

ЛЕКЦИЯ 3.1 ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ И СХЕМЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПОРА ГЭС

3.1.1 Назначение гидроэнергетических установок

Гидроэнергетические установки (ГЭУ) предназначены для преобразования механической энергии воды в электрическую или, наоборот, превращения электрической энергии в механическую энергию воды. Они представляют собой предприятия, включающие в себя совокупность гидротехнических сооружений, энергетического и механического оборудования. К ГЭУ в настоящее время относят четыре типа гидроэнергетических станций: гидроэлектрические станции, приливные электростанции, гидроаккумулирующие электростанции и насосные станции.

Важным достоинством ГЭУ является то, что они в сравнении с другими энергетическими установками имеют самый высокий коэффициент полезного действия (КПД) при преобразовании энергии. Для сравнения – тепловые электростанции имеют КПД от 40 до 70 %, ГЭУ – 75-95 %. Кроме того, при выработке электрической энергии ГЭУ используют возобновляемый источник энергии. При этом первоисточником данной энергии является солнце, благодаря которому на Земле осуществляется круговорот воды в природе.

В последнее время с помощью ГЭУ производится приблизительно 23 % общемирового объема электроэнергии. В то же время этот объем составляет только лишь около 16 % от экономически выгодной к использованию части всех гидроэнергетических ресурсов. Среди ГЭУ наиболее распространенными и мощными являются гидроэлектрические станции.

3.1.2 Типы гидроэнергетических установок

Гидроэлектрические станции (ГЭС) – это ГЭУ, которые преобразуют в электрическую энергию механическую энергию водного потока реки. Основными сооружениями ГЭС (рис. 3.1) являются плотина, перегораживающая реку и создающая подъем уровня воды, и здание станции, в котором размещаются основное (гидротурбины, генераторы электрического тока) и вспомогательное оборудование. Вода под действием силы тяжести движется через гидротурбины и вращает их рабочие колеса. С валами рабо-

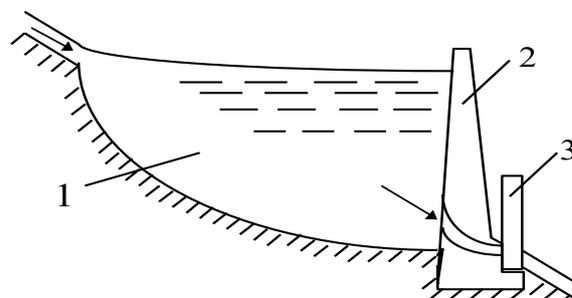


Рис. 3.1. Плотинная схема ГЭС:
1 - водохранилище; 2 - плотина; 3 - здание ГЭС

чих колес жестко скреплены роторы генераторов электрического тока. При вращении роторов генераторы преобразуют механическую энергию водного потока в электрическую, которая затем передается в нагрузку. Гидротурбина вместе с соединенным с ней генератором образует *гидроагрегат*. Высокий КПД ГЭС (~ 90 %) обусловлен тем, что электроэнергия преобразуется из механической энергии непосредственно.

Для тепловых станций в технологической цепочке преобразования внутренней энергии топлива в электрическую имеются промежуточные ступени преобразования энергии, связанные с выработкой пара, что, естественно, ведет к снижению КПД станции.

Приливные электростанции (ПЭС) – это ГЭУ, которые преобразуют в электроэнергию механическую энергию приливных колебаний уровня моря. Обычно такие колебания происходят два раза в сутки. В некоторых местах морских побережий амплитуда приливных колебаний достигает величины 8–19 м.

ПЭС (рис. 3.2) удобно строить, если на побережье имеется достаточных размеров залив, соединенный с морем нешироким проливом. Этот пролив перегораживают плотиной и сооружают при ней ПЭС. Когда наступает прилив или отлив, между морем и заливом образуется перепад уровней воды. Гидроагрегаты ПЭС работают и при движении воды из моря в отгороженный плотиной бассейн, и при движении воды из бассейна в море. В настоящее время ПЭС не получили широкого распространения из-за их дороговизны и малого количества удобных для строительства заливов.

