбин с помощью деривационных сооружений

(рис. 22). Слово **деривация** означает отклонение (здесь: отвод). Деривационное сооружение безнапорных водоводов: открытых каналов, тоннелей или трубопроводов — служит для отвода воды из реки или водохранилища в гидротехнических или судоходных целях. Значит, деривация может быть как наружная, так и

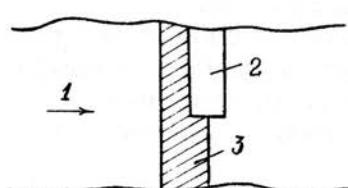


Рис. 21. Прирусовая ГЭС

1 — направление течения реки; 2 — здание ГЭС; 3 — плотина

тоннельная. Тот или иной вид деривации выбирается в зависимости от топографических условий местности и от глубины заложения водоприемника под уровнем воды. Здесь под водоприемником мы понимаем не сам водоток, а сооружение, принимающее воду для гидротехнических нужд, т.е. водоприемные установки машинного зала здания ГЭС.

Для того, чтобы вода не переливалась через бровки деривационного канала или не переполняла деривационный тоннель, в системе ГЭС устраивают водосброс. Глубинный водосброс — водослив. На турбины же вода поступает по водоспуску. В систему деривационных сооружений часто включаются акведуки и дюкеры для преодоления притоков реки или оврагов. Прирусовые ГЭС строят на равнинных реках, а деривационные — на горных.

Рассмотрим еще несколько понятий, связанных с гидротехническими сооружениями.

Мост не гидротехническое сооружение, но мосты часто встречаются в системе гидроузлов.

**Мост** — инженерное сооружение для перевода дороги через реку или канал. Мост состоит из опор и пролетных строений. Промежуточные опоры называют быками, крайние — устоями. Пролетное строение состоит из несущей конструкции и проезжей части.

Согласно определению под мостом должна быть вода. Если воды нет, то это сооружение — виадук (лат: *via* — путь, *duco* — веду). Сравни: акведук, дюкер.

**Виадук** — мост через сухое препятствие: овраг, ущелье, суходол, дорогу.

Через дороги перебрасывают и эстакады.

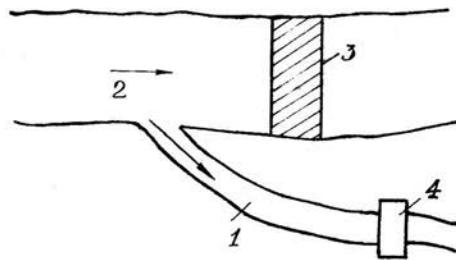


Рис. 22. Деривационный гидроузел  
 1 — деривационный канал; 2 — направление течения реки; 3 — плотина — головной узел; 4 — здание ГЭС — стационарный узел

*Эстакада — сооружение для пути на некоторой высоте над землей, допускающее проезд под ним.*

Чем же отличается виадук от эстакады? Отличие в разных высотах опор и длинах пролетов (чем выше опоры — тем длиннее и пролет, который они поддерживают). У эстакады равные опоры и длины пролетов тоже равны между собой.

### **3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ**

#### **3.1. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОДОХРАНИЛИЩ**

##### ***3.1.1. Общие сведения***

Постройка плотины на реке всегда приводит к поднятию воды в верхнем бьефе до отметки нормального подпорного уровня (НПУ), в результате чего образуется водохранилище.

*Водохранилище — искусственный водоем, образуемый в долине реки водоподпорным сооружением с целью перераспределения расхода воды в соответствии с требованиями водопользователей.*

Перераспределение воды достигается путем регулирования ее стока. Вода задерживается в периоды паводков и расходуется в период межени. Земная поверхность, затапливаемая водой, называется чашей водохранилища. Размер затопления при сооружении на реке плотины зависит от ее высоты и от рельефа речной долины.

На горных реках образуются вытянутые водохранилища сложной формы с малыми площадями затопления, но с большими глубинами; на равнинных реках — водохранилища озеровидные, со сложной конфигурацией, с мень-

шими глубинами, но значительными площадями затоплений.

Для примера приведем данные, характеризующие Братское водохранилище: его длина — 560 км, объем — до 180 км<sup>3</sup>, площадь зеркала воды — 5500 км<sup>2</sup> (более половины территории такого государства, как Ливан).

Водохранилища создают для разных целей: для обеспечения беспрерывной работы ГЭС, для орошения, для судоходства, для водоснабжения крупных городов и промышленных предприятий. Но при сооружении гигантских водохранилищ возникают и отрицательные явления: изменяется климат, в результате подъема грунтовых вод ухудшается плодородие почв, заболачиваются ценные сельскохозяйственные угодья, образуются малярийные очаги на мелководье, необходимы крупные расходы на берегоукрепительные работы.

### *3.1.2. Характерные уровни и емкости водохранилища*

Чаша водохранилища характеризуется площадью зеркала  $F$ , объемом  $V$  и уровнем воды  $H$ . Рассмотрим характерные уровни водохранилища:

- 1) НПУ — нормальный проектный уровень, по нему рассчитывают местоположения сооружений гидроузла;
- 2) УНС — уровень навигационной сработки (наименьший уровень, обеспечивающий проводку судов);
- 3) ФПУ — форсированный подпорный уровень (на период паводков); он же уровень катастрофического паводка — УКП;
- 4) УМО — уровень мертвого объема, т. е. наимизший рабочий уровень.

Этим уровням соответствуют следующие объемы:  $V_{\phi}$  — объем форсирования;  $V_{\pi}$  — полезный (или рабочий) объем;  $V_m$  — мертвый объем (при отметке УМО).

При отметке НПУ полный объем водохранилища

$$V = V_{\Pi} + V_{M} + V_{i},$$

где  $V_i$  — объем испарения и фильтрации.

Если зеркало воды предполагается горизонтальным, то найденная (вычисленная) емкость водохранилища называется статистической. Ею удовлетворяются при значительном запасе высоты подпора  $H$  относительно амплитуды колебаний воды в реке. В противном случае объем водохранилища находят более точно с учетом кривой подпора — очертания свободной поверхности воды в верхнем бьефе. Такая емкость водохранилища называется динамической.

Уровень воды в водохранилище примерно до половины его длины — горизонтальный, а дальше он повышается по кривой подпора (рис.23).

Длина водохранилища от плотины до конца кривой подпора определяется по приближенной формуле

$$L_{KM} = kH / i,$$

где  $H$  — высота подпора у плотины;  $i$  — средний продольный уклон;  $k$  — коэффициент,  $k = 1,5 \div 2,2$ .

При этом если значение  $i$  выражено в сантиметрах на километр, то  $H$  выражают в сантиметрах; если  $i$  выражено десятичной дробью, то значение  $H$  надо задать в километрах, чтобы в обоих случаях получить длину  $L$  в километрах. Например, если  $i = 4$  см/км,  $H = 10$  м,  $k = 2$ , то

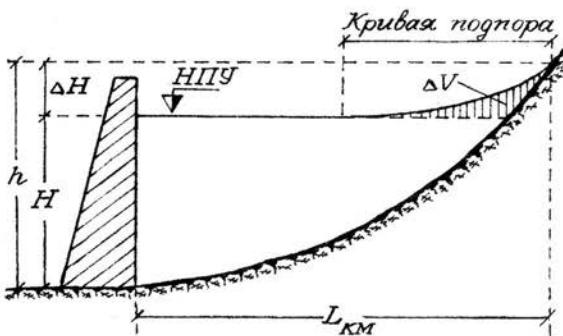


Рис. 23. Нормальный подпорный уровень и кривая подпора

$L = 2(100/4) = 500$  км. Если  $i = 0,00004$ , то  $L = 2(0,01/0,00004) = 500$  км. Здесь 500 км — длина верхнего бьефа. Вода поднимется по реке на 500 км и разольется, образуя водохранилище.

Затопления бывают постоянными и временными. При постоянном затоплении суши никогда не освобождается, что соответствует отметке УМО. Паводки вызывают временное затопление, они также обусловлены горизонтом НПУ, который снижается по мере сработки водохранилища и освобождает сушу на определенный период времени. Но временно затопляемыми площадями называют только те земельные площади, которые можно планово использовать в периоды ухода воды, т. е. когда срок затопления непрерывный (затопляемые пастбища, сенокосы и др.) Подтоплением называют поднятие уровня грунтовых вод на берегах в связи с поднятием воды в водохранилище.

Водохранилища бывают с суточным, недельным, годовым или многолетним регулированием. При суточном регулировании ГЭС работает только часть суток, в другую часть суток происходит накопление воды в водохранилище. Это обычно водохранилища малой емкости, их  $V_{\text{пп}}$  примерно равен 0,5 объема суточного стока. Такие водохранилища устраивают обычно на малых реках при мелких ГЭС. Водохранилища с недельным запасом рассчитаны на снабжение воды в выходной день. Их  $V_{\text{пп}}$  равен суточному стоку. Водохранилища с годичным регулированием собирают в себя все паводковые воды, их полезный объем должен быть не менее 30 % годового стока реки. Многолетние водохранилища собирают воду в многоводные годы и расходуют ее в маловодные годы. Их рабочий объем — 2–3 годовых стока реки.

Геодезическая служба на водохранилище обязана:

1. Обеспечивать уровнемерные и гидрометрические посты опорными нивелирными реперами.
2. Создавать планово-высотное обоснование и выполнять топосъемки для инженерных и гидрологических работ.
3. Выполнять промеры глубин и определять в натуре зоны затоплений.

4. Определять емкости (объемы) водохранилищ при разных уровнях его затопления.

Исходным материалом для проектирования водохранилища служит топографическая карта и продольный профиль реки.

1. На всю территорию водохранилища необходима топокарта одного масштаба (от 1:100 000 до 1:10 000 в зависимости от площади затопления) для решения следующих вопросов: а) установление границ затопления и подтопления; б) определение емкости водохранилища; в) установление границ лесосводки и сельскохозяйственного землепользования.

К вопросу лесосводки: 20 лет спустя Братское водохранилище красноречиво рассказало, к чему ведет невырубка лесов в ложах будущих морей. Его берега были и остаются выстелены отличной ангарской сосновой и лиственицей. Нужно извлечь урок из прошлого, сосредоточить силы и средства на рациональном использовании обреченных на гибель материальных ресурсов.

2. На некоторые отдельные части водохранилища нужны карты разных масштабов, более крупных, чем предыдущие: 1:10 000 — 1:1 000 (наиболее «ходовой» масштаб — 1:2 000), для решения следующих задач: а) берегоукрепительные работы и работы по инженерной защите при затоплении и подтоплении; б) работы по реконструкции подъездных путей и на площадках создания новых населенных пунктов; в) размещение портов, пристаней, портов-убежищ и т. д.

### 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ЗАТОПЛЕНИЯ И ЕМКОСТЕЙ ВОДОХРАНИЛИЩА

Для правильной организации работ гидроузла надо знать, сколько воды и за какой промежуток времени заполнит водохранилище до НПУ, сколько паводковой воды надо задержать для нормальной работы гидроузла и др.

Для решения этих задач надо знать площадь и емкость водохранилища при разных уровнях воды в нем.

Площадь зеркала водохранилища  $F$  определяют планиметром по горизонталям, обычно по карте масштаба 1:10 000 или 1:25 000 с сечением рельефа от 1 до 5 м.

Для определения емкости водохранилища вначале вычисляют объем послойно, между смежными горизонталами:

$$\partial V = \frac{h_0}{3} (F_1 + F_2 + \sqrt{F_1 F_2}),$$

где  $h_0$  — высота сечения рельефа горизонталами;  $F_1$  и  $F_2$  — площади затопления, ограниченные смежными горизонталами.

Затем

$$V = \sum_1^n \partial V_i.$$

В пойменных местах затопления с микрорельефом возникает большое число отдельно замкнутых горизонталей, ограничивающих выпуклости и впадины рельефа малой площади, объемы которых тоже должны быть учтены соответственно со знаками «плюс» или «минус». Объемы таких мелких образований рельефа можно подсчитать приближенно, с точностью до 1 % по приближенной формуле шарового сегмента

$$\partial V_m = 0,5h_m F,$$

где  $F$  — площадь, ограниченная замкнутой горизонталью;  $h_m \leq 0,5h_0$ .

Объемы выпуклых сегментов вычитают, а вогнутых — прибавляют к общему объему призм, ограниченных смежными горизонталами. Приведенные выше формулы являются приближенными.

Сложные очертания горизонталей на карте в районе поймы требуют специальной подготовки карты для определения площадей планиметром. Горизонтали предвари-

тельно «поднимают» тушью или карандашами разных цветов. Составляют сводные ведомости площадей затопления и объемов водохранилища, где учитываются выпуклые и вогнутые формы рельефа чаши водохранилища. Такие ведомости составляют обязательно в две руки. По сводным ведомостям составляют графики площадей и объемов водохранилища в зависимости от разных высот НПУ.

Итак, если сами формулы приближенные и определения расчетных данных по картам тоже сопровождаются ошибками, то их следует рассмотреть.

### 3.3. ТОЧНОСТЬ ПОДСЧЕТА ПЛОЩАДЕЙ И ОБЪЕМОВ ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ТОПОГРАФИЧЕСКИМ КАРТАМ

Определение емкости водохранилища по картам сопровождается целым рядом ошибок: 1) измерения площадей планиметром; 2) положения горизонталей по высоте; 3) интерполяции площадей затопления.

1. Ошибка измерения площадей планиметром составляет примерно 0,1–0,2 %, и при определении объемов водохранилища ею можно пренебречь. Здесь надо лишь иметь в виду, что с увеличением площади относительная ошибка ее определения уменьшается. Поэтому чем больше площадь водохранилища, тем более мелкого масштаба карты мы можем использовать (и наоборот).

2. Высоты точек земной поверхности, полученные по горизонтаям карты, могут содержать ошибки, зависящие от углов наклона местности и достигающие  $1/3$ ,  $1/2$  и даже  $2/3$  высоты сечения рельефа. Эти ошибки являются следствием ряда неточностей в изображении рельефа при съемке, основными из которых являются ошибки: а) в высотах пунктов обоснования, б) в высотах опознавков при стереотопографической съемке или в высотах станций при мезузльной съемке, в) в высотах и в плановом положении пикетов, по которым интерполируются горизонтали, и, наконец, в проведении самих горизонталей.

Ошибка  $M_F$  в определении некоторой площади  $F_B$  в зависимости от ошибок горизонталей по высоте  $M_h$  подсчитывается по формуле

$$M_F = 2 \frac{M_h}{h_0} F_B \left( 1 - \sqrt{\frac{F_B}{F_H}} \right),$$

где  $F_B$  и  $F_H$  — площадь, ограниченная соответственно верхней и нижней горизонталами (смежными);  $h_0$  — высота сечения.

Из формулы видно, что ошибка площади  $M_F$  прямо пропорциональна ошибке в высоте горизонтали  $M_h$  и наклону местности.

При малом соотношении площадей  $F_B/F_H$  (в равнинной местности), т. е. когда  $F_H$  велико, а  $F_B$  — мало, ошибки  $M_F$  могут быть велики.

3. Площади водохранилища на промежуточных уровнях, которые не совпадают с принятым сечением рельефа на карте, могут быть получены с помощью интерполяции. При малых площадях водохранилищ промежуточное положение искомой горизонтали обычно зарисовывают на карте, после чего ее обводят планиметром и получают искомую площадь  $F$ . Для средних и особенно для крупных водохранилищ применяют аналитический способ линейного интерполирования по формуле

$$F_k = F_H + \frac{F_B - F_H}{n} k,$$

где  $n$  — число интервалов, на которое делится высота сечения рельефа  $h_0$ ;  $k$  — номер интервала, для которого определяют площадь  $F$ .

Опыт показывает, что при соотношении площадей  $F_H/F_B \leq 1,5$  возможно линейное интерполирование площадей затопления. При большем соотношении  $F_H/F_B$  площади надо интерполировать по методу усеченного конуса, применяя формулу

$$F_k = F_H (1 + kA)^2,$$

где

$$A = \frac{1}{n} \left( \sqrt{\frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{н}}}} - 1 \right).$$

Площади водохранилищ на промежуточных уровнях можно также приближенно получить по графику (диаграмме) площадей затоплений.

Рассмотрим теперь точность подсчета объема водохранилища. Ошибка в емкости (объеме) отдельной призмы (слоя) вычисляется по формуле

$$m_{\partial V} = \sqrt{(F_{\text{в}} M_h)^2 + (F_{\text{н}} M'_h)^2},$$

где  $M_h$  и  $M'_h$  — ошибка соответственно в высоте верхнего и нижнего основания призмы (слоя между двумя смежными горизонталями).

Емкость всего водохранилища есть сумма объемов многих призм:

$$V = \sum_{i=1}^n \partial V_i.$$

Средняя квадратическая ошибка емкости всего водохранилища

$$m_V = \sqrt{m_{\partial V_1}^2 + m_{\partial V_2}^2 + \dots + m_{\partial V_n}^2}.$$

Таким образом, из опыта работы и приведенных выше формул следует, что ошибки емкости водохранилища зависят главным образом от выбранной высоты сечения рельефа. Чрезмерно большая высота сечения рельефа (10 м), не соответствующая характерным особенностям рельефа долины реки, может привести к ошибкам в объеме водохранилища, достигающим 25–30 % (1/3 всего объема).

По карте масштаба 1:25 000 с сечением рельефа через 5 м можно вычислить емкость водохранилища с ошибкой 6–7 %. Из опыта работ можно сказать, что:

1) на стадии технико-экономического доклада — ТЭД (или ТЭО) емкость водохранилища достаточно определять с точностью до 10–12 %;

2) на стадии технического проекта и для расчета периодов наполнения водохранилища емкость надо знать с точностью 3–5 %;

3) на стадии эксплуатации ГЭС геодезическая служба должна стремиться к тому, чтобы определить емкость водохранилища с точностью 1 % от общего объема.

#### 3.4. ВЛИЯНИЕ КРИВОЙ ПОДПОРА НА ЕМКОСТЬ ВОДОХРАНИЛИЩА

Движение воды в реке, перегороженной плотиной, неравномерное. По мере приближения к плотине возрастают глубины, увеличиваются площади живых сечений и, естественно, уменьшается скорость водного потока. Из-за этого свободная поверхность воды в продольном разрезе принимает вид кривой, которую называют кривой подпора (см. рис. 23). Кривая подпора не остается все время неизменной, она меняет свою форму и размер в зависимости от высоты подпора плотины  $H$ . Естественно, что чем больше  $H$ , тем больше и объем  $\Delta V$ . Его значение очень велико для средних и еще больше для крупных водохранилищ. Следовательно, высоту подпора надо непременно учитывать при определении емкости водохранилища.

Водохранилище по всей длине делят на несколько участков. Число участков устанавливают под условием, что в пределах каждого из них уровень водной поверхности условно можно принять за горизонтальный (рис. 24). Для

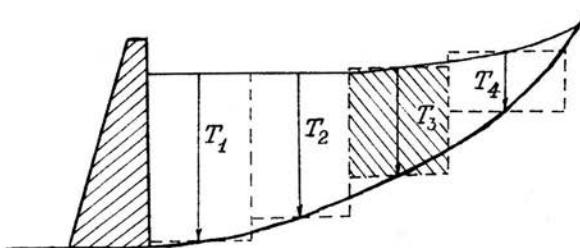


Рис. 24. Определение емкости водохранилища

каждого участка находят среднюю глубину  $T$ , соответствующую конкретной части кривой подпора на этом участке.

На каждом участке площадь зеркала воды определяют по карте по среднему уровню воды в середине участка. По этим данным находят объемы призм воды отдельно для различных частей кривой подпора (на рис. 24 одна такая призма заштрихована). Общий объем водохранилища находят путем суммирования объемов отдельных призм. Такой способ требует разбивки в натуре большого числа поперечников.

Вследствие вогнутой формы кривой подпора Н плотины всегда меньше полного падения  $h$  на данном участке реки. Потерянный напор обозначим  $\Delta H$  (см. рис. 23).

Георгий Федорович Глотов [2] отмечает, что потеря напора ведет к потере электроэнергии. Он приводит показательный пример: дополнительная потеря напора всего на 1 см приводит на Волжской ГЭС им. В.И.Ленина к годовой потере электроэнергии 4,5 млн. кВт·ч.

Кривую подпора можно построить, исходя из основной формулы гидравлики — формулы Шези (см. подраздел 2.2)  $v = c\sqrt{Ri}$ . Подставим в формулу Шези

$$v = Q / \omega; \quad i = \Delta h / l; \quad R = \omega / P,$$

где  $Q$  — расчетный расход воды для среднего живого сечения  $\omega$ ;  $\omega$  — среднее значение площади живого сечения на участке,  $\omega = (\omega_1 + \omega_2) / 2$ ;  $\Delta h$  — разность отметок уровней воды в двух смежных поперечных профилях реки (1 и 2 на рис. 25);  $l$  — расстояние между профилями;  $P$  — сомкнутый периметр;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — площади живых сечений в смежных профилях 1 и 2.

