

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО

О. Г. Никонова, В.Г. Саликов

ГИДРОМЕТРИЯ

**Организация измерения расходов воды в натуральных условиях и
построение кривой $Q = f(H)$**

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург
2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. УСТРОЙСТВО ВОДОМЕРНОГО ПОСТА.....	5
2. СИСТЕМА ОТМЕТОК И ОТСЧЕТОВ НА ВОДОМЕРНОМ ПОСТУ	5
3. УСТРОЙСТВО ГИДРОМЕТРИЧЕСКОГО СТВОРА.....	6
4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ И ИХ АНАЛИЗ.....	8
5. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ РАСХОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОЗНАЧНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РАСХОДОМ И УРОВНЕМ И ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОКА ВОДЫ.....	11
6. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ	12
7. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ ДЛЯ ПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ	14
8. ПОДБОР АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ $Q=f(H)$	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	23
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	25

ВВЕДЕНИЕ

Важность гидрологических данных при проектировании и строительстве сооружений на водных объектах. Сооружения, проектируемые на реках, рассчитываются на расходы и уровни воды той или иной обеспеченности (вероятности их превышения, выраженной в процентах). Для определения этих характеристик необходимо иметь ряд наблюдений за расходами и уровнями воды в районе проектируемых сооружений.

При проектировании мостовых переходов в зависимости от категории сооружения расчетные уровни и расходы воды преимущественно принимаются равными 1% или 0,33% обеспеченности. Расчетный уровень воды определяет высоту сооружения, а расход воды – величину отверстия моста и, следовательно, скорость течения и величину общего и местного размыва, от которых зависит глубина заложения фундамента мостовых опор.

При проектировании дамб обвалования для защиты объектов народного хозяйства от затопления необходимо знать максимальные уровни и расходы воды для определения высоты сооружения и расчета берегоукрепления на устойчивость от размыва.

При заборе воды из рек в зависимости от категории надежности насосных станций обеспеченность расчетного минимального уровня воды должна составлять от 90% до 97%.

Речные гидротехнические сооружения в зависимости от их класса и условий эксплуатации проектируются на расходы воды малой обеспеченности: от 5% до 0,01%.

Расчетные гидрологические характеристики регламентируются строительными нормами и правилами, сводами правил, а также ведомственными нормативными документами.

Для изучения водного режима на реках существует постоянная государственная гидрологическая сеть, находящаяся в системе гидрометеорологической службы Росгидромета и состоящая из станций и постов. При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений возможна организация ведомственной сети станций и постов. Ведомственные гидрологические посты устраиваются в местах проектируемых сооружений, а для удовлетворения запросов водного транспорта - на перекатах или в наиболее опасных для судоходства участках реки.

Авторы выражают благодарность магистранту кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» Усольцевой Марине Сергеевне за техническую помощь при подготовке пособия.

1. УСТРОЙСТВО ВОДОМЕРНОГО ПОСТА

Для наблюдений над уровнем воды гидрологический пост оборудуется водомерными устройствами (водомерный пост в/п).

Водомерным постом или водпостом (в/п), называется специальное устройство, позволяющее систематически измерять высоту уровня воды. Каждый водомерный пост состоит из непосредственных установок для измерения высоты уровня (рейки, сваи, самопишущие приборы и др.) и постоянных знаков – реперов, служащих для определения высотного положения всех водомерных устройств поста (нуля реек, головок свай).

По способу устройства различают водпосты:

- простые (речной, свайный, речно-свайный и передаточный);
- автоматические.

Речной водомерный пост может быть установлен у гидротехнического сооружения, на одиночной свае или на кусте свай.

При наличии на участке реки мостов, набережных, плотин рейка укрепляется на устое моста, на стенке набережной или плотины.

Свайные водомерные посты устраиваются на участках рек с пологими берегами и значительной амплитудой колебаний уровня воды. Свайный пост состоит из нескольких свай, установленных в одном створе, перпендикулярном к течению реки.

2. СИСТЕМА ОТМЕТОК И ОТСЧЕТОВ НА ВОДОМЕРНОМ ПОСТУ

Все постовые устройства (нули реек, головки свай) нивелированием связываются с основным репером и получают отметки в той системе высот, которая принята для этого репера.

Высоты реперов водомерных постов выражаются в следующих системах:

- Балтийской системе (БС), т.е. от нуля Кронштадтского футштока;
- абсолютной системе (абс) – отметка репера водомерного поста получена от репера государственной геодезической сети (ГГС), но без пересчета в Балтийскую систему;
- условной системе (усл) – отметка репера водомерного поста не увязана с отметками реперов государственной геодезической сети.

Плоскость, от которой производится отсчёт уровня воды, называется **нулём наблюдений**. На речном посту нулём наблюдений служит нуль рейки, а на свайном – головка сваи.

Все наблюдаемые значения высоты уровня воды приводятся к одной горизонтальной плоскости, называемой *нулём графика* поста. Чтобы не было отрицательных значений уровня воды, отметка нуля графика назначается приблизительно на 0,5м ниже самого низкого уровня.

Для приведения отсчетов высоты уровня к нулю графика нужно для всех нулей наблюдений вычислять приводки. *Приводкой* называется превышение головки сваи или нуля рейки над нулём графика. Высота уровня воды над нулём графика равна сумме отсчета по рейке над нулем наблюдений и приводки.

Для нужд водного транспорта все отсчеты уровня воды приводятся не к нулю графика, а к навигационному нулю. За *навигационный нуль* принимается отметка низшего уровня, при котором еще возможно судоходство.