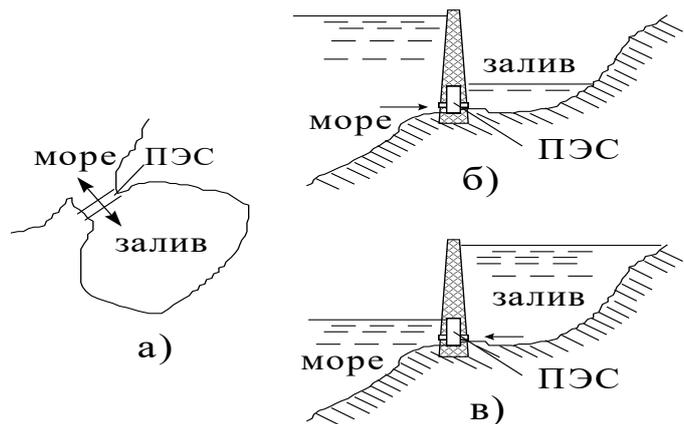


Рис. 3.2. Схема ПЭС:

а - план; б - цикл прилива; в - цикл отлива

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) – это ГЭУ, на которых перекачивают воду из нижнего бассейна в высоко расположенный верхний бассейн с последующим использованием потенциальной энергии этой воды для выработки электроэнергии. Схема ГАЭС, поясняющая принцип работы, представлена на рис. 3.3. ГАЭС в ночные часы суток за счет электроэнергии, получаемой из энергосистемы, перекачивает насосами воду из нижнего бассейна в верхний (цикл заряда). Днём и особенно вечером, когда электропотребление в системе увеличивается, вода из верхнего бассейна пропускается

через турбины в нижний бассейн (цикл разряда). При этом ГАЭС вырабатывает и отдает электроэнергию в систему. Таким образом, функционально ГАЭС выполняет в энергосистеме роль аккумулятора огромной емкости, запасящего и хранящего энергию в виде потенциальной механической энергии воды. Вследствие неизбежных потерь энергии в процессе ее преобразования ГАЭС отдает в систему 70-75 % электрической энергии, получаемой ею из системы. Тем не менее, эти станции выгодны, поскольку аккумулируют более дешевую, а иногда и "бросовую" электроэнергию в ночные часы, в период малой нагрузки системы, а отдают более дорогую энергию в часы "пик" нагрузки. ГАЭС существенно улучшают технические условия работы тепловых и атомных электростанций и позволяют снизить их удельный расход топлива на выработку 1кВт·ч электроэнергии. ГАЭС обычно строят около мощных тепловых и атомных электростанций.

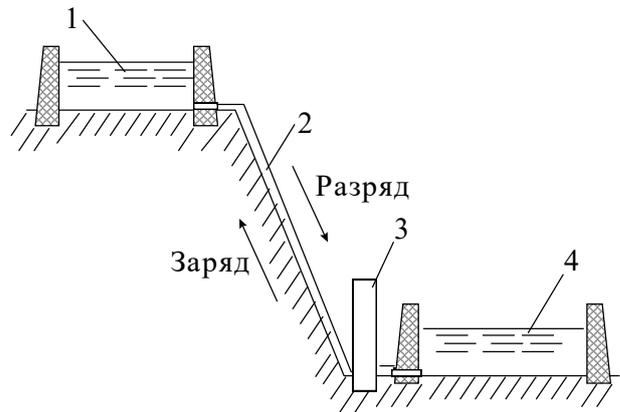


Рис. 3.3. Схема ГАЭС:

1 - верхний бассейн; 2 - напорный трубопровод; 3 - здание ГАЭС; 4 - нижний бассейн

Насосные станции (НС) – это ГЭУ, которые предназначены для перекачки воды с низких отметок на высокие и для перемещения воды в удаленные пункты. На НС устанавливаются насосные агрегаты, у которых на одном валу находится насос и электрический двигатель. НС является потребителем электрической энергии.

НС имеют большое распространение. Они применяются для коммунально-бытового и промышленного водоснабжения, для водоснабжения тепловых электростанций, в ирригационных системах для подачи воды на поля, расположенные на высоких отметках или в удаленных районах, на судоходных каналах, пересекающих высокие водоразделы, и т. д.