После подстановки

$$\frac{Q^2}{\omega^2} = c^2 \frac{\omega}{P} \frac{\Delta h}{l};$$

$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{Q^2 P}{c^2 \omega^3}$$

или

$$\Delta h = Q^2 Pl / c^2 \omega^3.$$

Последняя формула предназначена для построения кривой подпора по гидрометрическим данным. Формула пригодна для равнинных рек со скоростью течения не более 1 м/с.

На реках с быстрым течением к правой части формулы добавляется поправочный член за изменение скоростного напора по длине заданного участка водотока

$$\Delta h = \frac{Q^2 Pl}{c^2 \omega^3} + \frac{\alpha Q^2}{2g} \left( \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \right),$$

где  $\alpha$  — коэффициент увеличения скорости,  $\alpha = 1,0 \div 1,1$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с.

Значения величин  $\omega$ ,  $P$ ,  $c$  значительно изменяются при переходе от одного сечения реки к другому, поэтому мы можем построить кривую подпора по этим данным с большей и меньшей степенью точности. Чем больше будет «разбито» на реке (в натуре) поперечных профилей, тем точнее будет построена кривая подпора.

Расчетный расход воды  $Q$  — величина тоже не постоянная, она изменяется в зависимости от изменения напора плотины  $H$ . В связи с этим каждому конкретному значению расхода воды  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  соответствует своя кривая подпора. Изменяется положение кривой подпора — изменяется и объем  $\Delta V$  участка, заключенного между свободной водной поверхностью подпора и горизонтом НПУ.

Рассматривая вопрос о мощности ГЭС, мы уже говорили о графиках кривых расхода.

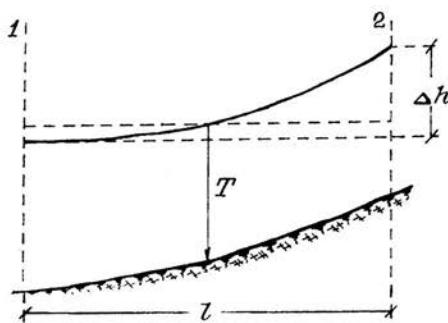
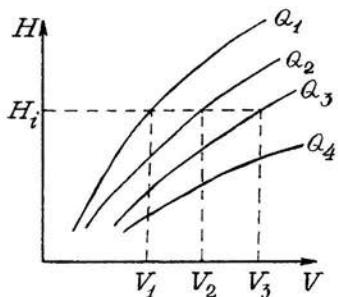


Рис. 25. Разность отметок уровней воды между смежными поперечными ками



**Рис. 26.** Определение динамических объемов водохранилища

пора и подсчитаны объемы  $V$  для различных уровней воды у плотины. Эта работа входит в обязанности геодезической службы.

### 3.5. ВЫСОТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НА ТЕРРИТОРИИ ВОДОХРАНИЛИЩА

На берегах водохранилищ проектируется и строится ряд разнообразных сооружений, и все они должны быть связаны по высоте как между собой, так и с НПУ водохранилища. В противном случае возможны затопления. Отсюда следует, что к точности высотного обоснования на территории водохранилища предъявляются жесткие требования. Высотная сеть должна быть закреплена надежными реперами и иметь единую систему высот, т.е. опираться на реперы государственной геодезической сети. Создание высотного обоснования на территории водохранилища осуществляется в четыре стадии (или четыре ступени).

**Стадия 1.** Развивают систему нивелирных ходов III класса. Она образует замкнутые полигоны периметром 60–70 км, равномерно расположенные по всей площади будущего водохранилища. Полигоны опираются на линии II класса, которые в настоящее время проложены вдоль всех крупных рек СНГ по коренному берегу и на удалении не более 20 км от их

русл. Особое внимание необходимо уделить закреплению на местности ходов, прокладываемых вне зоны затопления, так как они будут служить не только в период строительства, но и долгие годы при эксплуатации водохранилища.

Стадия 2. Внутри каждого полигона III класса прокладывают нивелирные ходы IV класса так, чтобы они делили этот полигон на 3–4 равновеликие части. Нивелирные ходы IV класса прокладывают в одном направлении, они должны проходить вблизи проектного контура водохранилища, в местах будущих инженерных работ и обязательно вдоль проектируемого судового хода (т. е. вдоль будущей трассы судоходства).

Обычно 1-я и 2-я стадии высотного обоснования создаются на местности одновременно и закрепляются постоянными реперами через каждые 5 км и временными — через 1–2 км (в среднем три временных репера между двумя постоянными). Постоянные реперы закладывают только в незатопляемых местах, а на площади, подлежащей затоплению, их заменяют временными.

Стадия 3. Это ходы технического нивелирования и технического нивелирования повышенной точности. Их прокладывают в виде одиночных ходов между линиями высших классов и закрепляют через 2–3 км временными реперами (столбы, закапываемые на глубину 1,5 м), а через 0,5–1 км кольями с кольцевой окопкой. Колья имеют толщину не менее 5 см, их забивают в землю на глубину 70 см.

Стадия 4. Это съемочные высотно-теодолитные ходы или мензульные ходы. В натуре работы 3-й и 4-й стадий выполняют совместно при создании съемочного обоснования.

### 3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА МЕСТНОСТИ ПРОЕКТНОГО КОНТУРА ВОДОХРАНИЛИЩА

Вынос в натуре проектного контура водохранилища (КВ) является одной из главных задач геодезических изысканий. Сущность работы заключается в определении и зак-

реплении на местности НПУ водохранилища с учетом кривой подпора. Известно, что кривая подпора не совпадает с какой-нибудь одной определенной горизонталью и в проекции на вертикальную плоскость дает кривую линию. В связи с этим кривую подпора разбивают на ряд участков со ступенями по высоте через 0,2–0,5 м, в пределах которых каждый участок КВ принимают за горизонтальный и именно его отбивают в натуре. КВ определяют на местности геометрическим (или тригонометрическим) нивелированием. Чаще всего для этого применяют техническое нивелирование. Высотное обоснование для определения КВ должно развиваться с учетом и спользования нивелировок, ранее проложенных для составления продольного профиля реки и для топографических съемок водохранилища. По точности это высотное обоснование для определения в натуре КВ должно соответствовать точности нивелирования III или IV класса. Нивелирные ходы такой точности прокладывают по обоим берегам реки. Точки контура будущего водохранилища начинают определять с проложения на местности рабочего хода технического нивелирования от ближайшего репера высотного обоснования в сторону местонахождения будущего КВ (линии затопления). Тут же непосредственно в поле по отсчетам черных и красных сторон реек вычисляют высоты связующих (переходных) точек. Когда отметка некоторой связующей точки будет близка (в пределах 0,5–0,7 м) к высоте НПУ, в ней (это точка *A* на рис. 27) забивают кол. От этого кола *A* нивелирный ход поворачивает в направлении КВ. От точки *A* нивелированием «из середины» по черной и красной сторонам реек определяют высоту точки *B*, а затем нивелированием «вперед» (см. рис. 27) отыскивают на местности промежуточные точки 1,2,3... с отметками, равными НПУ. При этом поступают следующим образом: рейку передвигают по склону до тех пор, пока на средней нити трубы нивелира не появится отсчет *b* с допуском 3–5 см (с точностью  $\pm 1$ –2,5 см), заранее вычисленный по формуле

$$b = H_A + a - H_{НПУ},$$

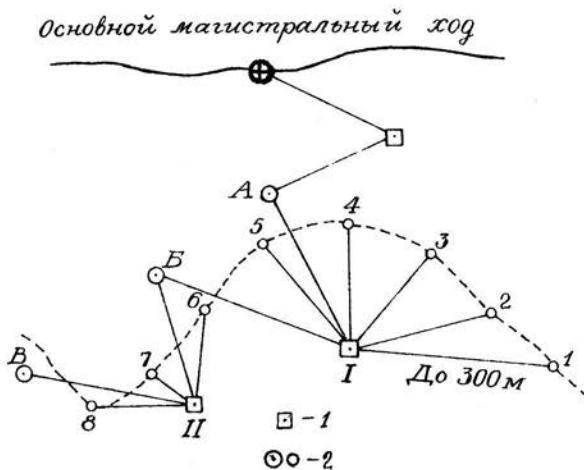


Рис. 27. Вынос на местность проектного контура

водохранилища

1 — станции нивелира; 2 — речные точки

где  $H_A$  — отметка связующей точки  $A$ ;  $a$  — отсчет по рейке, установленной в точке  $A$ .

Контроль производят по красной стороне рейки. Станции нивелира I, II, ... выбирают так, чтобы с них промежуточными точками ... 5, 6, 7 ... можно было зафиксировать характерные изгибы КВ. Точки на КВ определяют через 30–50 м, при длине луча визирования до 300 м. Контроль производят по красной стороне рейки. Общая длина рабочего хода между двумя реперами не должна превышать 15 км.

Если КВ проходит через населенный пункт или по территории промышленных предприятий, то дополнительно определяют отметки земли у оснований зданий и сооружений, расположенных выше НПУ порядка 3 м, а ниже НПУ — у всех объектов, расположенных на расстоянии до 100 м от КВ. Промежуточные точки закрепляют кольями длиной 70 см. На залесенных территориях с явно выраженным склонами положение проектного контура закрепляют просекой и затесами на деревьях, обращенными в сторону водохранилища. На затесах ставится надпись: «КВ».

Когда часть линии затопления определена, то ее спрямляют через 150–350 м и закрепляют углы поворота столбами, которые зарывают на глубину 1 м. Верхний срез располагают на уровне дневной поверхности. Рядом устанавливают столб-сторожок для опознавания. Его всегда располагают выше НПУ и в 0,5 м от КВ. Надписи на столбах делают всегда со стороны, обращенной к другому граничному знаку. По всем граничным знакам прокладывают теодолитный (или мензульный) ход и вычисляют координаты для определения зоны затопления в плане. При спрямлении КВ в зависимости от условий местности и важности объекта (лес, сельхозугодья, населенный пункт и т. д.) допускают стрелу прогиба  $s = 5 \div 30$  м, иногда даже и до 50 м (рис. 28).

**Стрела прогиба** — максимальное отклонение линии затопления будущего водохранилища от ломаной линии, которая соединяет точки, имеющие одинаковые отметки.

Естественно, что именно допустимое значение стрелы прогиба  $s$  определяет расстояние между граничными знаками (между столбами). На залесенных территориях с хорошо выраженным склонами плановое положение проектного КВ может быть определено на топографической карте масштаба 1:25 000 по горизонталям (и прокладывать теодолитный ход в таком случае не надо), а положение граничных знаков (столбов) — посредством опознавания их местоположения на карте и простейшими промерами от характерных контуров местности.

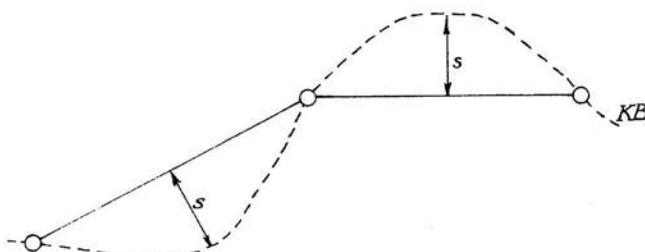


Рис. 28. Спрямление контура водохранилища:  $s$  — стрела прогиба

Предельная высотная ошибка  $\Delta h$  точки, закрепленной гравитационным столбом, не должна превышать разности высот начальной и конечной точек стрелы прогиба (см. рис. 28), тогда

$$\Delta h = s \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол наклона местности.

Величина  $\Delta h$  характеризует точность отбивки КВ на местности. Например:

$s, \text{ м}$ . . . . .	10	10	10	25
$\Delta\alpha, \text{ град.}$ . . . . .	0,5	1,0	2,0	2,0
$\Delta h, \text{ см}$ . . . . .	9	18	35	88

Точность определения и подробность обозначения КВ устанавливается в натуре в зависимости от степени хозяйственной значимости территории, которую пересекает линия затопления, от ценности затапливаемых угодий и от крутизны береговых склонов. Особенно тщательно надо производить определение линии КВ в застроенной части территории, тем более при малых углах наклона местности. Это следует из формулы

$$h = D \sin \alpha,$$

где  $h$  — превышение, м;  $D$  — наклонное расстояние, м.

Дифференцируя это выражение по переменным величинам, получим

$$\partial D = \partial h \operatorname{cosec} \alpha.$$

Если принять  $\partial h = 10$  см, то при угле наклона местности  $\alpha = 0^\circ 10'$  ошибка  $\partial D = 34$  м, а при  $\alpha = 5^\circ$  ошибка  $\partial D = 1,1$  м. Следовательно при одной и той же ошибке в высоте в первом случае КВ будет вынесен в натуру с ошибкой 34 м, а во втором — только 1 м.

Ориентировочно КВ при углах наклона местности  $\alpha < 10^\circ$  определяют техническим нивелированием, а при  $\alpha > 10^\circ$  — тригонометрическим нивелированием с помощью тахеометра. Иногда, в залесенных горных районах, учитывая сроки наполнения водохранилища водой, отбивку линии

затопления проводят в две стадии: 1) предварительно линию КВ отбивают (для определения участков сводки лесных массивов) барометрическим нивелированием, 2) затем окончательно — тригонометрическим нивелированием. Такая стадийность обусловлена тем, что в залесенной местности наиболее трудоемкими работами при выносе в натуру КВ являются не геодезические измерения, а рубка визирок и просек.

Высотное обоснование для определения предварительного КВ необходимо такое же, как и для определения проектного КВ геометрическим нивелированием, т.е. оно едино для обеих стадий.

Ходы барометрического нивелирования прокладывают длиной до 10 км и привязывают к реперам высотного обоснования. Методика работ следующая. На полевой барометрической станции, установленной на репере, наблюдают за изменением атмосферного давления воздуха. Полученные данные сообщают по двусторонней радиосвязи на передвижную станцию, которая определяет непосредственно высоты точек КВ. Точность отбивки контура КВ барометрическим способом примерно  $\pm 2$  м, предельная ошибка — 3 м.

Положение КВ не определяют вообще в полупустынных и пустынных районах, на болотах, в тундре, на крутых обрывистых местах (склоны ущелий) и в некоторых других случаях. Отбивка КВ в натуре выполняется на стадии составления рабочих чертежей. Одновременно устанавливают населенные пункты, подлежащие переносу или инженерной защите (дамбы, каналы), определяют районы лесосводок (вырубка затопляемого леса) и подсчитывают объемы лесовырубки, устанавливают районы мелководий и мероприятия для ликвидации их с целью предотвращения заболачивания.

На эти участки выполняется топографическая съемка масштаба 1:10 000-1:5 000 с сечением рельефа через 1 м. Контур водохранилища закрепляют постоянными знаками (столбами), которые по актам сдают в натуре управлению строительства и дирекции строящейся ГЭС. На тер-

ритории городов (при частичном их затоплении) КВ контролирует администрация районов, в лесах — дирекция лесхозов. К актам сдачи прилагают схематические карты масштабов 1:25 000 или 1:10 000 и ведомости координат границных знаков.

### **3.7. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩА**

В период эксплуатации водохранилища на нем ведут следующие наблюдения: а) за уровнями воды; б) за переработкой берегов; в) за заиливанием воды.

Для наблюдений за уровнями воды на водохранилище создают сеть уровнемерных постов.

Очертания КВ сохраняются только первое время после затопления. Затем воздействие воды изменяет очертание береговой линии. В одних местах берега смываются, подрабатываются, в других — намываются. Для изучения переформирования берегов выполняют техническое нивелирование на суше и промеры глубин в прибрежной зоне. Наблюдения за заиливанием ведут также по поперечникам.

В заключение отметим, что на стадии технического проекта положение КВ достаточно полно и наглядно можно получить и с помощью аэрофотосъемки в момент паводка, если отметки урезов воды при этом наиболее близки к проектной отметке НПУ водохранилища.

## **4. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ПЛОЩАДКЕ ГИДРОУЗЛА**

### **4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

При техническом проектировании составляют схему компоновки отдельных сооружений гидроузла, определяют объемы земляных, бетонных и других работ, составляют

проект организации работ и другие документы, необходимые для составления генеральной сметы строительства ГЭС. Для правильного составления сметы необходимо, чтобы ведомости объемов работ не содержали ошибок, превышающих 5 %.

Объемы работ, которые необходимо выполнить для возведения сооружения, могут быть подсчитаны, если известны формы и размеры данного сооружения и « пятно застройки », т. е. размещение этого сооружения на топографической карте. Поэтому в техническом проекте на каждое сооружение составляют технологический чертеж, на котором изображают вид, размеры и форму (очертания), характеризующие данное сооружение. Имея размеры сооружений, возводимых на площадке гидроузла, можно рассчитать масштаб топографической карты, необходимой для составления технического проекта, по формуле

$$M = S \cdot 10^3 / s,$$

где  $M$  — знаменатель численного масштаба карты;  $S$  — размер элементов сооружений в натуре, м;  $s$  — размер элементов сооружений на карте, мм,  $s \geq 2$  мм.

На площадке гидроузла размещается большое количество различных по габаритам сооружений. Для каждого из них в принципе можно рассчитать масштаб. Однако такой подход может привести к съемке отдельных участков в различных масштабах. Многомасштабность съемок создает технические и организационные трудности при создании планово-высотного обоснования и при составлении планов. Поэтому всегда надо стремиться к тому, чтобы разделить площадку гидроузла в соответствии с генпланом размещения сооружений максимум на 2–3 участка, установив для каждого из них наиболее рациональный для проектирования масштаб съемки. Учитывая, что основные гидротехнические сооружения располагаются в пойме реки, имеющей сложный и изрезанный рельеф, их проектирование производят обычно по картам масштаба 1:2 000 с сечением рельефа горизонталями через 1 м. Такая карта

обеспечивает подсчет объемов земляных работ по котлованам и дамбам глубиной или высотой более 3 м с точностью около 5 %. При глубине котлованов менее 3 м на карте того же масштаба рельеф надо изображать горизонталями с сечением 0,5 м.

На крупных гидроузлах, где проектируются большие сооружения, где разрабатываются котлованы глубиной 8-10 м и площадью более 50 га, для подсчета объемов земляных работ могут (при отсутствии карт масштаба 1:2 000) использоваться карты масштабов 1:5 000 и даже 1:10 000 с сечением рельефа горизонталями через 2 м.

Для проектирования населенных пунктов используют топографические съемки масштаба 1:1 000 с сечением рельефа горизонталями через 0,5 м. Окончательное местоположение сооружений гидроузла фиксируется на картах главной осью сооружения, которую и переносят на местность в период строительства.

Генеральный план — необходимая часть любого проекта, его назначение — дать строителям сведения о том, где будет вестись стройка, указать взаимное положение проектируемых строений, расположение их по отношению к улицам, проездам и уже существующим сооружениям, ориентацию всего строительства по странам света и т.д. Указанное назначение определяет форму и содержание генплана. Существующие и проектируемые постройки на нем показывают схематично, без подробностей. Более подробные данные — площадь участка, характеристики возводимых сооружений даются в пояснениях к плану — экспликациях. Экспликации помещают или на самом плане, или в пояснительной записке к генплану.

Генеральный план не является чертежом, по которому непосредственно в натуре можно производить разбивку или строительство сооружений. Он дает лишь общее представление о характере местности и размещении построек. Это схема, подтверждающая техническую возможность и экономическую целесообразность строительства. Положение на генплане красных линий и сооружений — ориентиро-

вочное, и со временем генплан претерпевает некоторые изменения. Наиболее распространенные масштабы генплана 1:5 000 — 1:10 000, но, учитывая вышесказанное, схемы таких масштабов для составления генпланов вполне можно получать путем увеличения с карт масштаба 1:25 000, не прибегая к новым топосъемкам.

#### 4.2. ТОЧНОСТЬ И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ПЛАНОВОГО ОБОСНОВАНИЯ НА ГИДРОУЗЛАХ

Геодезическое обоснование на строительной площадке гидроузла должно обеспечивать выполнение крупномасштабных топографических съемок, всех видов изысканий и разбивочных работ с одинаковой точностью на всей территории. Опорная геодезическая сеть и съемочное обоснование создаются в соответствии с требованиями СНиП 11-02-96 [10].