3. УСТРОЙСТВО ГИДРОМЕТРИЧЕСКОГО СТВОРА

Для измерения расходов воды, наносов и других элементов гидрологического режима на участке водомерного поста устраивается гидрометрический створ (Г/С), представляющий собой закрепленный на местности поперечник через реку.

Гидрометрический створ обычно совмещается со створом водомерного поста или назначается в непосредственной близости от него. На участке водомерного поста, как правило, должен находиться один гидрометрический створ, но в некоторых случаях для удобства измерений допускается устройство нескольких створов. Например, один створ служит для измерения расходов при высоких уровнях, а второй – при низких, или в одном створе измеряются расходы воды при ледоставе, а в другом – при открытом русле. В этих случаях гидрометрические створы должны находиться на таком расстоянии друг от друга, чтобы между ними не было потерь или увеличения стока воды. Если на участке водомерного поста имеются протоки, рукава, то гидрометрические створы устраиваются как в основном русле, так и во всех его разветвлениях.

Если гидрометрический створ не совпадает со створом водомерного поста и расположен на значительном расстоянии от него, то на гидрометрическом створе устраивается дополнительный водомерный пост, на котором ведутся наблюдения над уровнем воды во время измерения расхода.

В состав работ по устройству гидрометрического створа входит:

- 1) выбор участка,
- 2) топографическая съемка участка,

- 3) разбивка и закрепление створа,
- 4) оборудование створа.

Работы по выбору участка реки для устройства гидрометрического створа и по производству съемки этого участка выполняются обычно во время организации водомерного поста.

3.1 Разбивка гидрометрического створа

Чтобы получить значение расхода воды, близкого к действительному, направление гидрометрического створа должно быть перпендикулярным к среднему направлению течения. Направление гидрометрического створа выбирается в зависимости от ширины реки и требуемой точности измерений расходов воды различными способами.

В экспедиционных условиях на прямолинейных участках нешироких рек направление створа может быть назначено на глаз перпендикулярно к общему направлению течения реки, ориентируясь на очертание берегов.

Для систематических измерений расходов воды направление гидрометрического створа назначается после определения направления течения поверхностными поплавками, измерителем течения или морской вертушкой.

При наличии на участке водомерного поста поймы, рукавов, протоков направления течения в них и в основном русле могут не совпадать. Если средние направления течения различаются менее чем на 10° , то назначается один гидрометрический створ, перпендикулярный направлению течения в основном русле. Если же средние направления различаются более чем на 10° , гидрометрический створ разбивается в виде ломаной линии, участки которой перпендикулярны к направлению течения пересекаемых ими русла и поймы.

3.2 Закрепление гидрометрического створа

Определив направление гидрометрического створа, переносят его известными из курса «Геодезии» способами на местность и закрепляют прочными столбами-реперами. На малых реках устанавливается по одному реперу на обоих берегах, а на больших реках – по два репера со створными вехами на обоих или на одном берегу в зависимости от рельефа берегов и видимости. Один из реперов служит постоянным началом, от которого определяются расстояния до промерных и скоростных вертикалей. Полоса берега на 5-10 м выше и ниже гидрометрического створа, в пределах возможного затопления, расчищается от луговой и кустарниковой растительности. По линии гидрометрического

створа разбивается пикетаж и производится нивелирование берегов до незатопляемых отметок, а в русле, старицах и действующих протоках измеряются глубины. По данным промеров и нивелирования берегов строится профиль поперечного сечения по гидрометрическому створу, на котором показывается расположение скоростных вертикалей, характер грунта дна и угодий на пойме.

3.3 Оборудование гидрометрического створа

Для определения расходов воды и производства других измерений гидрометрический створ оборудуется устройствами, позволяющими производить работы на скоростных и промерных вертикалях. В зависимости от ширины реки, глубины и скоростей течения такими устройствами могут быть:

- 1) гидрометрические мостики (балочные и подвесные),
- 2) подвесные люльки,
- 3) лодки,
- 4) паромы (понтон) и завозни,
- 5) дистанционные установки.

В зимний период, когда река покрывается ледяным покровом, все работы проводятся непосредственно со льда.

3.4 Назначение скоростных вертикалей

Для измерения расхода воды вертушкой в гидрометрическом створе назначаются скоростные вертикали, в отдельных точках которых измеряются скорости течения. Размещение вертикалей по ширине реки производится на поперечном профиле гидрометрического створа. Число скоростных вертикалей зависит от способа измерения расхода воды, ширины реки и рельефа дна.

4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ И ИХ АНАЛИЗ

При изменении расходов воды, протекающей через живое сечение реки, изменяется и высота уровня. При устойчивом незаросшем русле и при отсутствии переменного подпора между расходами и уровнями существует однозначная зависимость, т.е. определенному значению уровня соответствует только одно значение расхода воды. Поэтому, имея ряд расходов воды, измеренных при различных уровнях, можно установить

зависимость между этими элементами. Связь между расходами воды и уровнями обычно устанавливается графически в виде кривой расходов воды $Q=f(H)$.

В ряде случаев однозначная зависимость между расходами воды и уровнем нарушается. Отсутствие однозначной связи между расходом и уровнем может обуславливаться следующими причинами:

- прохождением паводочных волн, когда резко изменяются уклоны на подъеме и спаде уровня;
- неустойчивостью русла, когда вследствие намывов и размывов одному и тому же расходу могут соответствовать различные уровни воды;
- развитием ледовых явлений, вызывающих стеснение живого сечения потока и увеличение шероховатости русла;
- зарастанием русла;
- наличием переменного подпора, когда режим расходов и уровней зависит не только от изменения водности, но и от действия источника переменного подпора;
- выходом воды на пойму, когда на подъеме уровня воды пойма заполняется, а на спаде - опорожняется. При заполнении поймы происходит уменьшение расхода воды, а при опорожнении – увеличение.