3.1.3 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

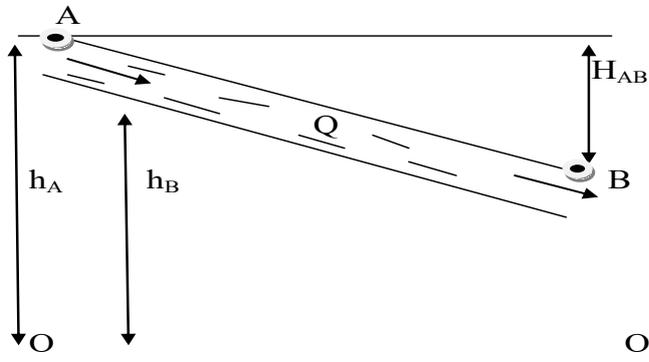
Полная механическая энергия воды, т.е. сумма ее потенциальной и кинетической энергий, называется *гидравлической энергией*. Гидравлическая энергия водных ресурсов, выраженная в киловаттах среднегодовой мощности или киловатт-часах энергии, определяет запасы *гидроэнергетических ресур-*

сов. Водные и гидроэнергетические ресурсы являются фундаментом всей гидроэнергетики.

Гидроэнергетика широко использует положения гидравлики, изучающей законы равновесия и механического движения жидкости. Приведем в этой главе основные положения гидравлики и на их основе рассмотрим методику практического подсчета гидроэнергетических ресурсов рек.

3.1.4. Гидроэнергетические ресурсы

Предположим, что поток имеет постоянное по длине русла сечение и скорость течения воды. Для определения энергии водного потока рассмотрим его участок АВ.



Уравнение Бернулли, которое определяет удельную энергию потока:

$$e = z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

e – удельная энергия, $\frac{Дж}{Н}$

z – геометрическая высота точки сечения над уровнем моря (плоскость OO' на рис.).

p – давление в точки сечения потока

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$

α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению (1,03÷1,1).

Сумма $z + \frac{p}{\rho g} = h$ – определяет запас удельной потенциальной энергии в данном сечении. Таким образом, удельную потенциальную энергию потока можно определить высотой отметки т. А над поверхностью OO' и т. В над поверхностью OO' (уровнем h_A и h_B соответственно).

Слагаемое $\alpha \frac{v^2}{2g}$ определяет удельную кинетическую (скоростную) энергию. Уравнение Бернулли (1) характеризует запас всей удельной энергии e в данном сечении. Согласно запасу сохранения энергии в потоке жидкости

энергия e_{AB} , выделившаяся при движении на участке AB равна разности энергии потока в сечении A и B

$$e_{AB} = e_A - e_B$$

Принимая $v_A = v_B$ разностью кинетических энергий можно пренебречь

$$\frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{2g} - \frac{\rho \cdot B \cdot v^2}{2g} = 0$$

Тогда энергия водного потока на участке AB составит:

$$e_{AB} = h_A - h_B = H_{AB}$$

где H_{AB} – перепад уровней свободной поверхности на участке A .

При определении полной энергии потока необходимо учесть водность потока, определяемую расходом воды Q м³/с. Предположим, что в течении времени t через участок AB проходит объем воды Qt [(м³/с)*с], вес которого составит $Qt\rho g$.

Тогда полная энергия, выделившаяся на участке AB равна: $\mathcal{E}_{AB} = H_{AB} \cdot Qt\rho g$

Определим мощность потока N_{AB} , т.е. энергию выделяющуюся за 1 с:

$$N_{AB} = \mathcal{E}_{AB}/t = H_{AB} \cdot Qt\rho g \quad \left[\frac{\text{м} \cdot \text{Н}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right]$$

Если принять значения ускорения свободного падения $g = 9,81$ м/с² и плотности $\rho = 1000$ кг/м³, получим

$$N_{AB} = 9,81 Q H_{AB}$$

Если измерять время в часах, тогда полная энергия

$$\mathcal{E}_{AB} = 9,81 QHT \quad (\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

Из полученных формул видно, что мощность ГЭС зависит от расхода воды и напора, создаваемого перепадом высот в т. A и B .