В большинстве случаев геодезическое плановое обоснование на площадке гидроузла представляет свободную (локальную) сеть триангуляции 4-го класса, опирающуюся на собственные базисы. Такая сеть развивается и уравнивается в местной (условной) системе координат с последующей привязкой к общегосударственной системе координат. Обычно сеть состоит из простых фигур — это один или два геодезических четырехугольника, центральная система, сдвоенный ряд треугольников. Пункты триангуляции должны располагаться на незатопляемой территории и вне зоны будущего строительства. Графический проект геодезического обоснования составляется на стадии технического проекта в масштабе генплана — 1:5 000 или 1:10 000. На всю территорию гидроузла уже в период изысканий устанавливают единую систему координат (чаще условную). Если система координат условная, то начало ее целесообразно выбирать в точке, расположенной за пределами юго-западной части стройплощадки гидроузла, чтобы получить положительные и минимальные по значению координаты.

Главное геодезическое обоснование в период строительства создается в виде мелких локальных свободных сетей, обслуживающих обычно одно или несколько сооружений гидроузла. Взаимная связь таких локальных сетей, часто называемых гидротехнической триангуляцией, осуществляется путем привязки к пунктам планового обоснования изыскательского периода.

Локальные сети имеют длины сторон от 0,2 до 2,0 км, а угловые измерения в них выполняют по методике, установленной для государственных триангуляций 2-, 3- или 4-го класса. В этом состоит характерная особенность гидротехнической триангуляции. Повышение ее точности сопряжено с увеличением точности угловых измерений.

Другая особенность их развития — измерение не менее двух базисов. В длины базисов не вводят поправки за редуцирование на квазигеоид, но если район работ имеет большую разность высот, то длины базисов приводят к среднему уровню площадки. Это делают для того, чтобы не искажать расстояний на местности между пунктами сети. Гидротехническая триангуляция 2-го класса имеет длины сторон 0,5–2,0 км; 3-го класса — 0,3–1,2 км, а 4-го класса — 0,2–0,8 км. Тот или другой класс гидротехнической триангуляции выбирают в зависимости от назначения работ и категории ГЭС.

По производственной эффективности ГЭС подразделяются на категории от первой до четвертой (табл. 5).

Для сгущения геодезического обоснования, а в некоторых случаях и для его создания могут применяться: 1) триангуляционные сети сгущения; 2) трилатерационные сети сгущения; 3) полигонометрические сети: а) полигонометрия с непосредственным измерением длин сторон (инварными проволоками, длиномером, рулетками), б) короткобазисная полигонометрия, в) дальномерная полигонометрия (с измерением сторон светодальномерами, редукционными тахеометрами типа *Redta-002*, топографическими дальномерами ОТД); 4) геодезические сети, построенные по методу Дурнева, суть этого метода ясна из рис. 29.

Таблица 5

## Необходимая точность развития гидротехнической триангуляции

Категория ГЭС	Мощность ГЭС, кВт	Наибольшие размеры в плане, м		Гидротехническая триангуляция		
		здания ГЭС	плотины	Наблюдения за деформациями	Разбивка подземных сооружений	Разбивка наземных сооружений
I	> 1000	800	1000	2-й класс	3-й класс	4-й класс
II	300–1000	300	500	2-й класс	3-й класс	4-й класс
III	50–300	150	250	3-й класс	4-й класс	1-й разряд
IV	< 50	50	100	4-й класс	1-й разряд	2-й разряд

Вспомогательные пункты могут располагаться и по одну сторону от ходовой линии. Можно записать

$$\frac{S_1}{a} = \frac{\sin(A_1 + B_1)}{\sin A_1},$$

с другой стороны,

$$\frac{a}{S_2} = \frac{\sin B_2}{\sin(A_2 + B_2)} \text{ или } S_2 = a \frac{\sin(A_2 + B_2)}{\sin B_2};$$

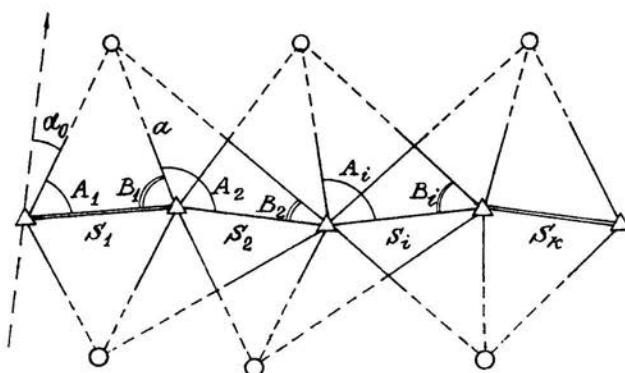


Рис. 29. Схема засечек проф. А.И.Дурнева

$$S_2 = S_1 \frac{\sin A_1 \sin (A_2 + B_2)}{\sin (A_1 + B_1) \sin B_2};$$

в общем виде для стороны  $S_i$

$$S_i = S_1 \frac{\sin A_1 \sin (A_2 + B_2) \dots \sin (A_i + B_i)}{\sin (A_1 + B_1) \sin B_2 \dots \sin B_i}.$$

Контроль вычисления длин сторон производят по другим пучкам засечек по аналогичным формулам:

$$S_i = S_1 \frac{\sin A'_1 \sin (A'_2 + B'_2) \dots \sin (A'_i + B'_i)}{\sin (A'_1 + B'_1) \sin B'_2 \dots \sin B'_i}.$$

Для контроля непосредственно измеряют некоторые другие стороны, те, которые удобно измерять. Дирекционные углы обычно передают по ходовой линии:

$$\alpha_{S_i} = \alpha_0 \pm \sum_1^{i-1} (A + B) + A_i \pm (i-1)180^\circ.$$

Имея стороны и их дирекционные углы, можно получить координаты как пунктов ходовой линии, так и вспомогательных пунктов. Вспомогательные пункты — это обычные вехи, несущие визирные цели.

В ходах полигонометрии или в построениях по методу А. И. Дурнева при числе сторон  $n > 15$  либо выполняют привязку к пунктам опорных геодезических сетей, либо астрономическим способом определяют азимуты этих сторон со следующей средней квадратической ошибкой:

4-й класс	1-й разряд	2-й разряд
$\pm 2''$	$\pm 5''$	$\pm 10''$

Точность построения геодезической основы должна удовлетворять требованиям крупномасштабных съемок и выноса в натуру главных и основных осей сооружений.

#### 4.3. ВЫСОТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НА ПЛОЩАДКЕ ГИДРОУЗЛА

На территории строящейся ГЭС и жилпоселка строителей выполняют топосъемки в масштабах 1:5 000, чаще 1:2 000 с сечением рельефа горизонталями через 0,5 или 1 м. Для высотного обоснования этих съемок и выполнения последующих разбивочных работ прокладывают ходы нивелирования II, III, IV класса в соответствии с требованиями инструкции [5].

Рассмотрим особенности проложения нивелирных ходов. Нивелирные знаки (грунтовые реперы или стенные марки) на застроенных территориях требуется закладывать не реже, чем через 2 км, на незастроенных территориях — через 5 км.

*Нивелирование II класса.* Периметры полигонов или длины ходов между исходными реперами — не более 40 км, между узловыми точками — не более 10 км, при этом расстояние между ходами тоже не должно быть более 10 км. Последнее требование вызвано тем, что нивелирование II класса должно сгущаться ходами нивелирования III класса. Невязки в ходах нивелирования II класса не должны превышать допуск

$$f = \left( 5\sqrt{L_{\text{км}}} \right)_{\text{мм}} = \left( 1,2\sqrt{n} \right)_{\text{мм}},$$

где  $n$  — число штативов (станций).

*Нивелирование III класса.* Длины ходов между исходными реперами — не более 15 км, а между узловыми точками — не более 5 км на застроенных территориях и не более 10 км — на незастроенных.

При числе станций не более 15 на 1 км хода допустимая невязка

$$f = \left( 10\sqrt{L_{\text{км}}} \right)_{\text{мм}} = \left( 2,5\sqrt{n} \right)_{\text{мм}}.$$

*Нивелирование IV класса.* Выполняется в соответствии с требованиями инструкции к этому виду работ. Крайне желательно применение нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования. Допуски

$$f = \left( 20\sqrt{L_{\text{км}}} \right)_{\text{мм}} = \left( 5\sqrt{n} \right)_{\text{мм}}.$$

*Гидротехническое нивелирование.* Подразделяется на три разряда (табл. 6) и отличается от государственного геометрического нивелирования меньшей длиной ходов, бо-

Т а б л и ц а 6

**Качественные характеристики гидротехнического нивелирования**

Разряд нивелирования	$m_{\text{ст}}, \text{мм}$	Предельное расхождение «прямо-обратно», мм	$S, \text{м}$	$d, \text{м}$	Объем измерений на станции
I	0,08	$0,3\sqrt{n}$	25	0,8	Прямо и обратно при двух горизонтах
	0,08	$0,3\sqrt{n}$	15	0,5	
II	0,13	$0,5\sqrt{n}$	15	0,5	Прямо и обратно при одном горизонте
III	0,40	$1,2\sqrt{n}$	40–50	0,3	Только прямо при одном горизонте

*Примечание.*  $S$  — предельная длина плача;  $d$  — минимальная высота прохождения визирного луча над землей.

лее короткими расстояниями от нивелира до реек  $s$  и более жесткими требованиями к невязкам в ходах нивелирования. Гидротехническое нивелирование выполняют методом совмещения нивелирами, снаженными оптическим микрометром с плоскопараллельной пластинкой, и инварными штриховыми рейками по костылям.

## 5. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПЕРЕНЕСЕНИИ НА МЕСТНОСТЬ ПРОЕКТА ОСЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Различают основные и детальные разбивочные работы, которые, в свою очередь, делятся на плановые и высотные. На практике вынос запроектированных форм и раз-

меров сооружений в натуру выполняют одновременно в плане и по высоте, т.е. производят планово-высотные разбивочные работы.

Различают оси сооружений: главные, основные и рабочие (или монтажные). Главными являются оси симметрии сооружения. Основные оси определяют контур сооружения и его частей. От рабочих осей ведут установку отдельных строительных конструкций и их элементов.

Оси сооружений могут быть горизонтальные, вертикальные и наклонные. Закрепляют их геодезическими знаками и монтажными знаками — марками.

Геодезические работы для переноса в натуру гидротехнических сооружений выполняют в две стадии.

Вначале, на этапе составления рабочих чертежей, от пунктов геодезического обоснования (в частности, от пунктов гидротехнической триангуляции) выносят на местность главные оси сооружений. К ним относятся оси плотин, гидростанций, шлюзов, каналов, отводящего канала, напорного трубопровода и т. п.

Главные и основные оси, в свою очередь, являются исходными линиями, относительно которых потом, при строительстве, производят детальную разбивку сооружений. От закрепленных точек главных осей разбивают вспомогательные оси, а также детали сооружений с установкой характерных точек и плоскостей на уровень проектных отметок. Детальная разбивка сооружений производится значительно точнее, чем разбивка главных осей. Ведь при детальной разбивке определяется взаимное расположение частей сооружений, а главные оси задают лишь общую ориентировку в целом.

Главные оси сооружений задаются в проекте и переносятся в натуру начальной и конечной точками, вершинами углов поворота, пересечением осей, главными точками кривых и т. д. Прежде чем приступить к переносу на местность точек главных осей, надо подготовить численные данные. Подготовка заключается в том, что по карте, на которой составлен проект, графически определяют координаты главных точек осей. Если деформация бумаги в

одном дециметре плана превышает графическую точность масштаба, т. е. 0,2 мм, то координаты определяют с учетом деформации бумаги. По этим координатам решают обратные геодезические задачи и находят дирекционные углы и расстояния между главными точками главных осей. Затем выносят в натуре две главные точки, образующие исходную сторону. Дирекционный угол этой стороны 0 и длину  $S_0$  принимают за исходные и по углам и длинам линий выносят в натуре остальные точки.

В зависимости от условий местности и расположения пунктов главного геодезического обоснования применяют следующие способы переноса на местность главных осей сооружений: 1) микротриангуляция; 2) промеры по линии между пунктами обоснования; 3) полярный способ; 4) прямая, обратная или комбинированная засечки; 5) полигонометрические или теодолитные ходы.

При переносе на местность главных точек осей заранее подготавливают соответствующие разбивочные чертежи применительно к принятому методу разбивки сооружений. Как правило, перенесение на местность точек главных осей производят с помощью компарированной стальной рулетки и 30-секундного теодолита.

В высотном отношении точность разбивочных работ удовлетворяет нивелирование IV класса, которое вполне обеспечивает разбивку и возобновление высот точек со средней квадратической ошибкой  $\pm 1$  см. Удобен аналитический способ определения элементов проекта, когда всем точкам проекта аналитически задают прямоугольные координаты  $x$  и  $y$ . Способ перспективен при использовании ЭВМ в сочетании с графопостроителем. Точность перенесения осей в плане определяют по формулам

$$m_\alpha = \frac{M}{3S}, \quad m_S = 0,0001M,$$

где  $m$  — погрешность дирекционного угла, минуты;  $m_S$  — погрешность длины линии  $S$ , м;  $M$  — знаменатель численного масштаба карты.

Бетонные гидротехнические сооружения, расположенные в пойменной части реки, защищают от доступа паводковых вод дамбами. Дамбы же закрывают видимости и уничтожают ранее заложенные геодезические знаки. Поэтому, в отличие от земляных гидротехнических сооружений, оси сложных бетонных сооружений выносят и закрепляют на местности только после зачистки дна котлована.

Точки опорной разбивочной сети должны располагаться возможно ближе к объекту разбивки, но так, чтобы выемка грунта из котлована и осадка грунта вблизи сооружения на них не влияли.

Главные оси закрепляют в натуре постоянными знаками. После закрепления главных и других точек на главных осях сооружения по ним разбивают пикетаж. Прокладывают теодолитный ход, причем длины линий по оси железобетонных и металлических сооружений измеряют с относительной ошибкой 1:4 000, а по оси земляных плотин — 1:2 000. Измерение углов в ходе производят с точностью соответственно  $\pm 15$  и  $\pm 30''$ . Теодолитный ход привязывают к пунктам планового геодезического обоснования, в частности к пунктам гидротехнической триангуляции. После уравнивания теодолитного хода получают координаты всех точек по главной оси сооружения. Затем по ней производят трассирование, т. е. выполняют пикетаж, разбивку кривых и нивелировку трассы. В результате этого комплекса полевых работ составляют профили. Их горизонтальный масштаб 1:2 000 или 1:1 000, а вертикальный — 1:200 или 1:100.

Для более детального изучения некоторых участков местности, предназначенных под строительство сооружения, и для уточнения объемов земляных работ производят разбивку поперечников. На местах будущих сооружений в каждую сторону от их оси задают, м:

Дамбы и шлюзы	Плотины	Крупные бетонные плотины и здания ГЭС
100–150	100–300	300–500

## 5.2. СПОСОБЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОСЕЙ

Специальное закрепление перенесенных на местность главных осей гидротехнических сооружений выполняется перед началом строительства, на стадии рабочих чертежей. Главные оси являются геодезической основой для разбивок гидротехнических сооружений. Эта основа должна обеспечивать постоянную возобновляемость однажды вынесенных точек пересечения главных и основных осей в случае их утраты.

Точки главных и основных осей закрепляются створными плоскостями так, чтобы обеспечивать их восстановление одним из двух способов:

1. Пересечением направлений двух створных плоскостей. Угол между створными плоскостями не должен быть менее 30 и более 150°.

2. Линейными промерами по створу от установленных знаков до той или иной точки главной оси. Эта возобновляемость должна обеспечивать соблюдение расстояний между осями ответственных частей бетонных сооружений со средней квадратической ошибкой в плане  $\pm 1,5$  см, а по высоте  $\pm 0,5$  см, при производстве земляных работ соответственно  $\pm 5,0$  и  $\pm 1,0$  см. Створные плоскости, закрепляющие точки осей, располагаются по отношению к осям в следующих положениях: а) по продолжению главных и основных осей; б) по перпендикулярам и прямолинейным участкам оси; в) по нормалям на криволинейных участках.

## 5.3. СТРОИТЕЛЬНАЯ СЕТКА

Для разбивки в натуре промышленных и гражданских сооружений в жилом поселке в качестве основы применяют строительную сетку. Она является своеобразной канвой для всех видов разбивочных работ.

Для построения на местности строительной сетки выполняют следующие виды работ: 1) предварительная раз-

бивка; 2) линейные и угловые измерения; 3) вычисления координат пунктов (вершин квадратов или прямоугольников); 4) их редуцирование; 5) контрольные измерения.

Строительная сетка проектируется обычно по генеральному плану. Линии строительной сетки располагают параллельно главным осям сооружений и вблизи них, но никогда не совмещают с главными осями. В случае очень большой строительной сетки в ней различают основные фигуры, которые служат каркасной геодезической основой, и фигуры сгущения, которые являются чисто разбивочной основой.

#### 5.4. ДЕТАЛЬНАЯ РАЗБИВКА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Детальная разбивка сооружений заключается в определении на местности контура сооружения и положения всех его деталей в плане и по высоте. Точность детальной разбивки сооружений определяется следующими факторами: 1) точностью установления размеров отдельных элементов сооружения в процессе проектирования; 2) материалом, из которого возводится сооружение; 3) размером самого сооружения; 4) местом расположения сооружения; 5) назначением сооружения; 6) порядком и способом производства строительных работ; 7) наличием или отсутствием специального оборудования, установка которого непосредственно связана с частями сооружения.

Ошибки планового положения характерных точек сооружения при выносе их в натуру определяются относительно разбивочных осей, а по высоте — относительно рабочих реперов.

Опыт строительства показывает, что предельная ошибка выполнения разбивочных работ должна быть в 3 раза меньше нормы допустимых отступлений от проектных размеров готовых сооружений, т. е. тех допусков, которые применяют при приемке сооружений от строителей. Пре-

дельные ошибки разбивочных работ при строительстве земляных сооружений: а) разбивка осей и бровок  $\pm 2\text{--}3$  см, б) перенос проектных отметок  $\pm 1$  см; бетонных сооружений: а) разбивка осей и контуров фундаментов  $\pm 3\text{--}5$  мм, б) перенос проектных отметок  $\pm 1\text{--}4$  мм.

## 5.5. МОНТАЖ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

При монтажных работах необходимо соблюдать следующую точность: а) плановая и высотная выверка строительных конструкций  $\pm 2\text{--}3$  мм; б) плановая и высотная выверка осей статоров, гидроагрегатов и других уникальных сооружений  $\pm 0,05\text{--}0,5$  мм.

Точность разбивки частей и элементов здания ГЭС и плотины зависит от расположения их по высоте относительно основания сооружения. Самые нижние ярусы кладки бетона можно разбивать с точностью разбивки земляных работ.

Для строительства плотины вначале переносят в натуре ее продольную ось, а затем определяют контур основания плотины путем разбивки поперечников, которые располагают перпендикулярно оси плотины через 10–40 м. Длина поперечников — от 200 до 1000 м.

Высоты земляных плотин задают несколько больше проектных, с учетом осадки насыпи. Для песчаных грунтов и суглинков это соответственно 1,5 и 3,5 % от высоты плотины. Если плотина строится на местности с большим уклоном, то отбивку контура основания плотины надо производить по наклонным расстояниям.

Вынос на местность контура фундамента здания ГЭС производят обычным способом (рис. 30): от пунктов разбивочной основы определяют продольные (1-1; 2-2; 3-3) и поперечные (A-A; B-B; B-B) оси. Для разбивки котлована размер его увеличивают против проектного на величину а во все стороны с учетом угла естественного откоса грунта,

$$a = mh,$$

где  $a$  — горизонтальная проекция откоса;  $m$  — коэффициент заложения откоса, который зависит от типа грунта;  $h$  — глубина котлована.

Затем вокруг сооружения параллельно осям строят обноску (I-II-III-IV) и на ней гвоздями закрепляют строительные оси, которые и определяют заданную проектом форму здания.

Нижний контур котлована переносят на дно при помощи строительных осей и отвеса. Передачу проектных отметок на дно котлована производят с помощью рулетки и нивелира.

Положение осей отдельных блоков сложного сооружения может определяться от главной продольной оси (2-2); однако, поскольку возведение сооружения осуществляют отдельными секциями, наиболее целесообразно переносить точки проекта на этажи методом прямой угловой засечки. Засечки производят с пунктов специально создаваемого планового обоснования, расположенных вне зоны строительства.

При производстве бетонных работ особое внимание надо

уделять установке в плане и по высоте анкерных устройств, которые предназначены для закрепления металлических конструкций, оборудования, а также железобетонных стаканов, в которые устанавливают основания колонн. Как в плане, так и по высоте допуски не должны превышать  $\pm 5$  мм. Анкерные устройства в проектное положение

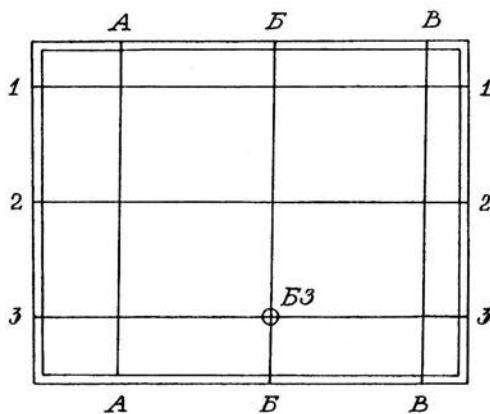


Рис. 30. Вынос на местность точки контура фундамента

устанавливают промерами от продольных и поперечных осей фундамента.