Разброс точек измеренных расходов может вызываться не только объективными причинами, но и погрешностями измерений и вычислений. В каждом конкретном случае установлению связи между расходами воды и уровнями должна предшествовать тщательная проверка и анализ материалов наблюдений.

Для построения зависимости $Q=f(H)$ необходимы:

- 1) таблица «Измеренные расходы воды» (ИРВ);
- 2) таблица «Ежедневные уровни воды» (ЕУВ);
- 3) совмещенные профили поперечных сечений по гидрометрическому створу;
- 4) поперечный профиль по гидроствору до уровня высоких вод;
- 5) техническое дело поста;
- 6) литературные и архивные материалы, характеризующие режим реки на участке гидрометрического створа.

В процессе анализа таблицы ИРВ важно выяснить, учитывался ли при измерении полный расход воды, или только часть его (без расходов в пойме и протоках). Для этого по поперечному профилю гидрометрического створа определяется отметка уровня воды, при которой начинает затапливаться пойма и действовать протоки и рукава.

Так как для каждого расхода воды имеет место равенство $Q=F \cdot V_{cp}$, то оказывается удобным дальнейший анализ измеренных расходов производить графическим путем. С этой целью строят три кривые: кривую расходов воды $Q=f(H)$, кривую площадей поперечных сечений $F=f(H)$ и кривую средних скоростей $V_{cp}=f(H)$. При построении кривых по вертикальной оси откладываются уровни для всех трех элементов в одном масштабе, а по горизонтальной оси - расход воды, площадь поперечного сечения и средняя скорость. Посредине полосы нанесенных точек (Q, H) , (F, H) , (V_{cp}, H) проводятся плавные кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $V_{cp} = f(H)$.

Свойства кривых $Q=f(H)$, $F=f(H)$, и $V_{cp}=f(H)$. Зависимость $Q=f(H)$ при однозначной связи между расходом воды и уровнем имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной к оси уровней. Наибольшая кривизна обычно наблюдается при средних уровнях. Пологость кривой в верхней части зависит от крутизны и шероховатости склонов берегов. Если крутизна склонов уменьшается, то кривая делается более пологой, увеличение шероховатости склонов, наоборот, уменьшает пологость кривой.

Зависимость $F=f(H)$ при правильной форме русла имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной также к оси уровней; в местах резкого изменения профиля направление кривой площади меняется. При прямоугольной форме русла кривая $F=f(H)$ превращается в прямую линию. Если расходы воды измерялись в нескольких гидрометрических створах, то на чертеже может быть несколько кривых $F=f(H)$.

Зависимость $V_{cp}=f(H)$ менее определенная, так как на величину скорости оказывает влияние шероховатость русла, продольный уклон водной поверхности и гидравлический радиус. Лишь для устойчивых незаросших русел при отсутствии переменного подпора зависимость $V_{cp}=f(H)$ имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной к горизонтальной оси. При резком увеличении шероховатости, что особенно ярко проявляется при выходе воды на пойму, средние скорости уменьшаются и направление кривой $V_{cp}=f(H)$ может меняться на обратное. При дальнейшем повышении уровня воды влияние шероховатости будет уменьшаться, и значение средней скорости будет постепенно возрастать.

Точки расходов и средних скоростей, измеренные при одном и том же уровне, на подъеме ложатся правее, а на спаде левее. Точки измерений на гребне паводка ложатся между ними, а относящиеся к периоду межени – в пределах одной узкой полосы. Кривые $Q=f(H)$ и $V_{cp}=f(H)$ в верхней части образуют петлю, называемую паводочной петлей, правая ветвь которой соответствует подъему уровня, а левая – спаду; в период межени обе ветви сливаются в одну. Такое расположение точек расходов и средних скоростей

свойственно большим равнинным рекам и особенно бесприточным участкам большой протяженности.

В результате анализа расположения точек (Q, H), (F, H) и (V_{cp}, H) и других материалов наблюдений выясняются особенности режима реки и выбираются способы вычисления стока воды при:

- 1) однозначной связи между расходом и уровнем,
- 2) неустановившемся режиме (паводочные петли),
- 3) ледовом режиме,
- 4) зарастании русла,
- 5) неустойчивом русле,
- 6) переменном подпоре,
- 7) выходе воды на пойму.

5. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ РАСХОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОЗНАЧНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РАСХОДОМ И УРОВНЕМ И ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОКА ВОДЫ

Кривая расходов воды $Q=f(H)$ строится в прямоугольной системе координат совместно с кривыми $F=f(H)$ и $V_{cp}=f(H)$. Масштабы для построения кривых подбираются в зависимости от амплитуды уровней, расходов, площадей и скоростей с таким расчетом, чтобы хорда кривой расходов расположилась примерно под углом 45° , а хорды кривых площадей и средних скоростей – под углом 60° к оси абсцисс. Чтобы кривые не пересекались, нули шкал площадей и скоростей сдвигаются вправо.

Если на участке гидрометрического створа при определенном уровне начинают действовать пойма, протоки и рукава, то кривые $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $V_{cp}=f(H)$ для них строятся сначала отдельно, а затем вычерчивается суммарная кривая $Q=f(H)$. Значения расходов для этой кривой получаются суммированием расходов, снятых с кривых для основного русла, поймы, проток при одной высоте уровня для всех кривых.

При значительной амплитуде расходов, когда отношение наибольшего расхода к наименьшему составляет 20 и больше, нижняя часть кривой расходов в пределах 20-30% амплитуды уровней вычерчивается в увеличенном масштабе (обычно в 5-10 раз крупнее). Такое построение позволяет вычислять сток воды при низких уровнях значительно точнее.