Пример: составить расходы двух ГЭС, имеющих примерно одинаковую мощностью. Нижнекамский ГЭС мощностью 1248 МВт при напоре 12,4 м и Токтогульской ГЭС мощностью 1200 МВт при напоре 140 м.

$$\text{Расход Нижнекамской ГЭС, м}^3/\text{с } Q = \frac{1248000}{9,81 \cdot 12,4} = 10259$$

$$\text{Расход Токтогульской ГЭС, м}^3/\text{с } Q = \frac{1200000}{9,81 \cdot 140} = 873$$

Пример показывает ценных горных рек, позволяющих получать большую мощность при отсутствии большой водности.

3.1.5 Гидроэнергетические ресурсы речного стока

Гидроэлектростанция является промышленным предприятием по производству электроэнергии. Сырьем в данном производстве являются гидроэнергетические ресурсы реки, которые обычно характеризуются гидравлической энергией и мощностью водотока.

Механическая энергия воды, текущей под действием силы тяжести в русле реки в направлении с более высокой на более низкую геодезическую отметку, может быть преобразована ГЭС в другие виды энергии. Максимально возможная величина механической энергии воды какого-либо участка реки, которая может быть преобразована за некоторое время t в другие виды энергии на этом участке, называется *гидравлической энергией данного участка реки*. Максимальная скорость, с которой указанное преобразование гидравлической энергии может осуществляться, называется *мощностью водотока данного участка реки*.

Рассмотрим участок реки между живыми сечениями 1 и 2 (см. рис. 3.2). Поскольку у потока со свободной поверхностью сумма геометрической и пьезометрической высот (т.е. гидростатический напор) для любой точки сечения есть величина постоянная, высоту и давление в потоке будем характеризовать уровнем над плоскостью сравнения и давлением свободной поверхности воды. Механическая энергия воды, протекающей через сечение 1 за время t , равна

$$\mathcal{E}_1 = m_1 g H_{g1} = \rho \omega_1 v_1 t g H_{g1} = \rho g Q_1 H_{g1} t. \quad (2)$$

Аналогично механическая энергия воды, протекающей через сечение 2 за то же время t , равна

$$\mathcal{E}_2 = m_2 g H_{g2} = \rho \omega_2 v_2 t g H_{g2} = \rho g Q_2 H_{g2} t. \quad (3)$$

Здесь m_1 и m_2 - массы воды, протекающей соответственно через сечения 1 и 2 за время t . Таким образом, в участок реки 1-2 через сечение 1 за время t вносится энергия \mathcal{E}_1 , а выносится через сечение 2 за то же время энергия \mathcal{E}_2 . При $\mathcal{E}_1 \neq \mathcal{E}_2$ на участке реки происходит потеря энергии или ее накопление в количестве, равном разности энергий \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 (\mathcal{E}_{1-2}). Если на рассматриваемом участке нет каких-либо дополнительных притоков или потерь воды, то с учетом условия неразрывности потока за время t через сечение 2 пройдет такое же количество воды, как и через сечение 1, а $Q_1 = Q_2 = Q$. При этом максимальная величина разности \mathcal{E}_{1-2} характеризует величину энергии, которую рассматриваемый участок способен отдать за время t , то есть гидравлическую энергию данного участка реки.

Найдем разность \mathcal{E}_{1-2} :

$$\mathcal{E}_{1-2} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho g Q (H_{g1} - H_{g2}) t = \rho g Q H_{1-2} t, \quad (4)$$

где $H_{1-2} = H_{g1} - H_{g2}$ - потеря гидродинамического напора на участке реки 1-2. Учитывая, что плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, а $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, получим величину энергии \mathcal{E}_{1-2} за время t , с, в джоулях:

$$\mathcal{E}_{1-2} = 9810 \cdot Q H_{1-2} t. \quad (5)$$

Поскольку в электроэнергетике принято энергию выражать в киловатт-часах (кВт·ч), то

$$\mathcal{E}_{1-2} = 9,81 \cdot Q H_{1-2} t / 3600 = W H_{1-2} / 367 = 0,00272 W H_{1-2}. \quad (6)$$