Колонны в вертикальное положение устанавливают при помощи теодолита. Отклонение проекции верхней точки колонны от осевого знака (метки в основании колонны, совмещенной с продольными и поперечными осями фундамента) должно быть не более  $1/1000$  от высоты колонны. При монтаже металлических конструкций особо тщательно надо разбивать монтажные оси. Объясняется это тем, что металлические конструкции изготавливают на заводе по размерам, указанным в проекте. Поэтому правильное положение этих конструкций зависит от точности выноса монтажных осей, которые располагают параллельно строительным разбивочным осям.

Основными документами при монтаже агрегатов для монтажников являются создаваемые геодезистами чертежи монтажных осей и контрольно-сборочные чертежи. Кратко рассмотрим вопрос закрепления монтажных осей. Их закрепляют металлическими знаками, которые закладывают при производстве бетонных работ. Это марка, скоба, репер (рис. 31).

Согласно [9] монтажные оси стальных конструкций должны выноситься с точностью 1 мм на каждые 10 м длины при линейных измерениях и  $10''$  — при угловых измерениях. Высотная установка оборудования выполняется с помощью технического или высокоточного нивелирования с точностью соответственно  $\pm 1-2$  или  $\pm 0,1-0,2$  мм. При необходимости еще более

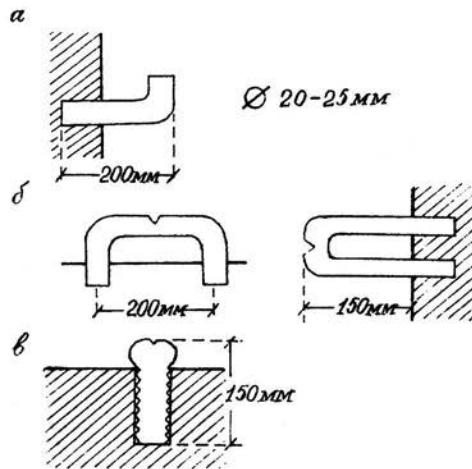


Рис. 31. Типы металлических знаков:  
а — марка; б — скоба; в — репер

высокой точности применяют микронивелирование, обеспечивающее измерение с точностью  $\pm 0,01$  мм.

Подведем итоги. Разбивочные оси при строительстве крупных гидротехнических сооружений создают в две стадии:

1. Главная разбивочная основа, пункты которой располагают на устойчивых местах, не подверженных сползанию или разрушению при разработке котлована. В эту сеть включают знаки, закрепляющие главные оси сооружения и две-три поперечные основные оси.

2. Временные оси, располагаемые возможно ближе к сооружению (на перемычках и на бортах котлована), которые служат каркасом для обозначения рабочих створов «бычков», агрегатов и других объектов.

Связь временной сети с главной разбивочной основой служит для выявления возможного смещения пунктов в процессе строительства и для восстановления их в случае потери.

Отметим особенности геодезических работ на площадке гидроузла: 1) стесненность строительной площадки; 2) многоярусность опорной геодезической сети; 3) закрепление большого числа вспомогательных осей при создании строительной основы; 4) рациональная система координат, при которой одна из координатных осей должна быть направлена по оси симметрии сооружения. Начало координат выбирают так, чтобы координаты всех элементов сооружения имели значения положительные и небольшие по величине.

## 5.6. ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЪЕМКА

Исполнительную съемку выполняют для систематического учета выполненных строительных работ, для определения точности выноса проекта в натуру и для выявления всех отступлений от проекта.

Исполнительная съемка заключается в определении частично или полностью построенных сооружений в плане и

по высоте. Она производится по мере выполнения отдельных этапов строительства. Геодезической основой исполнительных съемок служат: 1) в пределах отдельных сооружений — оси фундаментов и рабочие реперы; 2) в пределах строительной площадки — пункты разбивочной основы; 3) за пределами стройплощадки — пункты геодезического обоснования, установленные в процессе изысканий.

Исполнительная съемка выполняется общепринятыми методами: полярным, перпендикуляров, створов и т.д. Точность исполнительной съемки должна соответствовать допускам, которые предъявляются при приемке сооружений в эксплуатации. Кроме того, она должна обеспечивать составление текущего (оперативного) исполнительного генерального плана соответствующего масштаба.

В зависимости от размеров и сложности сооружений исполнительный генплан составляют в масштабе 1:1 000 или 1:2 000. Особое внимание надо уделять исполнительной съемке подземных сооружений (фундаменты, кабельные и другие подземные сети). После завершения строительства составляют окончательный генеральный план в условных топографических знаках: для небольших сооружений в масштабе 1:500, а для крупных — в масштабах 1:1 000 или 1:2 000. На нем обычно показывают розу ветров и экспликацию зданий и других сооружений. К нему прилагаются кальку высот и каталог координат пунктов геодезической основы и характерных точек сооружений.

Окончательный исполнительный генеральный план отображает результаты строительства и является основным техническим документом для эксплуатации и реконструкции сооружений.

## 6. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОСАДКАМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ КРУПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### 6.1. ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Гидротехнические сооружения деформируются и перемещаются под воздействием вертикальных и горизонтальных сил, обусловленных собственным весом сооружений, давлением воды и грунта на вертикальные и наклонные грани его фундаментов, различной прочностью грунтов основания, температурными воздействиями, изменением гидротермических условий (колебание температуры, влажности пород и уровня грунтовых вод), пучением при замерзании водонасыщенных пород, при оттаивании мерзлых, насыщенных льдом пород, рядом факторов технического (антропогенного) воздействия на грунт.

*Грунтом называется верхняя часть земной коры, слагающая поверхность Земли.* Грунт может быть представлен различными горными породами. Скальные грунты образованы магматическими породами. Осадочные грунты скального типа — это метаморфизированные песчаники, аргиллиты, известняки и т. д. Осадочные породы рыхлого типа — пески, глины, суглинки.

Рыхлые осадочные грунты можно разделить на четыре класса:

- 1) сыпучие пески (песок — это грунт, обладающий раздельнозернистой структурой и состоящий из частиц размером от 0,25 до 2,0 мм);
- 2) супеси и легкие суглинки;
- 3) суглинистый грунт;
- 4) глины: а) коагуляционные — размокающие, б) кристаллизационные — неразмокающие.

Правильное определение характера грунта имеет чрезвычайно важное значение. Например, вблизи Лос-Анджелеса (США) в узком каньоне Сан-Френсис построили бетонную

плотину длиной 213 м. В верхнем бьефе образовалось водохранилище глубиной до 60 м. Менее чем через год левая и правая части плотины разрушились, причем катастрофа произошла ночью, мощный поток воды высотой 25 м хлынул в долину, снося дома и фермы. Погибло 400 человек, убытки превысили 11 млн. долларов. Причиной катастрофы была неправильная оценка грунтов. В основании плотины лежала толща конгломератов. В сухом состоянии они были прочными и твердыми. Когда же в них попала вода, конгломераты превратились в рыхлое скопление гравия, глины и песка. Наблюдений за деформациями бортов каньона не производилось, иначе катастрофу можно было бы предвидеть.

*Деформация — это изменение формы объекта наблюдений (перекос, перегиб) или изменение его первоначального положения.* В деформации выделяют вертикальную и горизонтальную составляющие. Вертикальные деформации оснований зданий и сооружений подразделяются на:

— осадки — деформации, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием внешних нагрузок; осадки не сопровождаются коренным изменением структуры грунта;

— просадки — деформации, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием как внешних нагрузок, так и собственного веса грунта; просадки сопровождаются коренным изменением структуры грунта;

— набухания и усадки — деформации, связанные с изменением объема некоторых глинистых грунтов при изменении их влажности, температуры или воздействия химических веществ;

— оседания — деформации земной поверхности в связи с разработкой полезных ископаемых, изменением гидрологических условий и т. п.

В горной практике деформации, связанные с оседанием земной поверхности под влиянием подземных разработок, носят название — сдвижение горных пород.

В зависимости от причин возникновения отмеченные выше деформации подразделяются на два вида:

1) осадки и просадки — деформации грунтов от нагрузок, передаваемых на основание весом зданий и сооружений;

2) деформации, не связанные с нагрузкой от зданий и сооружений, и проявляющиеся в виде вертикальных и горизонтальных перемещений земной поверхности (оседания, набухания и просадки грунта под собственным весом).

**Смещения** — деформации, вызывающие движение сооружений в горизонтальной плоскости, возникающие в результате бокового давления (под воздействием воды, грунта, ветра и т. д.). Иными словами, смещение (сдвиг) — изменение положения одной точки объекта относительно другой. Вычисляют смещение  $u$  по формулам

$$u_x = x_n - x_m; \quad u_y = y_n - y_m,$$

где  $x_n$ ,  $y_n$  и  $x_m$ ,  $y_m$  — координаты отдельной точки сооружения соответственно в  $n$ -м и  $m$ -м циклах наблюдений.

Оси координат, как правило, располагают параллельно главным осям сооружения (оси симметрии). Смещение считается абсолютным, если исходная точка расположена за пределами зоны возможных деформаций горных пород. Смещение считается относительным, если обе точки (исходная и определяемая) находятся в зоне деформаций или в одном и том же сооружении. Текущее смещение — смещение точки за период между двумя последовательными циклами наблюдений (измерений). Суммарное смещение — смещение точки с начала наблюдений.

**Крен (или наклон)** — деформация сооружения, определяемая как разность осадок точек  $i$  и  $j$ , зафиксированных на противоположных краях сооружения.

Наклон вдоль продольной оси сооружения именуют завалом, а в направлении поперечной оси — перекосом. Определение кренов — неотъемлемая часть геодезических наблюдений за деформациями сооружений. Основной причиной крена является неравномерная осадка фундаментов.

Обычно определяют относительный крен  $K$  (рис. 32) по формуле

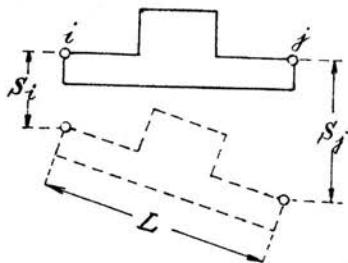


Рис. 32. Определение крена по неравномерным осадкам фундамента способом высокоточного нивелирования

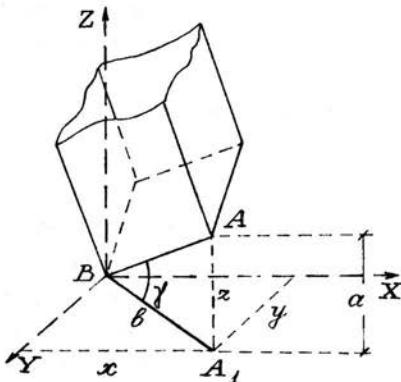


Рис. 33. Определение угла абсолютного крена сооружения

$$K = (S_j - S_i) / L,$$

где  $S_i$  и  $S_j$  — осадки в точках  $i$  и  $j$ ;  $L$  — расстояние между точками  $i$  и  $j$ .

Формула определения абсолютного угла крена сооружения имеет вид (рис. 33)

$$\operatorname{tg} \gamma = a / b,$$

где  $a$  — разность отметок точек  $A$  и  $B$  ( $z$ );  $b$  — проекция отрезка  $AB$ .

Способы определения крена делятся на две группы: 1) геометрические способы, основанные на измерении величин  $a$  и  $b$ ; 2) физические способы, основанные на непосредственном измерении угла с использованием уровней, кренометров и др.

При небольших углах  $\gamma$  средняя квадратическая ошибка определения крена

$$m_{\gamma}'' = (m_a / m_b) \rho''.$$

Предельные погрешности измерения крена для фундаментов агрегатов и для труб должны быть не более соответственно  $0,00001L$  и  $0,0005L$ .

Наиболее распространен геометрический способ определения наклона сооружения, который, в свою очередь, подразделяется на: способ координат, способ вертикального проектирования, способ углов. Рассмотрим их.

1. Способ координат. Вокруг сооружения на расстоянии, примерно равном двум-трем размерам его высоты, прокладывают полигонометрический ход. Постоянными знаками закрепляют 3–4 пункта. Выбирают заметную визирную цель на вершине сооружения. Методом прямой угловой засечки с этих пунктов периодически определяют координаты выбранной визирной цели. По разности координат между циклами находят размер крена и его направление. Оценку точности измерений производят по общеизвестным формулам оценки прямой многократной засечки.

2. Способ вертикального проектирования. В двух взаимно перпендикулярных осях сооружения закладывают две постоянные марки  $A$  и  $B$  (рис. 34). В этих точках устанавливают теодолит и при двух положениях круга проектируют заметную цель на некоторую плоскость внизу, на определенную линию на цоколе или на специально вмонтированную рейку. Положим, что точка из положения 1 переместилась в положение 2. Для определения общего вектора крена  $\Delta s$  определяют размер крена  $\Delta s_A$  и  $\Delta s_B$  в

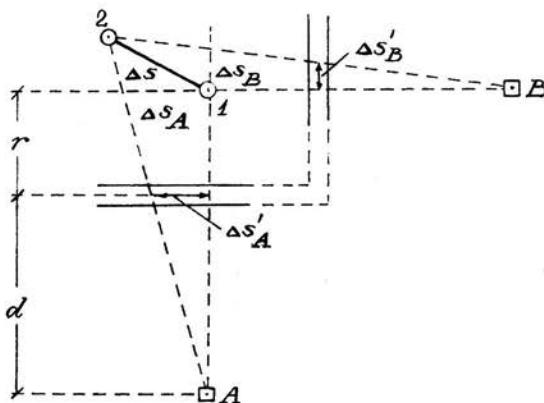


Рис. 34. Определение крена способом вертикального проектирования

направлениях, перпендикулярных коллимационной плоскости трубы при одновременных наблюдениях в пунктах *A* и *B*. Точность способа зависит от точности приведения основной оси теодолита в основное положение. Должно быть соблюдено условие

$$0,2\tau'' = 20''/v,$$

где  $\tau''$  — цена деления уровня при алидаде горизонтального круга;  $v$  — увеличение зрительной трубы, т. е. погрешность горизонтирования теодолита не должна превышать погрешности визирования.

На цоколе или на обноске, или по горизонтально расположенной рейке измеряют центральные проекции  $\Delta s_A'$  и  $\Delta s_B'$ , затем графически или аналитически определяют ортогональную проекцию — полный линейный размер крена  $\Delta s$ :

$$\Delta s = \sqrt{\Delta s_A'^2 + \Delta s_B'^2},$$

где

$$\frac{\Delta s_A}{r+d} = \frac{\Delta s_A'}{d},$$

откуда

$$\Delta s_A = \Delta s_A' \left(1 + \frac{r}{d}\right),$$

аналогично определяют и  $\Delta s_B$ .

Отношение значения крена  $\Delta s$  к высоте сооружения  $h$  даст крен в угловой мере:

$$\gamma = (\Delta s/h) \rho''.$$

3. Способ углов. Для высотных зданий пирамидального типа (классический пример — здание Московского государственного университета) при наблюдениях за креном целесообразно в опорных пунктах *A* и *B* весьма точно измерять углы  $\beta$  (рис. 35). Углы эти с помощью высокоточного теодолита измеряют между неизменными (опорными) направлениями *AN* и *BM* и визирной целью, выбран-

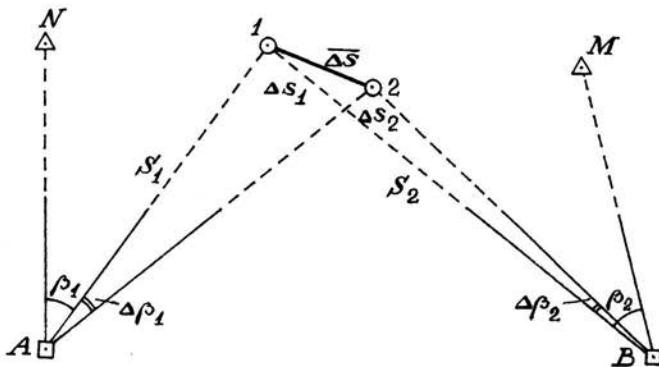


Рис. 35. Определение крена способом углов

ной наверху сооружения. Горизонтальные проложения  $S_1 = 1A$  и  $S_2 = 1B$  от опорных пунктов  $A$  и  $B$  до точки наблюдения  $1$  определяют обычно по координатам, полученным прямой засечкой. После перемещения точки  $1$  в положение точки  $2$  определяют значения  $\Delta\beta_1$  и  $\Delta\beta_2$  как разность направлений, измеренных в смежных циклах угловых наблюдений. После чего находят составляющие  $\Delta s_1$  и  $\Delta s_2$ , а затем и полную величину крена  $\Delta S$ :

$$\Delta s_1 = \frac{S_1 \Delta \beta_1''}{\rho''}, \quad \Delta s_2 = \frac{S_2 \Delta \beta_2''}{\rho''}, \quad \Delta S = \sqrt{\Delta s_1^2 + \Delta s_2^2},$$

и крен в угловой мере

$$\gamma = (\Delta S / h) \rho''.$$

Точность этого способа зависит исключительно от точности измерения горизонтальных углов:

$$m_{\Delta s_1} = S_1 \frac{m_\beta'' \sqrt{2}}{\rho''},$$

где  $m_\beta$  — средняя квадратическая ошибка измерения угла.

При  $m_\beta = 1''$ ,  $S_1 = 200$  м ошибка  $m_{\Delta s_1} = 1,4$  мм.

**Кручение** — деформация сооружения, возникающая в случае, когда его параллельные стороны испытывают противоположные по знаку осадки.

Обозначим угол закручивания греческой буквой  $\kappa$  (каппа). Кручение подсчитывают по формулам (рис. 36)

$$\kappa_1 = -\frac{s_1 - s_2}{l} \rho'',$$

$$\kappa_2 = -\frac{s_3 - s_4}{l} \rho'',$$

где  $s$  — осадки;  $\kappa$  — углы закручивания сооружения.

Совместная деформация основания и сооружения (здания) характеризуется следующими параметрами:

- 1) абсолютной или полной осадкой  $s$  фундамента или блока;
- 2) средней осадкой всего сооружения (или отдельных его частей)  $s_{cp}$ ;
- 3) разностной (неравномерной) осадкой точек фундамента  $\Delta s$ ;
- 4) относительной неравномерностью осадок  $\Delta s/l$  двух точек фундамента (разность их вертикальных перемещений), отнесенной к расстоянию между ними;
- 5) наклоном фундамента  $K$ ;
- 6) относительным прогибом  $f/L$ ;
- 7) углом закручивания сооружения;
- 8) горизонтальным смещением сооружения.

Абсолютной или полной осадкой  $s$  определенного фундамента или строительного блока называют разность абсолютных высот (отметок) начального и текущего цикла наблюдений, определенных относительно исходной точки:

$$s = H_0 - H_i.$$

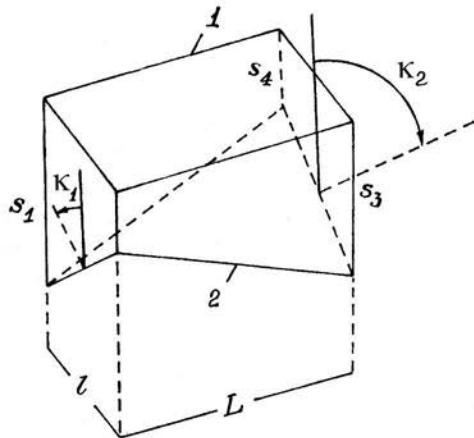


Рис. 36. Кручение сооружения под воздействием противоположных по знаку осадок основания

1 — проектное положение основания;  
2 — фактическое положение основания под действием деформации

**Осадка** — это вертикальная составляющая общего перемещения точки сооружения, а плановое (горизонтальное) смещение — это горизонтальная составляющая общего перемещения точки сооружения. Часто в технической литературе используется один термин — смещение.

Средняя осадка всего сооружения (или отдельных его частей)

$$s_{cp} = \left( \sum_1^n s \right) / n.$$

Обычно одновременно указывают наибольшую  $s_{\max}$  и наименьшую  $s_{\min}$  осадки точек сооружений.