Для подсчета ежедневных расходов воды по построенной кривой расходов составляется таблица координат $Q=f(H)$.

Ежедневные расходы воды для периода свободного русла вычисляются непосредственно по таблице координат. Для этого берется значение среднего суточного уровня и из таблицы координат выбирается соответствующий ему расход воды.

6. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ

Кривая расходов воды должна охватить полную амплитуду колебаний уровня за тот период, для которого вычисляется сток воды. Если при самых высоких и самых низких уровнях расходы не измерялись, то кривая проводится (экстраполируется) вверх до высшего уровня и вниз до низшего уровня. Кривая расходов считается достаточно надежной, если экстраполяция вверх не превышает 15-20%, а вниз – 5% амплитуды уровней.

Экстраполяция кривой расходов до высшего уровня может быть произведена следующими основными способами:

- непосредственным продолжением обоснованной части кривой расходов;
- по элементам расхода;
- с помощью формулы Шези.

Выбор способа экстраполяции зависит, прежде всего, от формы русла и гидравлических сопротивлений на участке гидроствора.

Экстраполяция непосредственным продолжением обоснованной части кривой расходов допускается при условии, что неосвещенный участок кривой расходов не превышает 10% амплитуды колебаний уровней и профиль поперечного сечения в пределах этого участка не имеет резких переломов, а шероховатость склонов берегов по высоте изменяется несущественно. Кривая расходов воды продолжается до высшего уровня по общему ее направлению.

Экстраполяция по элементам расхода производится с помощью кривых $F=f(H)$ и $V_{cp}=f(H)$. Сначала достраивается до высшего уровня кривая площадей. Площади в пределах экстраполируемого участка определяются по профилю поперечного сечения. Затем экстраполируется кривая скоростей соответственно направлению обоснованной части с учетом шероховатости склонов берегов. После этого для разных уровней в пределах экстраполируемого участка с кривых $F=f(H)$ и $V_{cp}=f(H)$ снимаются значения F и V_{cp} , необходимые для экстраполяции расходы воды вычисляются по формуле $Q=F \cdot V_{cp}$.

Точки (Q, H) наносятся на чертеж, и по ним кривая расходов плавно продолжается до высшего уровня.

Данный способ экстраполяции применяется при условии, что паводочные расходы измерялись в одном гидрометрическом створе и профиль поперечного сечения в пределах экстраполируемого участка не имеет резких переломов.

Экстраполяция кривой расходов с помощью формулы Шези применяется при наличии надежных измерений продольных уклонов водной поверхности. Способ этот дает хорошие результаты для больших равнинных рек со средней глубиной более 3,5-4,0 м.

Расходы воды для разных уровней в пределах экстраполируемого участка вычисляются по формуле $Q = F \cdot V_{\text{ср}}$. Площадь поперечного сечения при этих уровнях определяется по поперечному профилю гидрометрического створа, а средняя скорость вычисляется по формуле Шези:

$$V = C\sqrt{RI}$$

Принимая гидравлический радиус равным средней глубине, получим:

$$V = C\sqrt{h_{\text{ср}}I}$$

Для определения значений C и I строятся зависимости $I = f(H)$ и $C = f(H)$. Кривая $I = f(H)$ проводится по значениям измеренных уклонов, а для построения графика $C = f(H)$ нужно с обоснованными измерениями части кривой $V_{\text{ср}} = f(H)$ для четырех-пяти наиболее высоких уровней снять значения средней скорости, и тогда C может быть вычислено по формуле:

$$C = \frac{V_{\text{ср}}}{\sqrt{h_{\text{ср}}I}}$$

Экстраполяция кривой расходов до низшего уровня может быть произведена:

- 1) по отметке нулевого расхода,
- 2) по элементам расхода,
- 3) непосредственным продолжением обоснованной части кривой расходов.

Первый способ является наиболее точным, и его следует применять во всех случаях, когда имеется возможность установить отметку нулевого расхода, т. е. отметку уровня, при которой должно прекратиться движение воды в гидрометрическом створе.

Если определить отметку нулевого расхода невозможно, кривая расходов экстраполируется вниз по элементам расхода или непосредственным продолжением обоснованной части кривой, так же как и при экстраполяции вверх.

Экстраполяция кривой расходов, как бы тщательно она ни была произведена, не вполне надежна, так как небольшие отклонения в проведении концевых участков кривой могут привести к значительным ошибкам при определении наибольших и наименьших расходов. Поэтому при планировании и производстве полевых работ необходимо осветить измерениями расходов всю амплитуду колебаний уровня.

7. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ РАСХОДОВ ВОДЫ ДЛЯ ПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ

На характер кривых расходов воды для пойменных русел оказывают влияние следующие факторы:

- Односторонняя или двухсторонняя пойма.
- Параллельна пойма или нет основному руслу.
- Расширяющаяся или сужающаяся пойма по длине русла.
- Угол пересечения руслового и пойменного потоков.
- Заполнение или опорожнение поймы (фаза паводка).
- Степень затопления поймы (глубина на пойме).
- Растительность на пойме.

На изогнутых (меандрирующих) реках в зависимости от типа руслового процесса пойменный поток может пересекать русловой под разными углами. При этом скорость течения в основном русле с выходом воды на пойму уменьшается. При значительных углах пересечения основного русла пойменным потоком и расходах воды малой обеспеченности (большие глубины на пойме) скорость в основном русле может уменьшаться до нуля и даже может иметь обратное направление. В этом случае русловой поток теряет свою индивидуальность.

В случае сужающейся поймы расход в основном русле увеличивается по длине потока и, как правило, увеличивается и скорость течения.