Мощность потерь энергии водотока N_{1-2} , кВт, при этом определяется как:

$$N_{1-2} = \frac{d\mathcal{E}_{1-2}}{dt} = 9,81 \cdot Q \cdot H_{1-2}. \quad (7)$$

Найдем теперь максимально возможные значения \mathcal{E}_{1-2} и N_{1-2} . Расход Q обуславливается возможностями речного стока и в пределах участка 1-2 постоянен. Поэтому максимальные значения \mathcal{E}_{1-2} и N_{1-2} достигаются при максимуме H_{1-2} . Проанализируем выражение для H_{1-2} :

$$H_{1-2} = H_{g1} - H_{g2} = (z_1 - z_2) + (p_1 - p_2) / \rho g + (v_1^2 - v_2^2) / 2g. \quad (8)$$

Величина первого слагаемого определяется рельефом местности. Для участков протяженностью около 100 км его значение имеет порядок от единиц до десятков метров. Второе и третье слагаемое выражения достигают максимума при $p_2 = 0$ и $v_2 = 0$. В то же время для открытых речных водотоков давления p_1 и p_2 приблизительно равны и равны атмосферному давлению. Поэтому второе слагаемое с большой точностью равно нулю. Скоростной напор $v_1^2 / 2g$ для характерной скорости потока воды $v_1 \approx 1 \text{ м/с}$ имеет величину приблизительно 5 см и на практике обычно значительно меньше величины первого слагаемого. В связи с этим для практических расчетов принимается, что максимальная величина H_{1-2} протяженных участков реки равна

$$H_{1-2} \cong z_1 - z_2. \quad (9)$$

Обычно значение H_{1-2} , полученное из (9), называют *геометрическим напором* участка реки 1-2. Таким образом, выражения (6) и (7) с учетом (9) определяют гидравлическую энергию и мощность водотока участка реки.

Следует заметить, что для свободнопоточных микро ГЭС, интерес к которым в последние годы возрастает, основной вклад в напор H_{1-2} в (8) дает третье слагаемое, поскольку из-за отсутствия плотины $z_1 \cong z_2$. В связи с этим при проектировании их конструкции стремятся максимально сконцентрировать скоростной напор водного потока на рабочем колесе установки.

Мощность водотока, вычисленная по формуле (7), не полностью превращается на ГЭС в полезную электрическую мощность, поскольку при преобразовании энергии неизбежны потери (потери в водоприемнике, водоводах, турбине, генераторе). Суммарное значение КПД ГЭС η меньше 1. С учетом сказанного полезная электрическая мощность ГЭС $N_{\text{ГЭС}}$, кВт, и выработка ею электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{ГЭС}}$, кВт·ч, за период работы T определяются выражениями:

$$N_{\text{ГЭС}} = 9,81 \cdot \eta \cdot Q_{\text{ГЭС}} \cdot H_{\text{ГЭС}}, \quad (10)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} = N_{\text{ГЭС}} \cdot T = 9,81 \cdot \eta \cdot Q_{\text{ГЭС}} \cdot H_{\text{ГЭС}} \cdot T, \quad (11)$$

где $H_{\text{ГЭС}}$ - разность уровней воды в метрах перед и за плотиной (напор на ГЭС); период времени T измеряется в часах.

В естественных условиях полная энергия водного потока реки уменьшается вдоль русла, в основном, вследствие работы сил внутреннего трения между частицами воды и работы сил трения между потоком и руслом и, таким образом, расходуется на поддержание экологического состояния реки.

При рассмотрении вопроса о гидроэнергетических ресурсах различают следующие понятия:

1) валовой теоретический (брутто) гидроэнергетический потенциал, или потенциальные гидроэнергетические ресурсы, рассматривается в двух видах:

гидроэнергетический потенциал поверхностного стока, учитывающий полную сумму механической энергии всех стекающих вод на территории данного района, страны или отдельного речного бассейна;

гидроэнергетический потенциал речного стока, учитывающий полную теоретическую сумму энергии только речного стока;

2) технический гидроэнергетический потенциал, или технически возможные к использованию гидроэнергетические ресурсы, - это та часть валового теоретического гидроресурса речного стока, которая по состоянию современного технического уровня развития гидроэнергетического строительства может быть использована или уже используется (ориентировочно в настоящее время он составляет 24-52 % от теоретического потенциала);

3) экономически эффективная часть гидроэнергетических ресурсов, или экономические гидроэнергетические ресурсы, - это та часть гидроэнергетических ресурсов, использование которой является экономически оправданным.