Наклон фундамента, т. е. отношение разности осадок  $\Delta s$  крайних точек фундамента к его ширине или длине,

$$K = \Delta s / L.$$

Относительным прогибом называется отношение стрелы прогиба фундамента к длине однозначно изгибающегося участка сооружения  $L$  (рис. 37).

$$\frac{f}{L} = \frac{2s_2 - (s_1 + s_3)}{2L} = \frac{2s_2 - s_1 - s_3}{2L},$$

где  $s_1$  и  $s_3$  — осадки концов рассматриваемого участка сооружения;  $s_2$  — наибольшая осадка на том же участке.

Наблюдения за деформациями должны производиться весь период строительства, а также первые годы эксплуатации сооружения до достижения стабилизации.

Опыт строительства показывает, что порой незначительные по размерам деформации таких ответственных сооружений, как плотина, шлюз, здание ГЭС, деривационный канал и др., могут нарушить нормальную работу, а порой и вывести из строя весь гидроузел. Отсюда вытекает необходимость

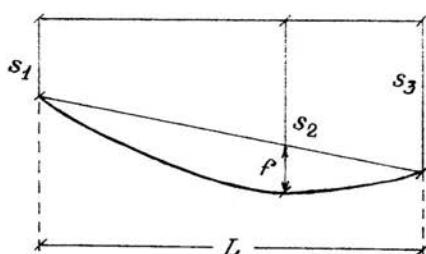


Рис. 37. Прогиб основания  $f/L$

мость постоянного и тщательного ведения наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями инженерных сооружений.

Объем, точность и сроки работ по наблюдениям за деформациями сооружений определяются: а) типом и размерами сооружений; б) характером пород, слагающих основание сооружений; в) чувствительностью конструкций сооружений к неравномерным осадкам; г) интенсивностью самих осадок и перемещений и т. д.

Объектами наблюдений за деформациями являются все основные сооружения гидроузла (плотина, здание ГЭС, шлюз, деривационный канал и др.). Конечная осадка плотины на скальных грунтах за 10-летний период достигает иногда 300 мм. При этом средняя скорость осадок в период строительства колеблется от 2 до 4 мм/мес (максимум 30–50 мм/мес), а в эксплуатационный период 0,1–1,0 мм/мес.

Для определения вертикальных осадок сооружений применяют геометрическое нивелирование от пунктов высотной опорной сети с точностью, отвечающей точности государственного нивелирования I, II, III классов. В стесненных условиях шахт, потерн и лестничных переходов широко используют гидростатическое нивелирование.

При выборе необходимой точности выполнения нивелирных работ надо руководствоваться следующими требованиями: а) осадки уникальных бетонных сооружений на скальных грунтах надо наблюдать по методике I класса с точностью  $\pm 1$  мм, а на сжимаемых грунтах — по методике II класса с точностью  $\pm 2$  мм; б) осадки земляных сооружений и перемещения дна строительного котлована — по методике нивелирования III класса с точностью  $\pm 5$  мм.

## 6.2. ПЕРИОДИЧНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ

*Строительство водохранилищ.* На стадии строительства наблюдения проводят не реже 2 раз в месяц. Первый цикл наблюдений выполняют еще до затопления водохра-

нилища водой, сразу же после начала укладки бетона в фундамент. В период наполнения водохранилища — в течение первого года периодичность наблюдений — не реже 2 раз в месяц, а затем — 1 раз в месяц. После наполнения водохранилища до НПУ наблюдения ведут 2 раза в год — весной (перед паводком) и осенью. Если в течение 2 лет эксплуатации установлено затухание перемещений, то наблюдения ведут только 1 раз в год. При выявлении значительных осадок и перемещений наблюдения выполняют по особой программе.

*Строительство зданий и сооружений.* Первый цикл наблюдений выполняют после возведения фундаментов, еще до приложения нагрузок. На период достижения полной нагрузки циклов измерений должно быть не менее четырех (при 25, 50, 75 и 100 % от всего давления). В период эксплуатации сооружений частота измерений зависит от скорости осадок, но не менее двух циклов в год. Наблюдения прекращают, если в течение последних трех циклов размер осадок колеблется лишь в пределах точности измерений.

После уравнивания нивелирных ходов вычисляют отметки контрольных (осадочных) марок и определяют осадку  $s$  между двумя циклами ( $i - 1$ ) и  $i$ :

$$s_{i-1,i} = H_i - H_{i-1},$$

суммарную осадку (с начала наблюдений)

$$s_i = H_i - H_1.$$

Скорость осадки марки  $N$

$$v_N = s_N / t,$$

где  $t$  — время наблюдений в годах или месяцах;  $s_N$  — суммарная осадка за период  $t$ .

Средняя скорость осадки всего фундамента

$$v_{cp} = \left( \sum_1^r v \right) / r,$$

где  $r$  — количество контрольных марок.

Средняя квадратическая ошибка определения осадки из двух циклов наблюдений

$$m_s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — средние квадратические ошибки отметки марки, наиболее удаленной от репера в обоих циклах наблюдений.

Обычно  $m_1 = m_2$ , тогда  $m_s = m\sqrt{2}$ .

В простых одиночных ходах средняя квадратическая ошибка отметки в одном цикле

$$m = m_{\text{ст}}\sqrt{n},$$

где  $m_{\text{ст}}$  — средняя квадратическая ошибка отметки на одной станции;  $n$  — число станций (штативов) до наиболее удаленной марки в ходе.

Последняя формула на практике используется для подсчета допустимого числа станций

$$n = m^2 / m_{\text{ст}}^2.$$

Так, если требуемая точность определения  $m = 1,2$  мм,  $m_{\text{ст}} = 0,3$  мм, то  $n = 16$  станций; если  $m_{\text{ст}} = 0,15$  мм, то  $n = 64$  станции.

### 6.3. РАСЧЕТ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее распространенным способом контроля является высокоточное периодическое нивелирование знаков, установленных на сооружениях. Эти знаки входят в контрольно-измерительную аппаратуру (КИА), используемую при натурных измерениях для закрепления плановых или высотных пунктов и для выполнения измерений.

**Контрольный знак** — плановый или высотный знак, который закладывается непосредственно в сооружение и, перемещаясь вместе с ним, характеризует смещение или осадку.

**Опорный знак — плановый или высотный знак, относительно которого определяются смещения сооружения.**

Чтобы выбрать подходящие приборы и методику измерений надо определить точность измерений. Степень любой деформации определяется ее размером и скоростью. В связи с этим существенное значение имеет выбор интервала времени между циклами наблюдений.

Осадки определяют по формуле

$$\Delta s = s(\tau_i) - s(\tau_{i-1}) \geq \sigma t,$$

где  $\Delta s$  — разностная осадка;  $s(\tau)$  — деформация на момент времени  $\tau$ ;  $\sigma$  — стандарт определения деформации, статистической оценкой стандарта является средняя квадратическая ошибка;  $t$  — коэффициент, зависящий от вида распределения и уровня доверительной вероятности.

*При нормальном распределении погрешностей и с доверительной вероятностью  $\beta = 0,955\text{--}0,999$  коэффициент  $t$  будет изменяться соответственно от 4,0 до 6,0. Выбор доверительной вероятности определяется требованиями надежности и ответственности результатов измерений. Чем требования выше, тем больше должна быть доверительная вероятность.*

Обратимся к величине  $\Delta s$ . Она характеризует скорость деформации и устанавливается по расчетным данным или же на основе динамического прогнозирования. Точность измерений должна корректироваться в процессе наблюдений в зависимости от полученных результатов.

Например, за установленный интервал времени осадка сооружения  $\Delta s$  составила 10 мм при  $\beta = 0,955$  (заданный уровень доверительной вероятности). Следовательно, коэффициент  $t = 4,0$ ,  $\Delta s \geq t$ . Откуда  $\sigma \leq 2,5$  мм.

Таким образом, необходима точность нивелирования II класса, обеспечивающая среднюю квадратическую ошибку 2 мм/км. Иногда для особо ответственных сооружений прибегают и к максимально возможной точности измерений. Цикличность наблюдений зависит от видов деформаций и самого сооружения (табл. 7).

Т а б л и ц а 7

**Цикличность мониторинга**

Виды деформаций	До наполнения водохранилища	Во время наполнения	До 3 лет после наполнения	При постоянной эксплуатации
<b>Бетонные плотины, шлюзы</b>				
Осадки		Ежемесячно	1–2 раза в квартал	2 раза в год
Смещения:				
относительные		2 раза в месяц		Ежемесячно
абсолютные	2 раза в квартал	1–2 раза в квартал	Ежеквартально	1–2 раза в год
<b>Каменно-земляные плотины</b>				
Осадки и смещения		Ежемесячно	Ежеквартально	1–2 раза в год
<b>Приплотинные, деривационные ГЭС, ГАЭС</b>				
Осадки		Ежеквартально		1–2 раза в год
Смещения		1–2 раза в квартал		2–4 раза в год

После каждого землетрясения силой более 4–6 баллов выполняют внеочередной цикл наблюдений.

#### 6.4. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Согласно [9] средняя квадратическая ошибка определения осадки или горизонтального смещения не должна превышать: для сооружений на скальных и полускальных грунтах — 1 мм; для сооружений, возводимых на песчаных, глинистых и других сжимаемых грунтах, — 3 мм; для камненабросных плотин — 5 мм; для сооружений на насыпных, просадочных и других сильно сжимаемых грунтах — 10 мм; для земляных сооружений — 15 мм.

Таблица 8  
Среднеквадратические ошибки наблюдений за осадками и смещениями

Объекты наблюдений	Осадки, мм	Смещения, мм
Бетонные сооружения:		
на скальных основаниях	1	1
на сжимаемых грунтах	2	2
Земляные сооружения:		
в строительный период	10	5-10
в период эксплуатации	5	3-5
Дно котлована		
Скальные грунты	1-2	-
Сжимаемые грунты	5	-
Оползни	30-50	10
Обвалоопасные участки скального массива	1-2	1-2

Приведем значения средних квадратических ошибок определения абсолютных осадок и горизонтальных смещений в зависимости от объектов наблюдений (табл.8).

#### 6.5. ПРОЕКТ РАЗМЕЩЕНИЯ МАРОК И РЕПЕРОВ

Первые в нашей стране систематические наблюдения за осадками проводились в 1903–1913 годах при строительстве Морского собора в Кронштадте. Теперь наблюдения за деформациями выполняют на всех без исключения крупных сооружениях.

Комплекс работ по наблюдениям за деформациями крупных инженерных сооружений состоит из: 1) составления проекта работ и расчета их сметной стоимости; 2) установки КИА на объекте; 3) выполнения натурных измерений; 4) камеральной обработки и составления отчетных документов.

Проект (программа) наблюдений является основным техническим документом для производства работ. Програм-

му разрабатывают на основании технического задания главного инженера проекта (ТЗ ГИП). В ТЗ указывают: 1) объекты наблюдений и виды деформаций, которые следует определить; 2) ожидаемые значения деформаций и точность их определения; 3) схемы размещения КИА по каждому сооружению (места расположения геодезических знаков в сооружении); 4) начало счета деформаций и цикличность наблюдений; 5) места расположения опорных плановых и высотных знаков (за пределами зоны деформаций горных пород), от которых будут определять деформации; 6) все виды отчетной документации.

В самом проекте должны быть проработаны следующие вопросы: 1) характеристика района строительства и объектов наблюдений; 2) схемы сетей, размещение опорных и контрольных знаков; 3) рекомендуемые приборы, их исследования и поверки; 4) методика измерений; 5) контроль стабильности исходных пунктов; 6) порядок камеральной обработки измерений; 7) виды отчетной документации; 8) количество КИА и объемы работ (для составления сметы).

Перед началом работ по измерению осадок устанавливают реперы, являющиеся высотной опорой измерений.

## 6.6. ТИПЫ РЕПЕРОВ

При создании высотной основы применяют три типа реперов: глубинные, фундаментальные и грунтовые.

*Глубинные* реперы закладывают в коренные породы оснований (практически несжимаемый грунт) с помощью бурения. Их располагают в стороне от площадки гидроузла, на обоих берегах реки, в 500–1500 м ниже створа плотины, обязательно вне зоны давлений, создаваемых водохранилищем. Реперы устанавливают в виде «куста», где каждый из трех реперов расположен в вершинах треугольника со сторонами 40–50 м, чтобы обеспечить контроль из высотного положения нивелированием с одной станции.

Средняя квадратическая ошибка определения осадок относительно исходных реперов, заложенных за зоной активных деформаций горных пород, не должна превышать 1 мм. Для обеспечения неизменности высотного положения реперы устанавливают в местах выхода на поверхность скальных пород, а при их отсутствии забуривают на глубину 25 м и более.

*Фундаментальные* реперы тоже желательно устанавливать в местах выхода скальных пород, в котлованах или в штолнях. Они являются исходными на весь период строительства и эксплуатации данного инженерного сооружения, их положение согласовывается и увязывается на строительном генплане. Реперы устанавливают вне зоны распространения давления от возводимого сооружения, для промышленных и гражданских сооружений на расстоянии 50–150 м, для гидротехнических сооружений — 300–500 м (до 1000 м). Положения фундаментальных реперов контролируют относительно глубинных 1–2 раза в году.

*Грунтовые* реперы являются рабочими, их закладывают ниже глубины сезонного промерзания грунта в соответствии с требованиями действующей инструкции [8]. Устанавливают грунтовые (рабочие) реперы в непосредственной близости и на взаимно противоположных сторонах наблюдаемого сооружения. На ГЭС их закладывают со стороны как верхнего, так и нижнего бьефа. Кроме того, рабочие реперы размещают вдоль чаши водохранилища, перпендикулярно КВ для определения воронки оседания, вызываемой суммарным весом водохранилища и сооружений гидроузла.

Грунтовые реперы могут быть как одиночные, так и групповые, они являются временными исходными на период двух-трех очередных циклов наблюдений за осадками. Через 2–3 месяца их контролируют нивелированием от фундаментальных реперов. От этих рабочих реперов определяют превышения осадочных марок, закладываемых непосредственно в исследуемое сооружение. Общее число осадочных марок зависит от качества основания, разме-

ров сооружения и количества отдельных его элементов. Так, на Красноярской ГЭС заложено 650 марок и реперов.

## 6.7. ТИПЫ КОНТРОЛЬНЫХ (ОСАДОЧНЫХ) МАРОК

Контрольные марки подразделяются на боковые, поверхностные, цокольные и т.д. Проект размещения марок составляют на картах масштаба 1:500 – 1:1 000 с учетом конструкции фундамента, геологических и гидрогеологических условий.

Поверхностные марки (ПМ) устанавливают в горизонтальные или слегка наклонные поверхности бетонных сооружений; боковые (БМ) или консольные — в боковые поверхности бетонных сооружений, чаще всего в период строительства; глубинные марки (ГМ) предназначены для измерения осадок оснований под сооружениями, для изучения деформации грунтов, для определения степени поднятия дна котлована в результате снятия с него природного давления. ГМ бывают разных конструкций.

Одним из основных и важных этапов организации работ по измерению осадок сооружений является размещение марок на сооружении. При подготовке к наблюдениям за осадками необходимо обращать внимание на: 1) общее расположение сооружений (включая подземные коммуникации); 2) геологическое строение участка; 3) программу и сроки строительных работ; 4) расчетные значения осадок, кренов, прогибов сооружений; 5) планы и разрезы фундаментов и основных несущих конструкций. На основании этих данных составляют программу наблюдений с проектом размещения опорных и контрольных (осадочных) знаков.

От правильного размещения контрольных марок зависит полнота и четкость выявления осадок сооружений. Марки размещают по разбивочным продольным и поперечным осям из расчета одна марка на каждые  $100\text{ м}^2$  площадки.

Обязательно устанавливают контрольные (осадочные) марки по углам здания ГЭС или другого сооружения, по сторонам осадочно-температурных блоков, на стыках соседних блоков — по обе стороны каждого стыка, в машинном зале — на статорных кольцах, на гребне плотины, в полу потерны (смотровая галерея), на шлюзах и т. п.

Перед затоплением котлована и созданием водохранилища выполняется переходное нивелирование с затапливаемых марок на новые, установленные выше первых. После этого новым маркам придают суммарную осадку нижних, чем достигается непрерывность в наблюдениях за осадками сооружений.

## 6.8. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОСАДКАМИ

Наблюдения за осадками состоят из: 1) периодического поверочного нивелирования знаков в кустах фундаментальных реперов и связи их с рабочими реперами; 2) нивелирования от рабочих реперов осадочных марок, заложенных непосредственно в сооружения.

Измерения осадок производят нивелиром с плоскопараллельной пластинкой и инварными штриховыми рейками. Нивелирование проводят каждый раз по одной и той же схеме. Нивелирные работы по определению осадок фундаментов подразделяют на три класса.

Средние квадратические ошибки измерения осадок для I, II и III класса соответственно 1, 2 и 5 мм.

Нивелирные работы I класса применяют при измерении осадок уникальных зданий и сооружений, а также зданий, построенных на скальных грунтах; II класса — при измерении осадок зданий, сооруженных на сжимаемых грунтах; III класса — при измерении осадок зданий, построенных на насыпных, просадочных и многолетнемерзлых грунтах.

Нивелирование выполняют по методике государственного нивелирования II класса высокоточными нивелира-

ми с оптическим микрометром и элевационным винтом Н-05, НА-1, *Ni-004*, *Ni-007* и инварными рейками. Нивелирование производят методом совмещения или при одном горизонте нивелира в прямом и обратном направлениях, или же в одном направлении при двух горизонтах нивелира. Нивелирные ходы опираются на фундаментальные реперы. Расстояние от нивелира до реек не должно превышать 30 м. Неравенство плеч допускают до 1 м, накопление неравенств по ходу — не более 2 м. Невязки в ходе подсчитывают по формуле

$$f_{h(\text{мм})} = \pm 1,2\sqrt{n},$$

где  $n$  — число станций.

Наблюдения осадочных марок во всех циклах рекомендуется проводить одной бригадой (наблюдатель и реечники), одним и тем же нивелиром и комплектом реек. Среднее расстояние от нивелира до реек обычно 10–25 м. Не допускается прохождение визирного луча ближе 0,5 м от поверхности земли и других предметов. Места стоянок нивелира надо фиксировать краской или другими способами, связующие точки закреплять сферическими головками, в потерне нивелир устанавливать на стенные кронштейны. Эти предосторожности необходимы, чтобы сохранить во всех циклах примерно одинаковые условия. При соблюдении указанных предосторожностей, согласно исследованиям ЦНИИГАиК, средняя квадратическая ошибка нивелирования на станции  $m_{\text{ст}} = 0,13$  мм.

Связь линий, проложенных на разных горизонтах, осуществляется с помощью высотного элеватора. Высотный элеватор (элеватор высот) — это три проволоки, подвешенные в шахте на грузах. Одна из них инварная, другая латунная, а третья стальная. Диаметр проволок 1,6 мм, в верхних и нижних их частях имеются шкалы длиной 10 см с миллиметровыми делениями. Превышения между нулями шкал, т.е. длину каждой проволоки, периодически контролируют (2–3 раза в год) сравнением с длиной стальной компарированной ленты, опускаемой в шахту рядом с про-

волоками. На ленте нанесены деления через 1 м, а на участках, где расположены шкалы проволок, также через 5 мм. Сравнение производится с помощью нивелира с плоскопараллельной пластинкой. Стальную ленту каждый раз компарируют на компараторе, в комплект которого входят два кварцевых жезла диаметром 16 мм, длиной 1 м. На концах каждого жезла нанесены три штриха. В результате каждый из них фиксирует три метровых отрезка, смещенные один относительно другого на 1 мм. Длины метровых отрезков жезлов определяют на стационарном компараторе в Институте метрологии со средней квадратической ошибкой 2–3 мкм. Латунная и стальная проволоки необходимы в элеваторе высот для введения температурных поправок в показания по инварной проволоке:

$$\Delta l_t = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \Delta l,$$

где  $\Delta l_t$  — поправка в длину инварной проволоки по отношению к компарированию (к нормальной длине);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты расширения соответственно инвара и дополнительной проволоки;  $\Delta l$  — удлинение инварной проволоки относительно дополнительной.

Средняя квадратическая ошибка определения превышений с помощью элеватора равна  $\pm 0,20$  мм, что соответствует ошибке нивелирного хода с четырьмя станциями при  $m_{ct} = \pm 0,13$  мм.

Наблюдения за осадками в основании контура водосливной плотины после его затопления выполняют нивелированием подводных марок с помощью специальных плавучих реек (обычно 2–3 рейки). Водолаз во время нивелирования специальным карабином пристегивает к марке инварную ленту, к верхнему концу которой прикреплена трубчатая пустотелая рейка, занимающая вертикальное положение. Точность этого метода 5–10 мм.