В случае расширяющейся поймы расход в основном русле уменьшается по длине потока и, как правило, уменьшается и скорость течения.

Следует отметить, что для каждой фазы уровенного режима, как правило, строится своя кривая расходов воды, так как зависимость $Q=f(H)$ не является однозначной. Все эти зависимости справедливы только для определенного периода времени, за который использованы исходные данные для их построения. И лишь для свободного русла, при отсутствии глубинных и плановых деформаций (устойчивое русло), при установившемся

режиме в период летней и осенней межени зависимость $Q=f(H)$ является однозначной. И для этого периода для вычисления стока воды может быть подобрано аналитическое выражение этой зависимости.

8. ПОДБОР АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ $Q=f(H)$

Анализ ряда кривых $Q=f(H)$ показал, что уравнение вида:

$$Q = a(H + b)^n$$

достаточно хорошо соответствует натурным данным.

При определении параметров этого уравнения вначале подбирают величину b , а затем строят логарифмический анаморфоз, по которому находят остальные два параметра.

Вначале по нанесенным точкам ориентировочно проводится кривая. Величина b определяется как расстояние от оси абсцисс до точки пересечения кривой с осью ординат (при $Q=0$), т.е. b – отметка уровня, при которой расход воды равен нулю. Действительно, в общем случае плоскость нуля графика водпоста не будет соответствовать уровню нулевого расхода. Следовательно, должен быть такой горизонт, при котором расход равен нулю. Отметка этого горизонта и равна b : $b > 0$, когда нуль графика водпоста расположен выше уровня нулевого расхода, $b < 0$, когда он расположен ниже уровня нулевого расхода, $b = 0$, когда нуль графика совпадает с уровнем нулевого расхода ([Приложение 6](#)).

Определение b графически достаточно неопределенно, поэтому для его отыскания решается система трех уравнений, написанных для трех точек: одной, расположенной в нижней части кривой ($Q_1; H_1$), второй – в верхней части ($Q_2; H_2$). Абсциссу третьей точки принимаем равной $\sqrt{Q_1 Q_2}$, и по ней и по представленным на графике данным наблюдений находим ординату H_3 . В соответствии с изложенным решается система уравнений:

$$\begin{aligned} Q_1 &= a(H_1 + b)^n; \\ Q_2 &= a(H_2 + b)^n; \\ \sqrt{Q_1 Q_2} &= a(H_3 + b)^n. \end{aligned}$$

Подставим в левую часть третьего уравнения значения Q_1 и Q_2 из первого и второго уравнений и, возведя левую и правую части третьего уравнения в степень $2/n$, получим после деления на $a^{2/n}$:

$$H_1 H_2 + b(H_1 + H_2) + b^2 = H_3 H_2 + 2H_3 b + b^2.$$

Откуда

$$b = \frac{H_1 H_2 - H_3^2}{2H_3 - (H_1 + H_2)}$$

Полученную величину b целесообразно проверить графически как точку пересечения кривой (проходящей через точки измеренных расходов и отвечающих им уровней) с осью ординат.

Для определения параметров a и n построим логарифмический анаморфоз, вычислив значения $\log Q$ и $\log(H + b)$ для всех измеренных расходов и отвечающих им уровней. При построении логарифмического анаморфоза не следует стремиться помещать на чертеже начало координат. На чертеже должен разместиться лишь имеющийся диапазон изменения расходов и уровней.

Совокупность точек в логарифмических координатах позволяет провести одну или несколько прямых. Отрезки, отсекаемые этими прямыми на оси ординат, равны $\log a_i$, а тангенс угла наклона их к оси абсцисс определяет величину показателя степени n_i . Во избежание неточностей в определении a и n рекомендуется определять эти величины не графически, а аналитически. Для этой цели подбираются точки, хорошо лежащие на прямой в противоположных концах. Для таких точек вычисляется $\Delta \log Q = \log Q_2 - \log Q_1$ и $\Delta \log(H + b) = \log(H_2 + b) - \log(H_1 + b)$.

Откуда

$$n = \frac{\Delta \log Q}{\Delta \log(H + b)}$$

Затем пишется уравнение прямой, проходящей через одну из этих точек (более удаленную от начала координат) под углом наклона к оси абсцисс, равным $\arctg(n)$.

$$\log Q_2 = \log a + n \log(H_2 + b).$$

Отсюда получим $\log a = \log Q_2 - n \log(H_2 + b)$, а затем и a .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим, что получение аналитического выражения зависимости $Q=f(H)$ не приводит к увеличению точности, а лишь обеспечивает однозначное решение при экстраполяции. Поэтому аналитический способ выражения зависимости $Q=f(H)$ применяется редко. Для подсчета ежедневных расходов воды по построенной кривой расходов, как ранее упоминалось, составляется таблица координат $Q=f(H)$. Форма такой таблицы приведена в [Приложении 7](#).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Гидрометеиздат. Л. 1965.
2. Орлова В.В. Гидрометрия. Гидрометеиздат. Л. 1966.
3. Кулеш Н.П. Краткий курс гидрометрии с основами практической метеорологии. ЛПИ, Л. 1969.
4. Саликов В.Г. Экспериментальные исследования взаимодействия руслового и пойменного потоков и разработка практических методов их гидравлического расчета. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЛПИ, Л. 1977.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Изд. ГУГМС СССР, вып. 1, 2, 6-10. Гидрометеиздат. Л. 1952-1960.
6. СП 100.13330.2011 «СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения». – Электронный ресурс: ИПС Техэксперт <http://docs.cntd.ru/document/871001001>
7. СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». – Электронный ресурс: ИПС Техэксперт <http://docs.cntd.ru/document/1200035578>
8. Наставление по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (НИМП-72). – Электронный ресурс: ИПС Техэксперт <http://docs.cntd.ru/document/1200067264>
9. СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. М.: Корпорация «Трансстрой», 1996
10. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). М.: ЦНИИС, 1992.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