Данные о гидроэнергетическом потенциале речного стока являются отправными при анализе экономической эффективности его использования.

На практике гидроэнергетические ресурсы обычно характеризуются двумя параметрами: суммарной мощностью стока и суммарным годовым запасом гидроэнергии. Для речных стоков потенциальные гидроэнергоресурсы оцениваются по приведенной ниже методике.

Для водотоков длиной более 100 км широко используется метод "линейного учета", который заключается в том, что река делится на ряд участков и для каждого участка отдельно определяется мощность N , кВт, по формуле

$$N = 9,81 \cdot \frac{Q_H + Q_K}{2} \cdot H, \quad (12)$$

где Q_H и Q_K - расходы воды в реке соответственно в начале и в конце участка, м³/с; H - падение реки (геометрический напор) на данном участке, м. Потенциальные запасы гидроэнергии участка реки \mathcal{E} , кВт·ч, определяются исходя из 8760 час (365 суток) использования потенциальной энергии по формуле

$$\mathcal{E} = N \cdot t = 9,81 \cdot \frac{Q_H + Q_K}{2} \cdot H \cdot 8760 \approx 85900 \cdot \frac{Q_H + Q_K}{2} \cdot H. \quad (13)$$

Исчисление проводится по реке, без притоков, путем суммирования показателей гидроэнергетических ресурсов по отдельным участкам - от истока и до устья, а гидроэнергоресурсы притоков подсчитываются таким же образом отдельно. Все подсчеты обычно выполняются для среднесного значения стока реки. При водохозяйственном проектировании гидроузлов дополнительно проводятся расчеты для маловодных и многоводных лет, а также для лет с обеспеченностью стока в 50 и 95 % и такой же обеспеченностью годовой выработки электроэнергии.

Для подсчетов потенциальных гидроэнергетических ресурсов реки методом линейного учета существенное значение имеет правильное разделение реки на расчетные участки. Разделение на участки осуществляется с учетом уклонов реки, створов впадения ее крупных притоков и соответствующего увеличения стока, а также в зависимости от наиболее выгодных створов по

топографическим, геологическим и технико-экономическим условиям. Число участков должно быть достаточным, чтобы выполненные подсчеты дали возможно более точное значение суммарной мощности для всей реки. Вместе с тем в целях избежания излишнего дробления реки на участки и уменьшения числа расчетов следует назначать опорные точки, определяющие собой границы участков, в основном, сообразуясь с нарастанием расходов воды по высоте падения реки и наличием гидрологической информации. Особенно большое значение имеет правильное разделение на участки рек, верховья которых характеризуются значительными падениями, но малыми расходами воды. Для этих рек следует точнее назначать границы верхних участков, что гарантирует подсчеты от преувеличения суммарной мощности рек. Число расчетных участков назначается в зависимости от протяженности и особенностей продольного профиля реки. Для крупных рек в целях более подробного освещения распределения потенциальных запасов гидроэнергии по длине реки число расчетных участков принимается примерно 15-20 и более, для небольших рек - 4-8 и для самых малых рек - 2-4.

Для водотоков длиной менее 100 км суммарные мощность N , кВт, и энергия \mathcal{E} , кВт·ч, могут быть вычислены упрощенным способом по формулам:

$$N = \alpha \cdot 9,81 \cdot Q_y \cdot H_y, \quad (14)$$

$$\mathcal{E} = \alpha \cdot 85900 \cdot Q_y \cdot H_y, \quad (15)$$

где Q_y - расход в устье реки, м³/с; H_y - падение реки от истока до устья, м; α - коэффициент, равный 0,4 .

В подсчетах величины гидроэнергетических ресурсов исключительно большое значение имеют исходные данные: а) картографические - для определения длины, площади водосбора и падения реки, б) гидрологические - для определения среднегодовых значений расходов реки на всем ее протяжении.