## 6.9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДЪЕМА ДНА КОТЛОВАНА

Вследствие расширения нижележащего грунта от его разуплотнения при освобождении от природного давления при рытье котлована под основание происходит подъем дна котлована. Такой подъем заметно ощутим в котлованах глубиной 8–10 м и более. С целью определения размера этого подъема в скважины, пробуренные в разных частях основания, закладывают глубинные марки. Скважины пробуривают заранее, до вскрытия дна котлована, на глубину 0,5–0,8 м ниже проектной глубины котлована. Отметки глубинных марок определяют от ближайшего репера путем нивелирования устья скважины и промером глубины скважины при помощи рулетки. Разность отметок до вскрытия котлована и после выемки грунта даст размер подъема дна котлована. Он может достигать 10 см и даже более. Это значение должно учитываться при наблюдениях за осадками.

Все работы должны сопровождаться постоянным контролем.

## 6.10. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НИВЕЛИРНЫХ СЕТЕЙ И ВЫБОР СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДОК

Основным методом наблюдения за осадками инженерных сооружений является метод геометрического нивелирования. Осадки недоступных точек сооружений наблюдают методом тригонометрического нивелирования. На ряде сооружений, таких как кессоны, опускные колодцы и т. п., целесообразно применять метод гидростатического нивелирования, основное достоинство которого — непрерывность измерений и возможность их автоматизации.

В местах строительства, где нет выходов скальных пород на дневную поверхность и где невозможно подобрать участки с устойчивыми, недеформированными грунтами, высотное обоснование для больших сооружений развива-

ется в две стадии — главное и рабочее обоснование. Пункты рабочей сети рекомендуется размещать настолько близко от сооружений, чтобы иметь возможность наблюдать контрольные (осадочные) марки с одной станции. При выборе методики нивелирования необходимо руководствоваться следующими соображениями: наиболее важным является выбор точности измерения осадок с указанием начала счета. Под этим понимается допустимая ошибка измерения осадок наблюдаемых точек относительно стабильного репера. Кроме того, может быть задана допустимая ошибка определения неравномерности осадок двух любых точек, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Связь между средней квадратической ошибкой единицы веса  $\mu$  и требуемой точностью измерений  $m_s$  измеряемой осадки  $s$ , а также средней квадратической ошибкой  $m_{\Delta s}$  измеренной разности осадок  $\Delta s$  может быть представлена неравенствами

$$\mu \leq m_s / \sqrt{2R_H} \text{ и } \mu \leq m_{\Delta s} / \sqrt{2R_{\Delta s}},$$

где  $R_H = 1 / P_H$  — обратный вес отметки наиболее «слабой» марки;  $R_{\Delta s} = 1 / P_{\Delta s}$  — обратный вес превышения между марками, к точности взаимного положения которых предъявляются повышенные требования.

В геометрическом нивелировании за  $\mu$  удобнее всего принять среднюю квадратическую ошибку превышения  $h$ , измеренного на станции по двум шкалам (основной и дополнительной шкалам реек) или по одной шкале, но при двух горизонтах нивелира, в ходе одного направления при заданной длине визирного луча:

$$h = \frac{1}{2} (h_{\text{осн}} + h_{\text{доп}}).$$

Средняя квадратическая ошибка этого превышения

$$m_h = f_h / 3N,$$

где  $f$  — допустимая невязка по линии;  $N$  — число независимых ходов в линии.

Обозначим среднюю квадратическую ошибку единицы веса при данной длине визирного луча  $D$

$$\mu_D = \frac{m_h}{\sqrt{1000/2D}} \sqrt{N}.$$

Для сравнения погрешностей  $\mu$  необходимо привести их к одной длине визирного луча, например к 5 м, как к минимальной длине для всех видов нивелирования:

$$\mu_s = \mu_D \sqrt{D_{\min} / D}.$$

Возможные значения приведены в табл. 9.

При тригонометрическом нивелировании в качестве целесообразно принять среднюю квадратическую ошибку превышения, измеренного при двух кругах теодолита. При гидростатическом нивелировании в качестве  $\mu$  принимается средняя квадратическая ошибка превышения между двумя смежными точками.

При проектировании схемы измерения осадок одной из главных задач является получение наименьшего значения обратных весов  $R_h$  и  $R_{\Delta h}$ . Чем они меньше, тем менее жесткие требования предъявляются к точности измерений осадок (при заданной допустимой погрешности их определения). Указанным требованиям отвечают схемы в виде замкнутых полигонов малых размеров. Кроме того, погреш-

Таблица 9  
Качественные характеристики геометрического нивелирования

Класс	$D$ , м	$\eta$ , мм/км	$f$ , мм	$N$	$m_h$ , мм	$\mu_D$ , мм	$\mu_s$ , мм
Нивелирование коротким лучом	5	0,5	1,5	2	0,25	0,04	0,04
I	50	1	3-5	4	0,25-0,42	0,16-0,26	0,05-0,08
II	65	2	5	2	0,83	0,42	0,12
III	75	4	10	2	1,67	0,92	0,24
IV	100	8	20	1	6,67	2,97	0,67

ности, вычисленные по невязкам малых полигонов, наиболее достоверны.

Расчет обратного веса  $R_h$  и  $R_{\Delta h}$  и в каждой конкретно выбранной схеме измерений целесообразно проводить способом эквивалентной замены, поскольку при этом используются простые формулы, а сам расчет обладает наглядностью и малой трудоемкостью ручного счета. В качестве наиболее «слабой» точки выбирается точка с максимальным значением обратного веса  $R_h$ , который устанавливается из сравнения весов ряда точек, расположенных в секции, наиболее удаленной от исходных пунктов. Аналогичный подход сохраняется и при определении  $R_{\Delta h}$ .

Полученные значения  $R_h$  и  $R_{\Delta h}$  подставляют в формулы, и, исходя из вычисленных средних квадратических ошибок единицы веса, устанавливают соответствующую методику измерений.

#### 6.11. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ КОРОТКИМ ЛУЧОМ

В целях повышения точности наблюдений за осадками особо ответственных объектов у нас в стране с 1960 г. применяется метод нивелирования коротким лучом. Исследования показали, что при длине плеч до 10 м применением специальных реек и особой методики измерений можно достичь средней квадратической ошибки измерения превышения на станции 0,02–0,05 мм. Резкое повышение точности достигается за счет ослабления влияния погрешностей из-за внешних условий, ошибок деления шкал реек, их установки в вертикальное положение и главное — ошибок отсчетов.

Погрешность в миллиметрах «взгляда» (совмещения) на рейку с инварной шкалой у нивелира типа НА-1 характеризуется эмпирической формулой

$$m_{\text{взгл}} = 0,014 + 0,0014D_m$$

где  $D_m$  — расстояние от нивелира до реек, м.

Для нивелира типа *Ni-007*

$$m_{\text{взgl}} = 0,009\sqrt{D_m}.$$

При коротких плечах эти формулы практически идентичны.

Взаимное положение точек, удаленных от исходного репера на несколько сотен метров, определяется с погрешностью 0,1–0,2 мм. Применяемые нивелиры — *H-05*, *Ni-002*, *Ni-004*, *Ni-007*.

Методика работы следующая:

1. Нивелирование выполняется строго из середины. Неравенство плеч при длине визирного луча 5–6 м допускается менее глубины резкости зрительной трубы, так как перефокусировка ее запрещена. По абсолютной величине неравенство плеч должно быть не более 10 см.

2. Нивелирование выполняется способом совмещения по штриховым инварным рейкам или по шкаловым маркам со строгим соблюдением требований нивелирования II класса. Возможно применение шашечных реек при способе совмещения, но для этого нивелир должен быть снабжен специальной насадкой. Желающие могут познакомиться с такой методикой [6, 7].

3. Для ослабления ошибок штрихов реек, которые могут достигать у инварных шкал 0,05 мм, визирование производят на заранее обусловленные штрихи. Для этого применяется специальная прецизионная нивелирная подставка ПНП, которая позволяет поднимать или опускать нивелир на каждой станции на высоту до 10 см.

4. Применяется строго независимый контроль измерений на станции, состоящий из сравнения с допуском разности превышений, вычисленных по отсчетам основной и дополнительной шкал пары реек, допуск не более 0,4 мм (8 делений отсчетного барабана).

5. Порядок наблюдений строго симметричен во времени: на нечетной станции  $Z_1\Pi_1\Pi_2Z_2$ , на четной станции  $\Pi_1Z_1Z_2\Pi_2$ , где  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  — отсчеты по штрихам основной и дополнительной шкал передней рейки;  $Z_1$  и  $Z_2$  — отсче-

ты по штрихам основной и дополнительной шкал задней рейки.

6. Отсчеты по барабану оптического микрометра производятся до 0,1 деления. Перед началом работ ошибки делений отсчетного барабана должны быть тщательно исследованы и проанализированы.

7. При наведении трубы нивелира на заднюю и переднюю рейки следует соблюдать одинаковое положение вертикальной сетки нитей по отношению к долям штрихов рейки. В период неустойчивой температурной стратификации приземного слоя атмосферы турбулентные движения воздуха создают сильные колебания изображений штрихов реек. Эти колебания информируют наблюдателя о степени влияния рефракции в данный период. Глубокое изучение колебаний изображений позволило в последнее время предложить оригинальный метод борьбы с рефракцией.

8. Для уменьшения вредного воздействия нивелирной рефракции рекомендуется при колеблющихся изображениях штрихов наводить угловой биссектор на крайние верхние положения колеблющегося штриха, как видно в трубу нивелира с обратным изображением, или на нижнее положение колеблющегося штриха при применении нивелира с трубой прямого изображения.

Недостатки метода: 1) трудность автоматизации измерений; 2) сложность, а иногда и невозможность нивелирования в труднодоступных закрытых местах.

## 6.12. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ СООРУЖЕНИЙ

### 6.12.1. *Общие сведения*

Под абсолютным смещением сооружения понимается полный горизонтальный сдвиг вместе с частью основания. Это смещение определяют относительно неподвижных гео-

дезических знаков, установленных вне зоны распространения давлений от сооружений.

Под относительным смещением понимается перемещение одних частей фундамента относительно других. Измерения сдвигов гидротехнических сооружений определяют различными методами, каждый из которых обладает специфическими особенностями и точностью. Наиболее распространенные следующие:

1. Метод створов: а) способ визирования по створу, б) способ измерения параллактических углов, в) способ измерения высот треугольников, г) способ плавающей струны.
2. Метод триангуляции (включает и прямые засечки).
3. Комбинированный метод (сочетание триангуляционного метода с методом створов).
4. Метод отдельных направлений.
5. Метод измерения кренов и сдвигов сооружений при помощи отвесов: а) прямого, б) обратного поплавкового, в) обратного уровенного, г) обратного оптического (зенит-прибор), д) лазерного (например, оптического квантового генератора, который задает отвесный луч).

Организация наблюдений за горизонтальными смещениями сооружений ведется аналогично организации наблюдений за их осадками. Составляют проект размещения и установки контрольно-измерительной аппаратуры, выполнения работ на ней.

Створные методы и метод отдельных направлений применяют обычно тогда, когда есть возможность заложить опорные пункты в скальных грунтах. Метод триангуляции и комбинированный метод используют, когда ГЭС расположена на сжимаемом основании и нет условий для создания створа. Эти методы основаны на периодическом определении координат контрольных марок (КМ) в теле сооружения с пунктов, положение которых, в свою очередь, проверяется от более удаленных опорных пунктов.

Точность определения сдвигов зависит от принятого метода наблюдений и от свойств грунтов, на которых воздвигнуто сооружение, значения и конструкции самого сооружения.

оружения. Для скальных грунтов допустимая ошибка относительно опорных пунктов при створном методе 1,0 мм; при комбинированном методе 1,5 мм. Для сжимаемых грунтов соответственно 2,0 и 3,0 мм. Для земляных и камне-набросных плотин вне зависимости от характера основания и метода наблюдения ошибка 10,0 мм.

### ***6.12.2. Периодичность наблюдений***

Первый цикл наблюдений начинается после того, как положение опорных пунктов уже стабилизировалось, но горизонтальные усилия на сооружение (до заполнения водохранилища) еще не появились. Для получения надежных результатов наблюдения в первом цикле выполняют дважды и с возможно большей точностью. Второй цикл наблюдений выполняют сразу после того, как проявятся действия горизонтальных усилий на сооружение.

После сдачи сооружений в эксплуатацию наблюдения выполняют 1–2 раза в год и прекращают их, когда скорость смещений становится меньше 1–2 мм/год.

### ***6.12.3. Геодезические знаки, применяемые при наблюдениях за горизонтальными смещениями***

*Опорные пункты* должны обладать стабильностью, т. е. не изменять своего положения в плане. Их устанавливают вне зоны оседания с целью определения смещения контрольных марок. Как правило, опорные пункты имеют вид наблюдательных столбов, в верхней части которых заложен гнездовой центр для самоцентрирования теодолита и визирной марки, что исключает ошибки за центрировку и редукцию. С наблюдательных столбов непосредственно выполняют измерения смещений отдельных точек сооружений.

*Ориентирные пункты* — знаки, наиболее удаленные от сооружений, служат для ориентирования створа или для закрепления исходного направления.

*Контрольные знаки* — знаки, заложенные в характерных местах сооружения. Они изменяют свое положение вместе с изменением положения элементов сооружения. Они обычно имеют вид четырехгранного железобетонного столба сечением 30×30 см и высотой порядка 1 м над поверхностью сооружения. Если по каким-либо обстоятельствам установить такие знаки нельзя, то в тело сооружения закладывают скрытые марки.

Наименьшее расстояние от опорных знаков до контрольных — 25 м, наибольшее — от 100 до 300 м.

Контрольные марки размещают по определенному проекту в зависимости от типа сооружения и метода наблюдений. Если сооружение разделено на секции, то на каждую секцию устанавливают не менее двух контрольных марок. На сооружениях, имеющих длительное протяжение (подпорные стенки, плотины и др.), марки закладывают через каждые 30 м.

#### *6.12.4. Приборы, применяемые для контроля за горизонтальными смещениями*

Кроме всем известных нивелира и теодолита для этой цели применяют:

1. Алиниометр (фирма «К. Цейсс») с накладным уровнем и увеличением зрительной трубы 65<sup>х</sup>. Прибор используют для створных наблюдений. На расстояниях до 600 м алиниометр позволяет производить визирование с погрешностью не более  $\pm 1$  мм.

2. Неподвижные визирные марки. Их используют для установления направления створа и для визирования на опорные и наблюдательные знаки.

Конструкции марок разнообразны, но все они имеют визирную цель: щиток, экран, шпиль, — укрепленную на подставке с подъемными винтами и цилиндрическим уровнем.

3. Подвижные визирные марки. Они служат для непосредственного определения отклонения контрольных пунк-

тов (марок) от линии створа. У подвижных марок щиток с визирной целью перемещается влево и вправо при помощи микрометренного винта. Перемещения определяют по измерительной линейке с верньером или по шкале микрометра с точностью от 0,1 до 0,01 мм. Подвижную марку обычно перемещает помощник наблюдателя по сигналам (указаниям) последнего. Но имеются конструкции подвижной марки с электроприводом и дистанционным управлением непосредственно от наблюдателя. Такая автоматизация процесса измерений заметно увеличивает производительность труда и исключает личные ошибки помощника.

#### 6.12.5. Методы измерений горизонтальных смещений

*Метод створа.* По продольной оси сооружения намечается прямая створная линия. Она закрепляется четырьмя опорными знаками *A*, *B*, *C*, *D* (рис. 38), столбы которых устанавливают с допустимым отклонением от створа +(2–3) см. По створу в местах соединения блоков закладывают контрольные пункты (КП). Измерение их отклонений от створа производят теодолитом при двух кругах, причем в каждом цикле наблюдений теодолит устанавливают одинаковыми подъемными винтами на одни и те же точки опорной плиты столба. Наблюдения ведут с обоих берегов реки. После ориентирования трубы теодолита по створу на неподвижную марку, установленную на противоположном конце створа, помощник наблюдателя по команде выставляет подвижные визирные марки на КП.

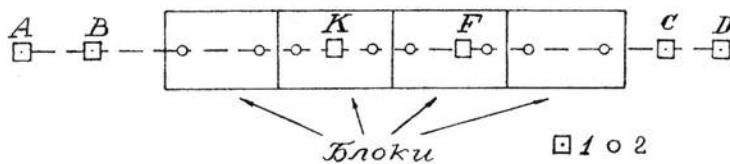


Рис. 38. Метод определения горизонтальных смещений по створу

1 — опорные знаки; 2 — контрольные пункты (КП)

Визирная цель марки при помощи микрометра по заранее установленному сигналу выводится помощником в створ. После этого производится отсчет по микрометру. Наблюдения повторяют при другом круге, и так — несколькими приемами. Сдвигом является разность отклонения марок от линии створа в двух циклах наблюдений.

Проверка устойчивости опорных пунктов производится в каждом цикле по отношению к сопряженным пунктам (с  $A$  на  $C$  и на  $D$  и т. д.). Расстояние от опорных пунктов до КП не более 300 м, в противном случае по створу закладывают дополнительные опорные пункты ( $K$  и  $F$ ).

Достоинство способа заключается в простоте вычислений. Недостатки — отрицательное влияние на точность измерений ошибки хода фокусирующей линзы зрительной трубы, влияние систематической ошибки запаздывания выполнения помощником команды о прекращении движения марки, влияние боковой рефракции. Метод применяют преимущественно на поверхности, в потerne результаты искажаются боковой рефракцией. Разновидность способа — фиксация створа прибором с ОКГ.

*Определение отклонений КП от створа путем измерения параллактических углов.* Отклонения КП от створа определяют точным измерением параллактических углов  $\alpha$  и  $\beta$  с левого и правого берегов с помощью окулярного или оптического микрометра (рис. 39). Отклонения от створа вычисляют по формуле

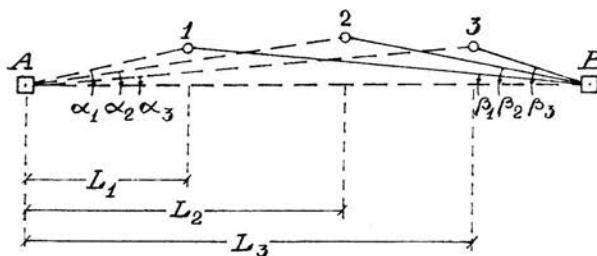


Рис. 39. Метод определения горизонтальных смещений путем измерения параллактических углов

$$q = \alpha'' L / \rho''.$$

Преимуществом перед методом створа является уменьшение численности бригады (не нужен помощник) и возможность определения смещения непрямолинейных объектов.

*Определение отклонений КП от створа путем измерения высот треугольников.* В этом способе между конечными точками створа прокладывают вытянутый ход  $A-1-2-3-B$ , в котором отклонения КП 1, 2, 3, ... от вспомогательных створов  $A-2$ ;  $1-3$ ;  $2-B$  ...  $q_1, q_2, q_3$  измеряют с помощью микрометров подвижных марок, причем дважды, с  $A$  и с  $2$  (рис. 40). Расстояния  $L$  между смежными знаками измеряют с точностью 0,1 м.

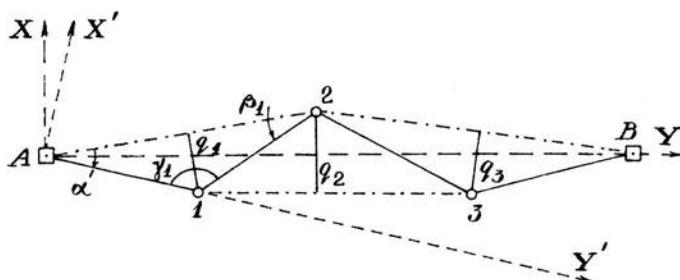
В треугольнике  $A-2-1$

$$\alpha''_1 = \frac{q_1 \rho''}{L_{A-1}}; \quad \beta''_1 = \frac{q_1 \rho''}{L_{1-2}} \text{ и т. д.}$$

$$\gamma_1 = 180^\circ - (\alpha''_1 + \beta''_1) = 180^\circ - \frac{q_1 \rho''}{L_{A-1} L_{1-2}} (L_{A-1} + L_{1-2}).$$

Из треугольников вычисляют  $x'$  и  $y'$  в условной системе координат. Для этого точку  $A$  принимают за начало координат, а сторону  $A-1$  за ось  $Y'$ . Вычисляют условный дирекционный угол створной линии  $AB$  относительно оси  $X'$ :

$$\operatorname{tg}(AB) = \frac{y'_B}{x'_B}.$$



**Рис. 40.** Метод определения горизонтальных смещений путем измерения высот треугольников

Затем находят дирекционный угол стороны  $A-1$  относительно оси  $X$  и по нему вычисляют абсциссы в системе координат  $X, Y$ , т.е. отклонение всех КП (1, 2, 3, ...) от створа  $AB$  в каждом цикле наблюдений.

*Метод плавающей струны.* Сущность способа заключается в определении отклонений КП от створа, закрепленного стальной проволокой диаметром 0,8-1 мм.