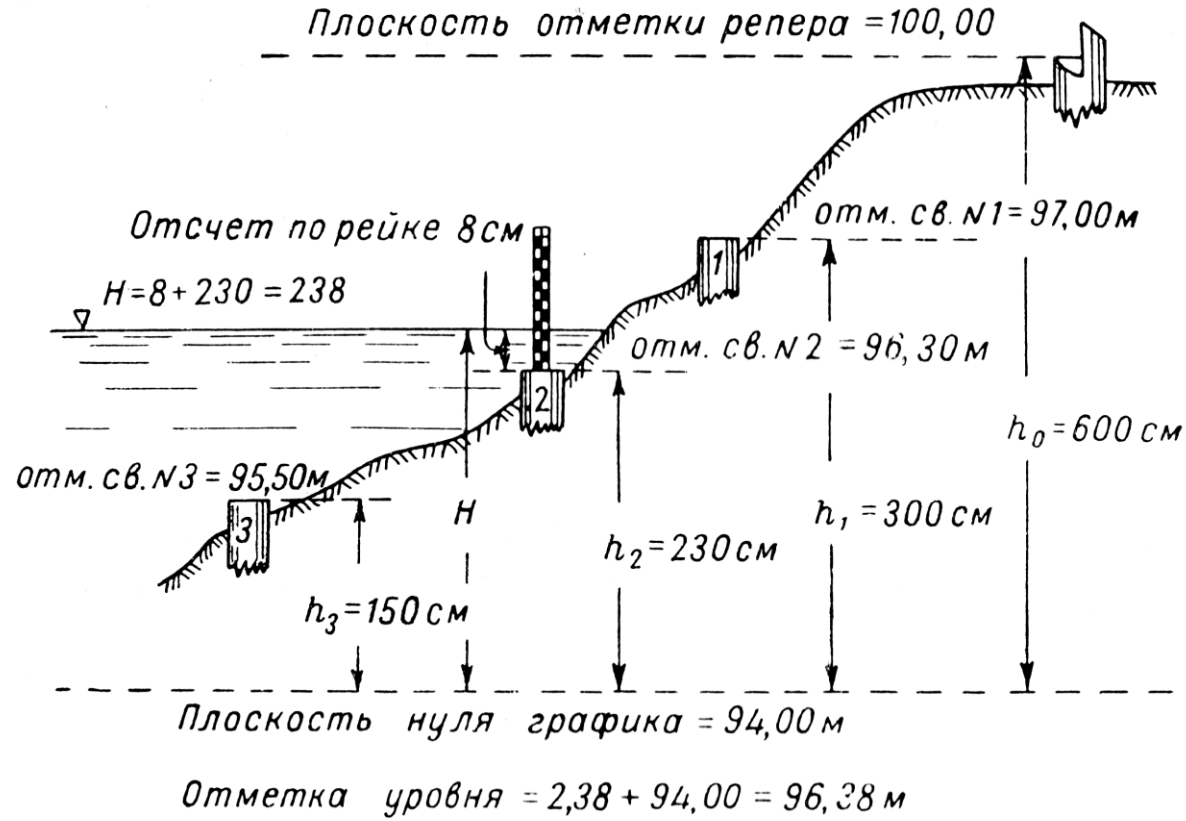


Рис. 1. Схема отметок и отсчетов на свайном водомерном посту

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

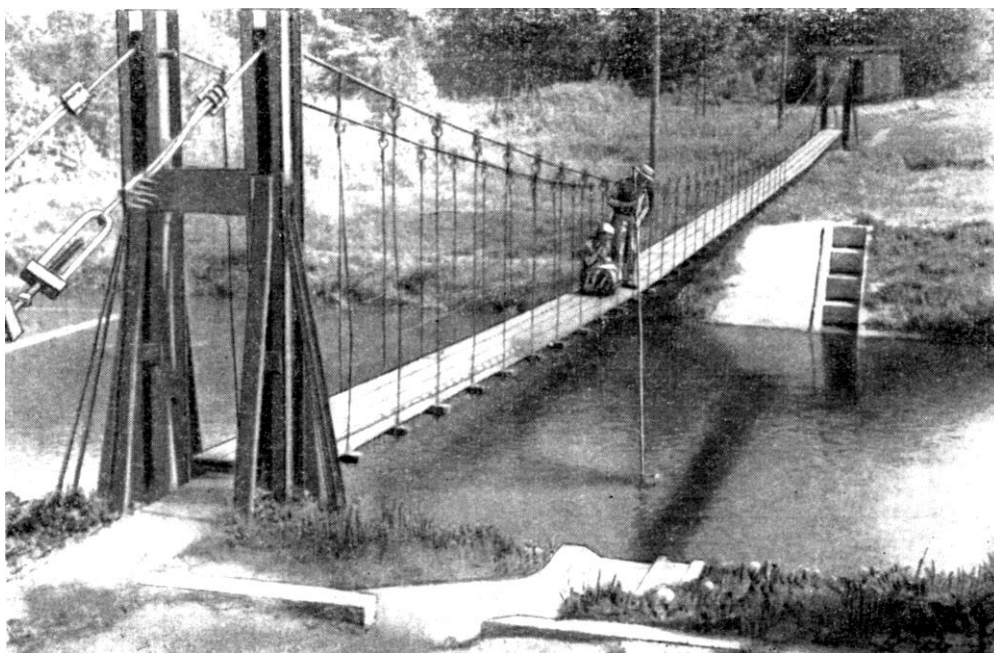


Рис. 1. Оборудование гидрометрического створа подвесным гидрометрическим мостиком

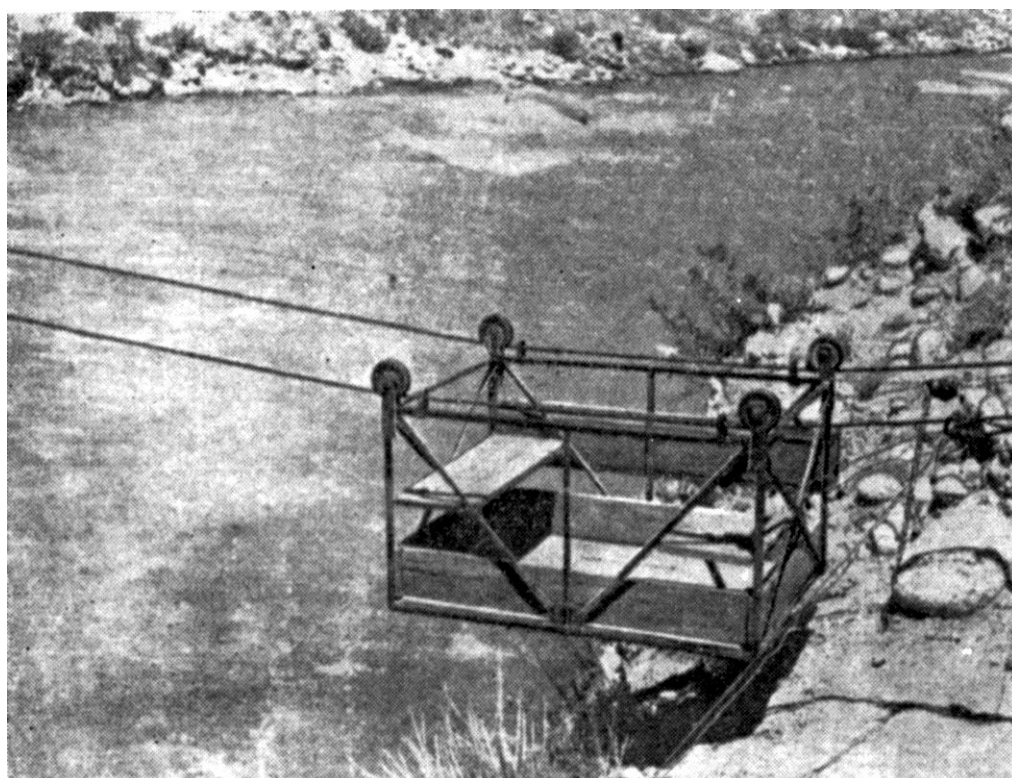


Рис. 2. Оборудование гидрометрического створа подвесной гидрометрической люлькой

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



Рис. 1. Природный гидрометрический створ. Измерение скоростей течения в бассейне реки Каа Хем – Малый Енисей (Саяны) с помощью вертушки на штанге. Фото В.Г. Саликова

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



Рис. 1. Работы по измерению скоростей течения со льда на реки Медведица с помощью струмера Бурцева. Фото В.Г. Саликова