Проволоку натягивают на блоках с помощью грузов массой примерно 60 кг. Она поддерживается с помощью поплавков, плавающих в сосудах с водой. Проволока (струна) свободно плавает на поплавках (рис. 41) и под натяжением устанавливается прямолинейно в вертикальной плоскости. Контрольные марки в этом способе имеют вид консолей, на которые устанавливают ванночки с водой. Постоянство контакта с консолью обеспечивается углублением в ванночке и цилиндрической опорой. Положение продольного борта ванны по отношению к проволоке определяется стрелкой, перемещаемой по измерительной линейке. Способ предложен в 1950 г. В. П. Бомбинским. Метод плавающей струны — основной для наблюдений в потерне.

Существует несколько модификаций этого способа. Например, струну натягивают в наиболее безопасном месте — под потолком потерны, а в пол закладывают поверхностные горизонтальные марки. Их отклонения от створа натянутой струны определяют оптическим центриром фирмы «К. Цейсс» с переключающей призмой, дающей возможность вертикального визирования вверх и вниз. Для ускорения работы и избегания точного центрирования прибора над маркой в отверстия полусфери-

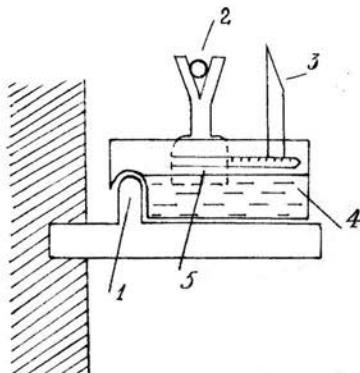


Рис. 41. Метод определения горизонтальных смещений по плавающей струне

1 — цилиндрическая опора;  
2 — плавающая струна; 3 — контактная стрелка; 4 — вода;  
5 — поплавок

ческих головок марок вставляют специальный калиброчечный шаблон с миллиметровыми делениями, по которому берут отсчеты. Для измерения отстояний марок от створа струны фирма «К. Цейсс» на основе оптического центрира разработала специальный прибор — лотметр. Количество поплавковых опор для этого способа зависит от про-веса струны:

$$f = PS^2 / 8H,$$

где  $P$  — масса 1 м струны, кг;  $S$  — длина пролета, м;  $H$  — натяжение, кг.

Если  $S = 10$  м,  $H = 100$  кг, применена рояльная струна диаметром 1,5 мм,  $P = 13,3$  г, то  $f = 6$  см.

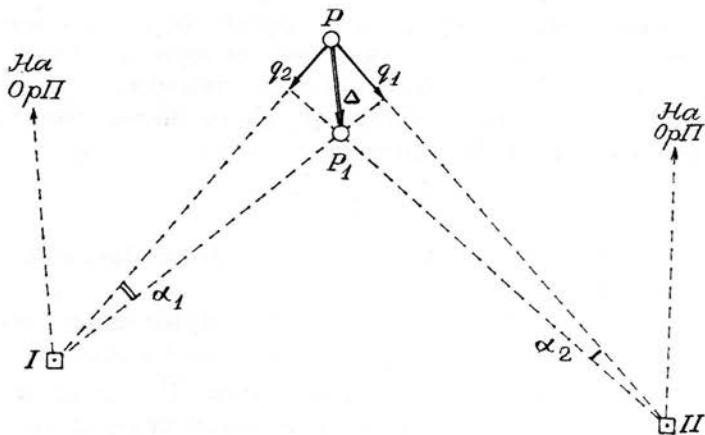
*Метод отдельных направлений.* Его отличие от метода засечек в том, что наблюдательные пункты не связаны между собой в геодезическом отношении и их координаты не определяют. Линии визирования короткие (до 1000 м), и точность определения расстояний невелика. Основное отличие способа — это неподвижность наблюдательных и ориентирных пунктов. Способ этот — расчетно-графический.

Векторы перемещения вычисляют по формуле (рис. 42)

$$q = \frac{\alpha''L}{\rho''},$$

а смещения  $\Delta$  определяют графически как сумму векторов (по правилу параллелограмма).

*Метод параллельных створов.* Метод створных наблюдений прост, точен и требует мало времени на полевые и камеральные работы. В процессе определения горизонтальных смещений получают непосредственно измеренное значение смещения. Такой метод обычно применяют на сооружениях, имеющих в плане прямолинейные очертания. Арочные плотины, имеют в плане круговые, эллиптические или параболические очертания. Применять на таких сооружениях обычный створный метод нельзя, так как один створ не будет охватывать все контрольные марки, заложенные по гребню плотины. На таких плотинах гори-



**Рис. 42.** Метод определения горизонтальных смещений измерением направлений горизонтальных углов  
ОрП — ориентирный пункт

зонтальные перемещения измеряют более трудоемкими методами полигонометрии или триангуляции. Для упрощения измерений горизонтальных перемещений плотин непрямолинейной формы рекомендуется применять многостворный метод параллельных створов [3].

Многочисленными исследованиями установлено, что гребень плотины находится в непрерывном движении, перемещаясь попеременно то в сторону верхнего, то в сторону нижнего бьефа вследствие совместного действия колебаний температуры внешней среды и гидростатического давления водохранилища. Под действием гидростатического давления плотины водоприемники, затворы и другие сооружения будут смещаться параллельно водотоку. Следовательно, створы надо расположить нормально водотоку с таким условием, чтобы каждый из них проходил через одну или несколько контрольных марок, заложенных на гидроизоляции (рис. 43). Методика и точность измерений горизонтальных смещений такие же, как и при одностворном методе.

При измерениях горизонтальных смещений методом параллельных створов опорные пункты на каждом створе

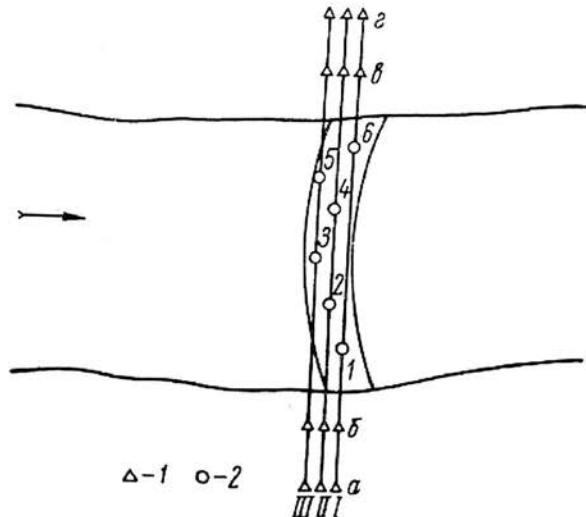


Рис. 43. Метод определения горизонтальных смещений с помощью параллельных створов.

1 — опорные пункты; 2 — контрольные марки

следует располагать по два (см. рис. 43) на каждом берегу водохранилища. Изложенный метод экономически рентабелен и наиболее точен. Ввиду того что плановые смещения гидротехнических сооружений в течение 2–3 месяцев имеют небольшие величины, выражющиеся в миллиметрах, способ позволяет зафиксировать даже незначительные плановые смещения.

*Метод пересекающихся створов.* Если рельеф береговой зоны водохранилища не позволяет расположить на местности ряд параллельных створов, то предлагается применить метод пересекающихся створов [4]. Один из створов, например I (см. рис. 44), должен быть перпендикулярным направлению водотока.

При выборе остальных створов необходимо выдерживать угол между направлением водотока и створом в пределах от 90° до 45°, так как при более остром угле значительно увеличивается длина створа, что снижает точность визирования.

При закладке опорных пунктов следует измерять углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и т. д. между первым створом и последующими с точностью до  $1^\circ$ . Углы эти остаются постоянными на все время измерений горизонтальных перемещений контрольных марок и повторно их не измеряют. Вся остальная организация работ, методика и точность измерений остаются такими же, как и при одностворном методе. Для приведения результатов измерений по всем створам к створу I, расположенному перпендикулярно водотоку, необходимо измеренные перемещения умножить на косинус углов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и т. д. между данным створом и створом I.

Для контроля жесткости опорных пунктов необходимо на каждом берегу водохранилища закреплять створ двумя опорными пунктами, расположенными на расстоянии более 20 м друг от друга. Для устранения ошибки за центрировку теодолита и редукцию визирной макеты пункты следует закреплять гнездовыми центрами.

Теодолит следует устанавливать на опорном пункте b и визировать на пункты c, d и контрольные марки, заложенные по данному створу. Потом переносить его на опорный пункт с и визировать на пункты a и b. Если при визировании на опорные пункты окажется, что все три пункта, например a, b и с, находятся на одной прямой, то опорные пункты смещения не имеют. Устанавливать теодолит на пункте a и визировать на пункты b, c и d не следует, так как большое расхождение между расстояниями ab и

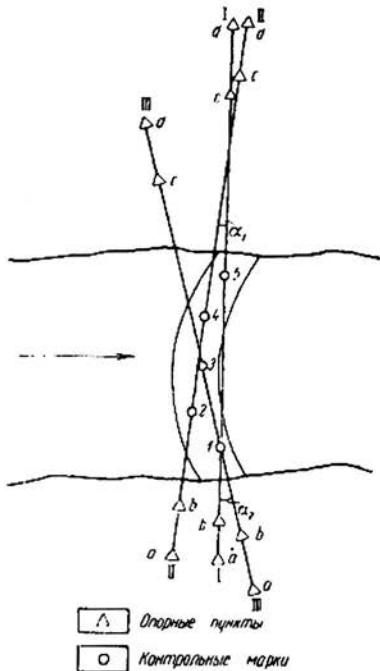


Рис. 44. Определение горизонтальных смещений методом пересекающихся створов

ад потребует измерения фокусировки зрительной трубы прибора, что может привести к дополнительным приборным ошибкам. Многостворный метод измерений горизонтальных перемещений сооружений в несколько раз точнее метода триангуляции.

Отвесы служат для определения крена сооружений.

При работе с прямыми и обратными отвесами используют координетры — две взаимно перпендикулярные линейки с миллиметровыми шкалами. Отвесы могут быть механическими и оптическими.

Прямой отвес имеет внизу соответствующий груз, опущенный в успокоитель (сосуд с соляркой).

Обратный отвес — поплавковый. Нижний конец проволоки крепится в неподвижных коренных породах основания, а верхний ее конец скреплен с поплавком, плавающим в торообразном сосуде с водой. Недостатки поплавкового отвеса: малые измерительные возможности (ограничены диаметром скважины, обычно диаметр смотровой скважины 25–30 см), трудность сохранения строгой вертикальности скважины при бурении (на Братской ГЭС отклонение скважины глубиной 40 м от вертикали составило 15 см).

У обратного уровняенного отвеса приведение проволоки в отвесное положение достигается двумя парами прецизионных цилиндрических уровней, закрепленных на верхнем и нижнем концах проволоки. Натяжение проволоки осуществляется динамометром.

## 7. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАНАЛОВ

### 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

По своему назначению каналы делятся на судоходные, энергетические (деривационные и подводящие), оросительные (иригационные), осушительные, водопроводные, ле-

сославные. Чаще всего встречаются каналы комплексного назначения.

Судоходные каналы представляют собой особенно сложные комплексы сооружений — шлюзов, водохранилищ, насосных станций, головных сооружений и др.

*Головным участком системы называют комплекс гидротехнических сооружений у места водозабора, которые обеспечивают и регулируют поступление воды в канал и предотвращают поступление в него наносов. Движение воды в каналах безнапорное, с уклонами порядка 0,01–0,1 %.*

Основная задача проектирования канала заключается в том, чтобы длина его между конечными пунктами была наименьшей, а объем работ и стоимость — минимальными. В связи с этим трассирование канала производится по высотно-азимутальным параметрам.

Высотный параметр — обеспечение заданных уклонов, азимутальный — проложение наиболее короткой и экономически выгодной трассы. Основные документы на трассу канала — план и продольный профиль. При расчетах живого сечения канала задаются наиболее выгодным уклоном дна при соответствующей скорости течения воды. Скорость же течения подбирается такой, чтобы русло канала не заиливалось взвешенными частицами наносов при малых скоростях и в то же время не размывалось от больших скоростей воды. Выбирают выгоднейшую скорость  $v$  под условием

$$v_{\text{нз}} < v < v_{\text{нр}},$$

где  $v_{\text{нз}}$  — незаиливающая скорость;  $v_{\text{нр}}$  — неразмывающая скорость.

Проектирование канала, как и всех других гидротехнических сооружений, ведется в две стадии — проектное задание и рабочий проект. Проектному заданию предшествует внереадийный этап — технико-экономический доклад (ТЭД), в котором дается обоснование целесообразности строительства канала. На этапе ТЭД используются топокарты масштабов 1:100 000-1:25 000.

## 7.2. ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Исходными пунктами для создания планового обоснования по трассе канала служат пункты ГГС 1–4-го классов. Плановое обоснование создается обычно методом полигонометрии 1-го и 2-го разрядов. В открытой местности, где это целесообразно, полигонометрия может быть заменена триангуляционными сетями сгущения или методом боковых засечек А. И. Дурнева. Точность высотного обоснования зависит от проектных уклонов дна канала. В зависимости от характера уклона местности каналы бывают с прямым уклоном, с обратным уклоном и с горизонтальным дном. Большинство каналов строится с прямым уклоном дна. Каналы с обратным уклоном могут быть построены на особых участках в виде подводящих или отводящих русел. Участки с горизонтальным дном чаще всего сооружают на водораздельных бьефах судоходных каналов.

Необходимо установить определенные допуски для высотных измерений. Между уклоном  $i$  и превышением между двумя точками (падением)  $h$  существует прямая зависимость:

$$i = h / L. \quad (1)$$

Дифференцируя переменные и переходя к средней квадратической ошибке, получим

$$m_i = \frac{1}{L} \sqrt{m_h^2 + i^2 m_L^2},$$

где  $m_i$ ,  $m_h$ ,  $m_L$  — средние квадратические ошибки определения соответственно уклона, падения и горизонтального расстояния.

Поскольку уклоны большинства каналов составляют 0,01–0,1 %, вторым членом под знаком корня можно пренебречь, тогда

$$m_i = m_h / L. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что

$$m_i / i = m_h / h,$$

т. е. относительная ошибка в уклоне равна относительной ошибке в превышении.

Значит, чем больше падение, тем меньшая точность требуется для обеспечения нивелирования уклона на данном участке канала.

Расчеты и опыт работ показывают, что на практике должно иметь место неравенство

$$(m_i / i) \leq 7\%.$$

Если вдоль канала (рис. 45) прокладывают магистральный ход, а от него рабочими ходами привязывают урезы воды в канале, то ожидаемая ошибка в определении падения канала  $h$  может быть вычислена по известной формуле

$$m_h = \sqrt{m_D^2 + m_{d_1}^2 + m_{d_2}^2}.$$

При одинаковой точности нивелирования магистрального и рабочих ходов эта формула примет вид

$$\eta_{km} = \sqrt{\frac{m_h^2}{D + d_1 + d_2}}.$$

где  $\eta_{km}$  — случайная ошибка на 1 км нивелирного хода. Последняя формула является расчетной для определения точности нивелирования при строительстве каналов.

Опыт показывает, что для обеспечения запроектированных уклонов при условии, что  $D = 1$  км, а  $d_1 = d_2 = 0,5$  км, необходимо производить нивелирование следующих классов:

Уклон канала, %	.....	$\leq 0,03$	$0,03-0,06$	$0,06-0,14$	$\geq 0,14$
Класс нивелирования	.....	I	II	III	IV

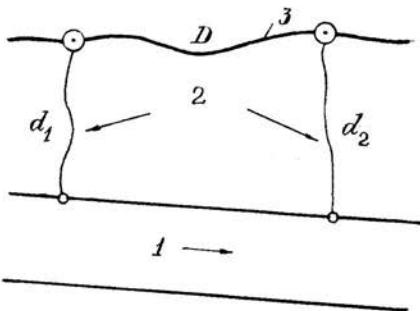


Рис. 45. Определение урезов воды в канале от магистрального хода  
1 — канал; 2 и 3 — рабочий и магистральный нивелирные ходы

Методы топографической съемки полосы трассы канала применяют те же, что и при съемках русла реки или водохранилища, в зависимости от условий местности и объема работ. Особое внимание при съемке следует уделять правильности изображения рельефа на карте, так как местоположение трассы канала зависит от точности положения горизонталей.

При трассировании судоходных каналов радиусы закруглений принимают не менее 6-кратной расчетной длины судна. Для магистральных оросительных каналов радиусы закруглений должны быть более 5-кратной ширины зеркала воды в канале.

При небольших изменениях продольного или поперечного профиля канала устраивают плавные переходы (вставки). При резком изменении отметок дна устраивают перепады и быстротоки.

*Перепад — сооружение, сопрягающее два участка канала с разными уровнями воды.*

*Быстроток — сооружение, направляющее поток воды с большой скоростью из верхнего участка канала в нижний. Его сооружают для пропуска рыбы и сплавного леса.*

На судоходных каналах в таких случаях строят судоходные шлюзы.

При составлении проектного задания объемы земляных работ на канале в кубических метрах вычисляют по формуле Винклера

$$W = \left[ \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} - \frac{(T_1 - T_2)^2}{6} m \right] L,$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — площади поперечных сечений канала,  $\text{м}^2$ ;  $T_1$  и  $T_2$  — глубина канала на первом и втором поперечниках,  $\text{м}$ ;  $L$  — горизонтальное расстояние между поперечниками,  $\text{м}$ ;  $m$  — коэффициент заложения откосов канала (рис. 46),  $m = \operatorname{ctg} \alpha$ ;

$$\omega = \frac{b + B}{2} T = (b + mT) T.$$

Опыт работ показывает, что точность объемов земляных работ зависит главным образом от точности определения площадей поперечных сечений с учетом поперечного уклона местности.

На практике подсчет указаных площадей производят по диаграммам или по таблицам вычисления объемов земляных работ. Точность определения площадей колеблется от 0,5 до 1 % в зависимости от глубины канала.

Чаще всего поперечное сечение канала делают в виде трапеции, но в скальных грунтах поперечному сечению придают прямоугольную форму. Наиболее выгодным является такое поперечное сечение канала, у которого для заданной глубины  $T$  смоченный периметр был бы минимальным.

В случае трапецидальной формы сечения канала для этого надо соблюдать условие

$$\frac{b}{T} = 2 \left( \sqrt{1 + m^2} - m \right).$$

Коэффициент и угол заложения подводных откосов принимают следующими:

	$m$	$\alpha$
Для пылеватых песков . . . . .	3-3,5	18°37'-15°56'
Для крупных песков и супеси . . . .	1,5-2,5	33°41'-21°53'
Для суглинков, глин и гравия . . . .	1,25-1,5	38°39'-33°41'

Запас откосов под зеркалом воды устанавливают от 0,2 до 2,0 м в зависимости от колебания уровней воды в канале.

Перенесение в натуру трассы канала производят по графическим координатам углов поворота, точек переходов и пересечений.

Ось канала выносится на местность с помощью мензуры и кипрекеля. По четко выраженным контурам выно-

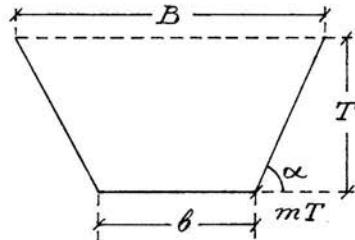


Рис. 46. Поперечный профиль канала

сят в натуру отдельные точки оси канала через 3–5 км. Затем по оси канала прокладывают теодолитный ход, который привязывают к пунктам планового обоснования для вычисления координат и для контроля последующих работ. По оси канала разбивают пикетаж и поперечники через 100 м и дополнительно — в местах перегибов местности, ширина таких поперечников 100–200 м. Затем производят нивелировку оси канала и поперечников. Камеральные работы заканчиваются составлением плана трассы и построением продольного профиля и поперечников, на которые наносят проектную линию дна канала. Вынос проектной линии дна канала производят общепринятыми способами.

## 8. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

### 8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

*Мелиорация — это система организационно-хозяйственных и технических мероприятий, направленных на улучшение почвенных, гидрогеологических и климатических условий.*

Мелиорация на засушливых и безводных землях называется оросительной (или ирригацией). Осушительная мелиорация имеет целью удаление из почвы избытка влаги.

Опыт показывает, что в денежном выражении продуктивность пашни на орошаемых землях примерно в 5 раз, а на осушаемых в 2 раза выше, чем на остальных. Естественно, что такие мероприятия требуют значительных по объему топографо-геодезических работ.

## 8.2. ОРОШЕНИЕ ЗЕМЕЛЬ

Орошение может быть однократно действующим (так называемое лиманное), когда отдельные участки затапливаются весенними паводковыми водами, и регулярно действующим. Последнее достигается разными способами: 1) поверхностное распределение воды по бороздам и арыкам; 2) подпочвенное орошение — введение воды в почву по трубам (применяются керамические, асbestовые или полиэтиленовые трубы); 3) разбрызгивание в виде дождя.