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

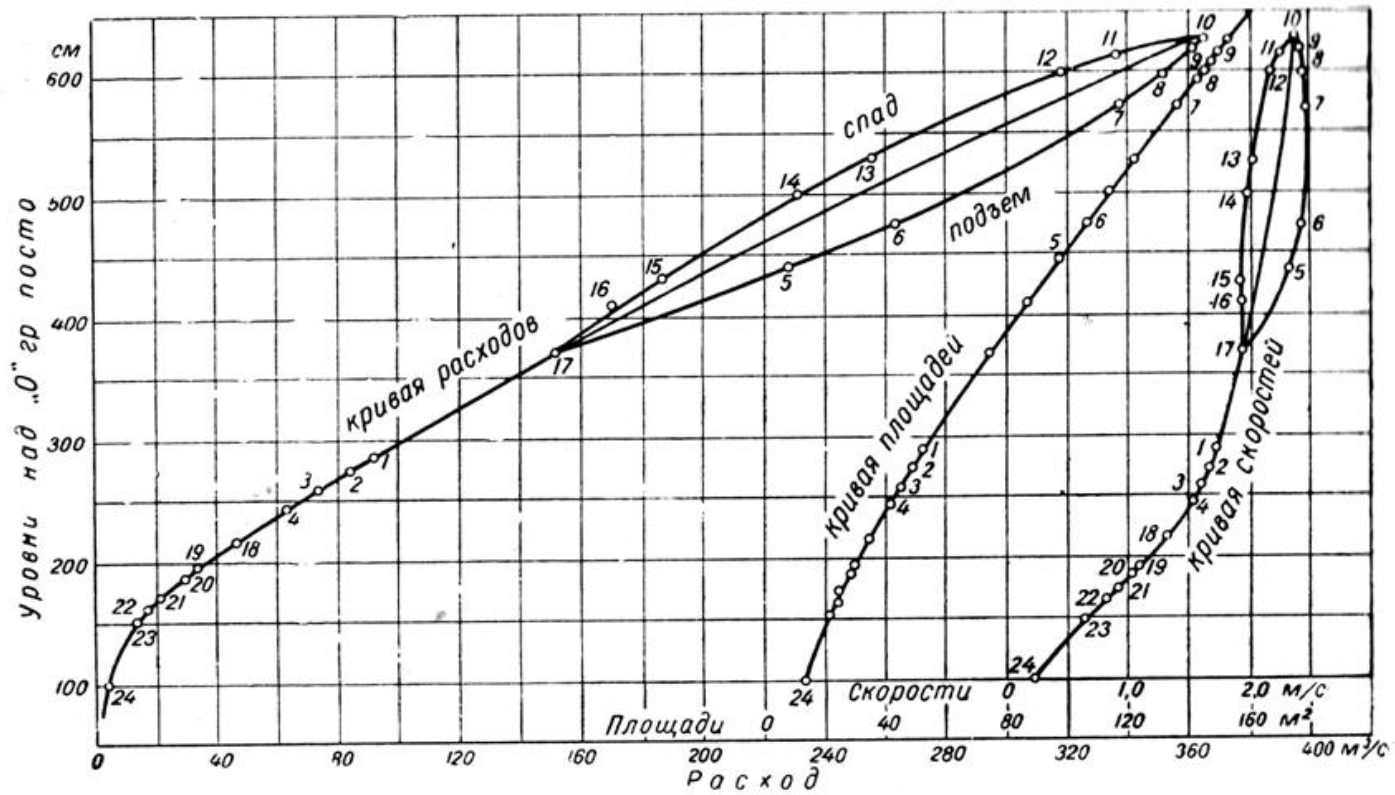


Рис. 1. Красная расходов воды на подъеме и спаде половодья

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

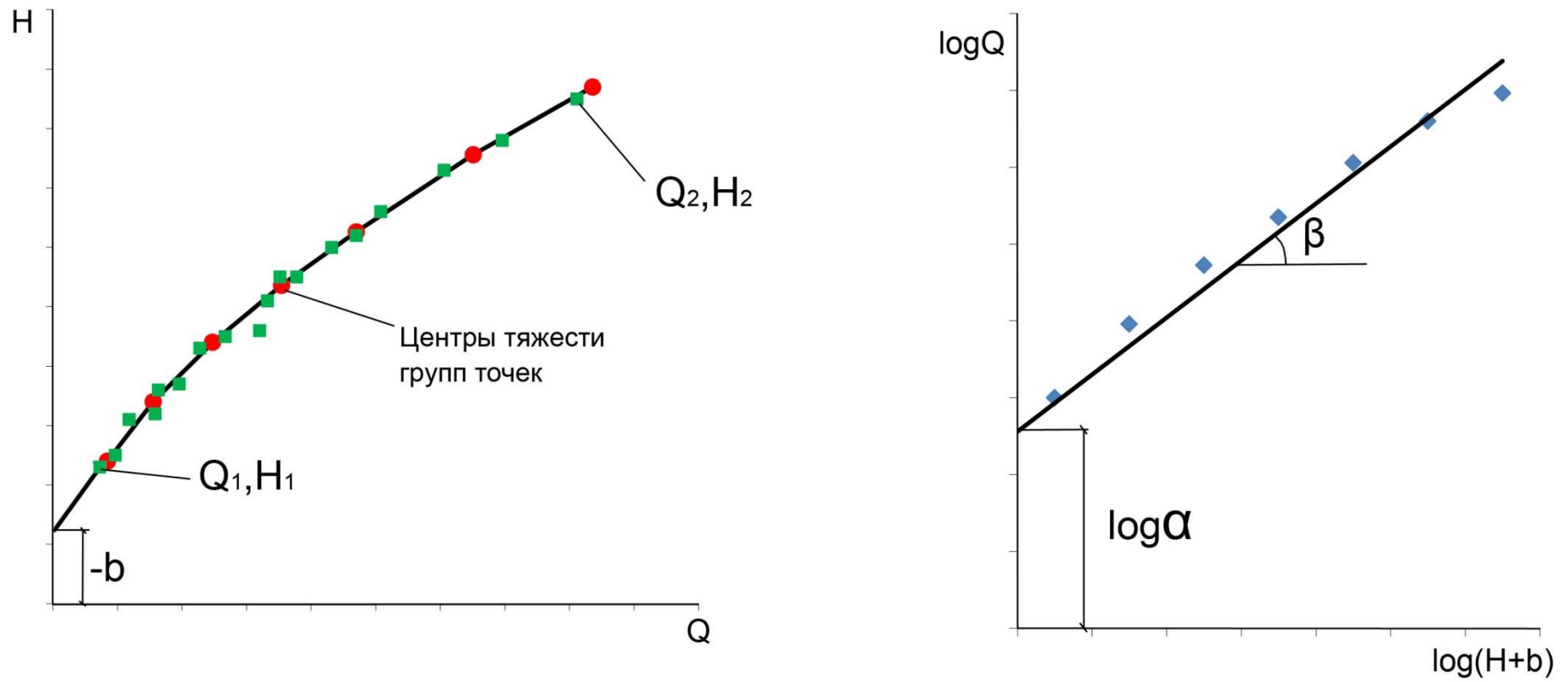


Рис. 1. Подбор параметров аналитического выражения зависимости $Q=f(H)$

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица 1. Координаты кривой расходов воды

Уровень воды над «0» графика (Н, см)	Расход (Q, м ³ /с)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	20	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
20	25	25,7	26,4	27,1	27,8	28,5	29,2	29,9	30,6	31,3
30	32	32,8	33,6	34,4	35,2	36,0	36,8	37,6	38,4	39,2
40	40	и т.д.								

Значения расходов снимаются с кривой $Q = f(H)$ через определенные интервалы уровня, обычно через 10 см, с таким расчетом, чтобы отрезки кривой в пределах интервала можно было бы принимать за прямые для прямолинейной интерполяции промежуточных значений расхода. Снятые с кривой значения расходов проставляются в графу «0» против соответствующих уровней. Значения расходов для промежуточных уровней (например, 11, 12, 13 см и т. д.) вычисляются по интерполяции и заносятся в соответствующие графы.