Оросительная система в современном виде состоит из (рис. 47) источника орошения, головного канала с отстойниками и каналов-распределителей и борозд.

Источник орошения — река, озеро, водохранилище. Головной, или магистральный, канал с отстойниками доставляет воду на орошаемые участки.

**Отстойники** — сооружения для борьбы с наносами и заиливанием русла канала; по конструкции бывают однокамерные и многокамерные. В них скорость воды резко уменьшается и осадки выпадают в отстойные камеры.

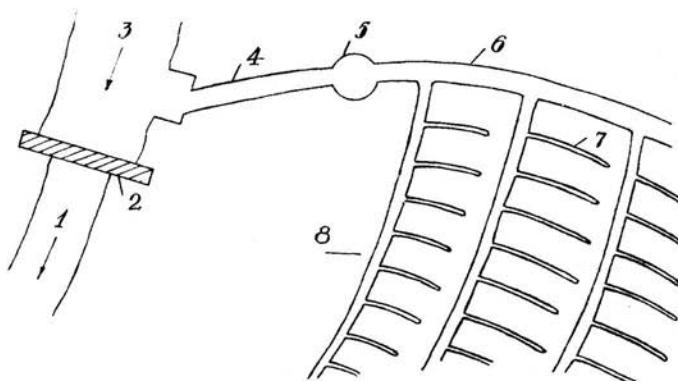


Рис. 47. Схема оросительной сети

1 — река; 2 — головной узел (плотина); 3 — источник орошения; 4 — холостая часть магистрального канала; 5 — отстойник; 6 — рабочая часть магистрального канала; 7 — поливные борозды; 8 — канал-распределитель

Магистральный канал состоит из холостой части — до начала распределительных каналов, и рабочей части, от которой отходят распределительные каналы.

Полив по проточным поливным бороздам производится на площадях с уклоном от 0,002 до 0,01 %. Длина поливных борозд возрастает с увеличением уклонов и достигает 400 м.

К поперечным сечениям и к продольным профилям оросительных каналов предъявляются следующие требования: 1) неразмываемость; 2) незаливаемость; 3) минимум фильтрации (ухода воды в грунт); 4) максимум пропускной способности.

Нормальная работа оросительной системы в целом обеспечивается насосными станциями, быстротоками, акведуками и др.

Закрытые системы нуждаются в трубах, а при малых падениях местности (меньше 0,07 %) требуют создания механического подпора. Такие системы дороже, но их существенное преимущество состоит в отсутствии потерь воды на испарение и освобождении земли от каналов. Закрытые оросительные системы могут быть самотечными и напорными. Магистральный канал обычно располагается по командным высотам, на водоразделе.

Проектируются оросительные системы, как и другие гидротехнические сооружения, в две стадии: проектное задание и рабочий проект (рабочие чертежи).

Комплекс изысканий на орошение слагается из следующих видов работ: а) геодезических, б) гидрогеологических, в) гидрометрических, г) почвенных, д) гидротехнических, е) агроэкономических и др.

Изыскания каналов требуют выполнения подробных топографических съемок и нивелирования орошаемых площадей с горизонталями через 0,25–2,5 м в зависимости от рельефа местности и стадии проектирования: 1) съемка масштабов 1:25 000–1:50 000, а при пологом рельефе — 1:10 000 для проектного задания; 2) съемка масштабов 1:5 000–1:10 000 для составления рабочего проекта; 3) на

типовых участках для проектирования элементов полива и планировочных работ масштаб съемки 1:1 000.

Геодезические работы для проектирования магистральных каналов ничем не отличается от работ, рассмотренных в разделе 7.2.

### 8.3. ОСУШЕНИЕ ЗЕМЕЛЬ

Продовольственная программа одной из своих составных частей предусматривает осушение заболоченных и избыточно увлажненных земель для обеспечения высокого плодородия почв. Осушительные работы у нас в стране производят главным образом на северо-западе России и в Западной Сибири. Осушение выполняют также на строительных площадках или на уже застроенных промышленных территориях в связи с их подтоплением или заболачиванием для создания нормальных условий работ.

Осушительные системы по способу отвода воды подразделяют на самотечные и с машинным водоподъемом, а по виду сети — на открытые и закрытые, т. е. осушение осуществляется: а) открытыми канавами, б) закрытым дренажом, в) при помощи поглощающих колодцев.

*Дренаж — комплекс сооружений из дрен, коллекторов, скважин, насосных станций для сбора и отвода с земель избытка влаги и растворенных в ней солей.*

Примерная схема осушительной сети сельскохозяйственных земель показана на рис. 48. Осушители называются регулирующей сетью, а собиратели и коллекторы — проводящей. Коллекторы закладывают в направлении наибольших уклонов местности с наименьшим числом поворотов. Водоприемник не должен создавать подпора воды в каналах и в дренах.

Осушение открытыми каналами используется для лугов и лесных массивов. На пахотных землях применяют обычно закрытый дренаж. Дрены принимают поток грунтовой воды и передают его в большие закрытые коллекто-

ры, которые сбрасывают воду в открытый канал и далее — в реку. Дрены бывают трубчатые (керамика, полиэтилен), каменные, дощатые, жердевые, хворостяные и др. В открытых и закрытых осушительных системах применяют уклоны соответственно 0,2–0,5 и 1–5 ‰.

Проектирование осушительных систем ведут в две стадии: проектное задание и рабочие чертежи. Эффективность работы дренажа определяется качеством проектных решений, которые зависят от полноты и точности изысканий, особенно топографо-геодезических. Топографические съемки в процессе изысканий выполняют в масштабах:

1. На территории, подлежащей осушению, применяют масштабы 1:500–1:5 000; оптимальный масштаб 1:2 000. При проектировании закрытого дренажа наиболее рациональна съемка с сечением рельефа через 0,5 м. Средняя

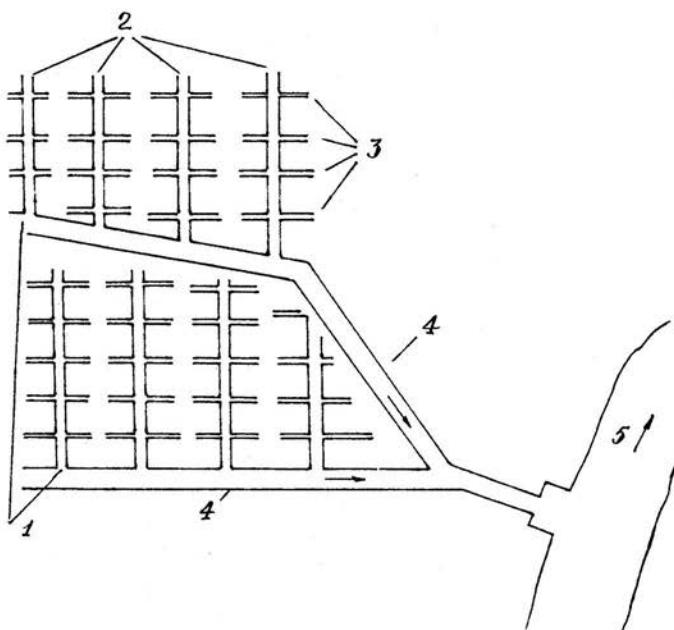


Рис. 48. Схема осушительной сети

1 — коллекторы; 2 — собиратели; 3 — осушители (дрены);  
4 — магистральный канал; 5 — река (водоприемник)

погрешность съемки рельефа относительно ближайших пунктов обоснования не должна превышать 1/4 высоты сечения.

Масштаб съемки 1:5 000 имеет ограниченное применение: только на плоских участках со слабо выраженным рельефом и при сечении горизонталами через 0,5 м. При этом планы съемки следует составлять в масштабе 1:2 000.

2. По району водосборных сооружений применяют масштабы 1:2 000–1:5 000 с сечением рельефа 0,5–1,0 м.

3. Вокруг осушаемой территории съемки ведут в масштабах 1:10 000–1:25 000 с сечением рельефа горизонталами через 1, 2, 5 м.

При съемке болот — сечение через 0,25–0,5 м, а при уклоне местности, большем 2 %, — через 1 м.

Для того, чтобы избежать заиливания канала, скорость воды в нем должна быть не менее 0,2 м/с, а уклоны дна — не менее 0,5 % (0,5 м/км).

Чтобы избежать размыва, уклоны осушителей (дрен) должны быть не более 5 %. Длина осушителей обычно составляет от 400 до 1500 м. Современная тенденция (на уровне мировых стандартов) — проектировать и строить мелиоративную сеть так, чтобы она работала и на осушение, и на увлажнение. Особенно это необходимо при мелиорации торфяников.

## 9. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОРТОВ И ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Портом называется комплекс инженерных сооружений и устройств, которые обеспечивают спокойную стоянку судов и позволяют быстро и удобно производить перегрузки и другие операции.*

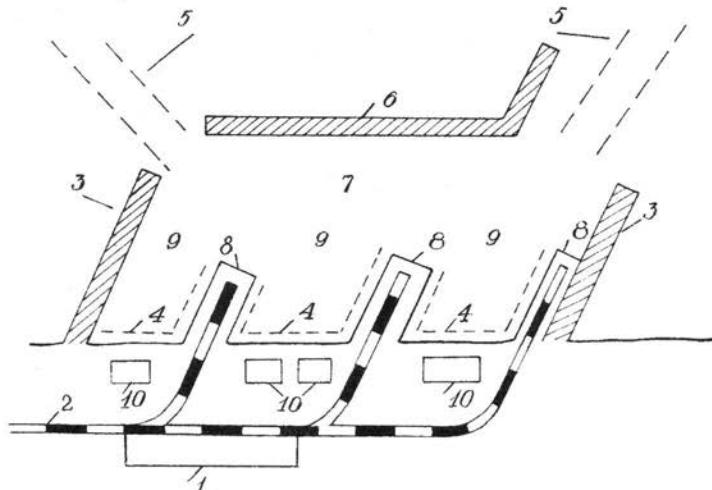
Судоходство — древнейший вид связи между людьми, и до сих пор это наиболее дешевый вид транспортировки.

Морской транспорт на 40–45 % дешевле железнодорожного и в 27 раз — автомобильного. Поэтому в настоящее время судоходство развивается быстрее остальных видов транспорта. Увеличение размеров морских и речных перевозок и изменение состава флота влечет за собой необходимость реконструкции старых портов и строительство новых.

Порт состоит из акватории и территории (рис. 49). К акватории порта относятся водные подходы к нему, рейды и внутренние бассейны (гавани), к которым непосредственно примыкают причальные сооружения — пирсы, портовые набережные и т. д. Водные подходы должны иметь достаточную глубину и размеры для свободного движения судов. Они могут быть естественными и искусственными (каналы по дну акватории).

**Рейд** — участок акватории, который защищен от сильного волнения, где суда могут стоять на якорях в ожидании причалов.

**Пирс** — сооружение, которое выступает в акваторию порта под прямым или острым углом к береговой линии.



**Рис. 49.** Территория порта и акватория

1 — сортировочная станция; 2 — сухопутный подход; 3 — мол; 4 — причал; 5 — подходный канал; 6 — волнолом; 7 — рейд; 8 — пирс; 9 — гавань; 10 — склад

Пирсы служат для размещения причалов и подъездных путей к ним. Ширина пирсов колеблется от 10 до 300 м, а длина достигает 600 м. Длина причалов (участок причальной линии, обслуживающий одно судно) проектируется в зависимости от длины наибольшего судна, которое будет швартоваться у данного причала, с учетом расстояния между судами и изменяется от 100 до 300 м. В составе порта имеется ряд гидротехнических сооружений: оградительные сооружения — молы и волноломы, которые защищают акваторию от действия волнения, судоподъемные устройства (эллинги, слипы, доки) и т. д.

Основными характеристиками порта являются: его глубина, длина причальной линии, отметка портовой территории, площадь акватории, площадь складов и протяженность железнодорожных путей. Глубина порта проектируется в зависимости от осадки принимаемых судов, которая колеблется от 6–9 м (грузопассажирское судно) до 13–15 м (супертанкер). Отметка портовой территории принимается из расчета незатопляемости территории при высоком уровне воды, а также с целью создания благоприятных условий для выполнения грузовых операций. Обычно возвышение кордона (от фр. *corde* — шнур, здесь линия застройки) для бесприливных морей принимается равным 2–3 м над средним горизонтом. Отметку территории речного порта у кордона обычно устанавливают на уровне половодья с расчетной вероятностью превышения уровня от 1 до 10 % в зависимости от категории порта.

Для портов и пристаней, расположенных на водохранилищах, отметка у кордона устанавливается с превышением над НПУ на 2 м. Размеры акватории порта устанавливаются в зависимости от удельной площади на причал, она колеблется от 1 до 20 га. Ширина акватории речных причалов, расположенных вдоль берега (пристань), должна быть не менее утроенной ширины расчетного судна.

Морские порты бывают мировыми, международными, внутренними и местного значения. Порты мирового значения — это, например, Одесса, Петербург, Владивосток.

Морские перевозки в зависимости от назначения делятся на заграничные и каботажные (внутренние).

Проектирование порта производится на основе материалов гидрографических изысканий, которые представляют собой комплекс работ, состоящий из планово-высотного обоснования, съемочных и промерных работ, съемки береговой полосы и нивелирования водной поверхности. Наибольшее внимание уделяется съемке подводного рельефа. Вначале проводятся рекогносцировочные изыскания для общего изучения акватории и прилегающей береговой полосы, затем более подробные гидрографические изыскания для проектирования дноуглубительных работ, гидротехнических сооружений и др.

Для составления рабочих чертежей изыскания выполняют по специальной программе, она характеризуется повышенной подробностью и составлением планов крупного масштаба на отдельные участки.

Съемка местности производится в масштабе 1:10 000–1:2 000, а при сложном рельефе в масштабе 1:1 000–1:500 с сечением рельефа через 0,5–1,0 м. Плановым обоснованием служит триангуляция 3–4-го классов, полигонометрия, сети сгущения. Высотное обоснование — нивелирные сети III–IV класса. Карты глубин акваторий составляют в масштабах 1:2 000–1:500, изобаты проводят через 1,0–0,25 м. Измерение глубин производят галсами с помощью эхолота, плановое положение промерных точек определяют с помощью радиогеодезических систем.

Допуски при строительстве портовых сооружений [1] следующие:

Причальные и берегоукрепительные сооружения, мм . . . . .	± 50
Оградительные сооружения, мм . . . . .	± 250
Направление разбивочных осей для сооружений:	
причальных . . . . .	± 1
оградительных . . . . .	± 2
Высотные отметки, мм:	
линий причала и линий кордона . . . . .	± 3
других линий и фундаментов . . . . .	± 10

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Верёвичев В. В.* Геодезические работы при строительстве гидротехнических сооружений. Киев, 1969. 82 с.
2. *Глотов Г. Ф.* Курс инженерной геодезии. М., 1972. 167 с.
3. *Евченко С. Е.* Определение плановых смещений сооружений методом параллельных створов // Гидротехническое строительство. 1971. С. 45.
4. *Евченко С. Е.* Наблюдение за смещениями сооружений методом пересекающихся створов // Геодезия и картография. 1970. С. 30–31.
5. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. М., 1990. 167 с.
6. *Кметко И. Н., Пандул И. С., Литинский В. О.* Нивелирование способом совмещения с применением шашечных реек // Геодезия и картография. 1979. № 9. С. 25–26.
7. *Кметко И. Н., Пандул И. С., Литинский В. О.* О точности нивелирования способом совмещения с применением шашечных реек // Геодезия и фотограмметрия в горном деле. Свердловск, 1981. С. 17–21.
8. Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей СССР. М., 1991. 104 с.
9. СНиП 3.01.03–84. Геодезические работы в строительстве. М., 1985. 28 с.
10. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. М., 1997. 104 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ВОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1. Общие сведения о гидротехнических сооружениях . . . . .	3
1.2. Значение воды для человечества . . . . .	5
1.3. Реки, их элементы и характеристики . . . . .	6
1.4. Измерение скорости реки и расходов воды в ней . . . . .	13
1.5. Основные положения о схеме использования реки . . . . .	16
1.6. Продольный профиль реки . . . . .	18
1.7. Проектный уровень воды и срезка . . . . .	24
1.8. Однодневная и мгновенная связки уровней воды . . . . .	27
1.9. Точность нивелирования реки . . . . .	30
1.9.1. Допустимые ошибки определения падения водной поверхности . . . . .	30
1.9.2. Точность нивелирных работ . . . . .	31
1.9.3. Точность нивелирования урезов воды . . . . .	33
1.10. Промеры глубин . . . . .	35
1.11. Срезка уровней . . . . .	38
1.12. Поправки в измеренные глубины . . . . .	41
1.13. Масштабы профиля . . . . .	42
<b>2. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ ГЭС . . . . .</b>	<b>43</b>
2.1. Классификация гидротехнических сооружений . . . . .	43
2.2. Основные данные для водно-энергетических расчетов мощности гидроэлектростанции . . . . .	48
2.3. Типы и конструкции плотин . . . . .	53
2.4. Особенности строительных условий ГЭС . . . . .	58
<b>3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ . . . . .</b>	<b>60</b>
3.1. Геодезические работы при проектировании водохранилищ . . . . .	60
3.1.1. Общие сведения . . . . .	60
3.1.2. Характерные уровни и емкости водохранилища . . . . .	61
3.2. Определение площадей затопления и емкостей водохранилища . . . . .	64
3.3. Точность подсчета площадей и объемов водохранилища по топографическим картам . . . . .	66

3.4. Влияние кривой подпора на емкость водохранилища	69
3.5. Высотное обоснование на территории водохранилища .	72
3.6. Определение на местности проектного контура водохранилища . . . . .	73
3.7. Геодезические работы в период эксплуатации водохранилища . . . . .	79
<b>4. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ПЛОЩАДКЕ ГИДРОУЗЛА . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1. Общие сведения . . . . .	79
4.2. Точность и методы создания планового обоснования на гидроузлах . . . . .	82
4.3. Высотное обоснование на площадке гидроузла . . . . .	86
<b>5. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПЕРЕНЕСЕНИИ НА МЕСТНОСТЬ ПРОЕКТА ОСЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ . . . . .</b>	<b>87</b>
5.1. Общие сведения . . . . .	87
5.2. Способы закрепления осей . . . . .	91
5.3. Строительная сетка . . . . .	91
5.4. Детальная разбивка . . . . .	92
гидротехнических сооружений . . . . .	92
5.5. Монтаж строительных конструкций . . . . .	93
и оборудования . . . . .	93
5.6. Исполнительная съемка . . . . .	96
<b>6. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОСАДКАМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ КРУПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ . . . . .</b>	<b>98</b>
6.1. Виды деформаций и их характеристики. Терминология . . . . .	98
6.2. Периодичность наблюдений . . . . .	107
6.3. Расчет требуемой точности геодезических измерений	109
6.4. Точность измерения деформаций . . . . .	111
6.5. Проект размещения марок и реперов . . . . .	112
6.6. Типы реперов . . . . .	113
6.7. Типы контрольных (осадочных) марок . . . . .	115
6.8. Наблюдения за осадками . . . . .	116
6.9. Определение подъема дна котлована . . . . .	119
6.10. Анализ точности нивелирных сетей и выбор схемы измерения осадок . . . . .	119

6.11. Применение высокоточного нивелирования коротким лучом . . . . .	122
6.12. Наблюдения за горизонтальными смещениями сооружений . . . . .	124
6.12.1. Общие сведения . . . . .	124
6.12.2. Периодичность наблюдений . . . . .	126
6.12.3. Геодезические знаки, применяемые при наблюдениях за горизонтальными смещениями . . . . .	126
6.12.4. Приборы, применяемые для контроля за горизонтальными смещениями . . . . .	127
6.12.5. Методы измерений горизонтальных смещений	128
<b>7. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАНАЛОВ . . . . .</b>	<b>136</b>
7.1. Общие сведения . . . . .	136
7.2. Технология геодезических работ . . . . .	138
<b>8. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ . . . . .</b>	<b>142</b>
8.1. Общие сведения . . . . .	142
8.2. Орошение земель . . . . .	143
8.3. Осушение земель . . . . .	145
<b>9. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОРТОВ И ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ . . . . .</b>	<b>147</b>
<b>Библиографический список . . . . .</b>	<b>151</b>



**Пандул Игорь Садукович**

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ  
ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ  
И СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**Подписано в печать 14.01.2012.**

**Электронных текстовых данных 7,38 Мб.**

**Электронный текст подготовлен ОАО «Издательство «Политехника»».**

**191023, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.**

**[www.polytechnics.ru](http://www.polytechnics.ru)**