



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Оценка точности измерения расхода
водосливами с тонкой стенкой
различной формы**

Исполнитель

Протасов Кирилл Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат физ.-мат.наук
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

2018г.

Санкт-Петербург
2018



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Оценка точности измерения расхода
водосливами с тонкой стенкой
различной формы**

Исполнитель Протасов Кирилл Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ.-мат.наук
(ученая степень, ученое звание)

Саюцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2018г.

Санкт–Петербург
2018

Содержание

	Стр.
Введение.....	3
1 Водосливы.....	5
1.1 Основная информация по водосливам.....	5
1.2 Классификация водосливов по различным признакам.....	8
1.3 Треугольные водосливы.....	12
1.4 Трапецеидальные водосливы.....	14
1.5 Параболические водосливы.....	16
2 Точность определения расходов воды незатопленными водосливами с тонкой стенкой.....	17
3 Результаты измерения расходов воды водосливами с тонкой стенкой.....	30
Заключение.....	40
Список литературы.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологические измерения на реках имеют большое научное и практическое значение. Инженерная гидрология и речная гидравлика со всеми их сложными разделами развивались на основе обобщения гидрометрических данных. Для решения всех проблем по использованию и управлению водными ресурсами требуется исчерпывающая разнообразная и своевременная информация о режиме водных объектов. На разных стадиях водохозяйственного проектирования требуются гидрологические данные разной подробности и точности. Вместе с тем точность самих гидрологических измерений в большой степени зависит от формы движения жидкости, размеров потока, изменчивости элементов движения во времени и пр. Следовательно, изучение и использование водных ресурсов должно включать и оценку точности их определения вместе с точностью самих измерений и точностью расчетов.

При количественном выражении стока воды речных потоков используется понятие «расход воды». Согласно ГОСТ 19179-73 «Гидрология суши. Термины и определения» [1]: «Расход воды – это объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени».

Существует много различных способов определения расходов воды, что объясняется большим разнообразием форм движения жидкости и размерами самих потоков.

Измерение расхода методом «скорость-площадь» предполагает натурное определение скорости течения воды. Погрешность измерений данным методом при использовании гидрометрической вертушки составляет 5-10 %. Применение водосливов позволяет сократить погрешность до 1-3 % [2].

Как измерительная установка водосливы очень удобны, когда требуются частое и точное определение расхода для учета стока малых рек, распределения воды по ирригационной системе и при исследовательских работах, связанных с изучением расхода и стока. Они также широко применяются в гидравлических лабораториях.

Таким образом, вопросы оценки точности измерения расхода водосливами являются актуальными с научно-технической и прикладной точек зрения и составляют серьёзную научно-практическую задачу, имеющую важное хозяйственное значение.

Целью выпускной квалификационной работы является оценка точности измерения расхода водосливами с тонкой стенкой различной формы – трапецеидальной и параболической.

Объектом исследований выступают параметры рассматриваемых водосливов, а предметом исследований является оценка точности измерения расходов воды.

Для решения сформулированной научной задачи и, тем самым, достижения цели исследований, были поставлены следующие частные задачи:

- a. Обобщение информации по водосливам с тонкой стенкой.
- b. Теоретическое исследование точности определения расходов воды незатопленными водосливами с тонкой стенкой.
- c. Проведение серии лабораторных экспериментов для определения коэффициентов расхода водосливов.
- d. Выработка предложений по практическому использованию полученных результатов.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследований.

В первом разделе представлены обобщенные сведения по исследуемым водосливам с тонкой стенкой.

Во втором разделе приводится теоретическое обоснование точности определения расходов воды незатопленными водосливами с тонкой стенкой.

В третьем разделе представлены результаты измерений расходов воды водосливами с тонкой стенкой.

В заключении сформулированы основные результаты работы, полученные в рамках выпускной квалификационной работы, показана их практическая значимость.

1 ВОДОСЛИВЫ

1.1 Основная информация по водосливам

Водосливом можно назвать любую преграду (стенка или порог), через которую переливается поток жидкости.

Истечение через водослив с позиций общих законов гидравлики представляет собой истечение жидкости из больших отверстий при постоянном напоре.

Для водослива с тонкой стенкой характерно, что ее толщина δ не влияет на форму переливающейся струи. При этом нижняя поверхность струи сначала поднимается, а затем опускается и пересекает горизонтальную поверхность, проходящую на отметке острого ребра водослива на расстоянии $0,67H$ от ребра. Поэтому при условии $\delta \leq 0,67H$ стенка водослива не влияет на очертание струи. Это положение справедливо для вертикальной стенки прямоугольного водослива; при ее наклоне или скруглении ребра этот критерий уменьшается и поэтому для таких водосливов принимают $\delta < 0,5H$.

Равномерное движение воды переходит в неравномерное, если происходит сдавливание русла каким-либо заграждением или с боков, и при этом происходит повышение глубины воды в русле перед этим заграждением или стеснением. Повышение будет происходить до тех пор, пока расход воды через стесненное живое сечение не станет равным расходу в нестесненном русле. На рисунке 1.1 изображен пример русла с заграждением.

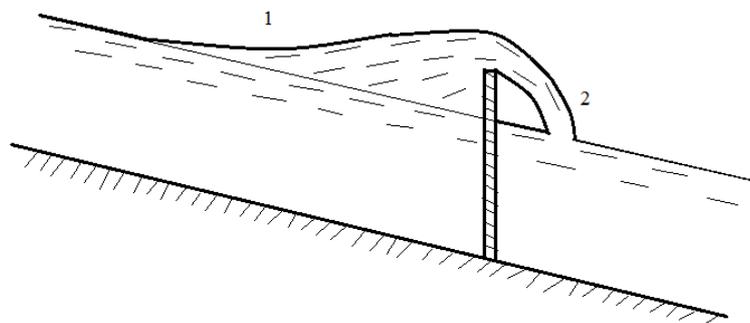


Рисунок 1.1 – Пример русла с заграждением

Преграда, которая стесняет русло исключительно снизу или с боков, либо одновременно с боков и снизу, и через которую совершается переливание воды, называется водосливом. А движение воды в этом случае называют истечением через водослив.

Зона потока 1 перед преградой (вверх по течению) имеет название – верхний бьеф. А зона потока 2 за преградой (вниз по течению) – нижний бьеф.

Тот участок заграждения, через который происходит перетекание воды, называется порогом, или гребнем водослива. [3]

У водосливов существуют определённые параметры, показанные на рис. 1.2, такие как:

1) b – параметр, характеризующийся шириной или отверстием порога, а также длиной водосливного фронта, а также его можно называть длиной гребня водослива;

2) δ – толщина порога;

3) P_B называют высотой порога в верхнем бьефе;

4) P_H называют высотой порога в нижнем бьефе;

5) при равенстве высоты порога в верхнем бьефе и высоты порога в нижнем бьефе эту высоту определяют через P ;

6) H – напор на водосливе, который обычно измеряют в сечении $1-1$, это та территория водослива, где еще не появляется сильное уменьшение свободной поверхности потока на определённом расстоянии $l_B = (3...5) H$ от стенки водослива;

7) B – ширина потока, в котором установлен водослив, обычно она меньше ширины водослива, так как происходит искривление струи в плане. Это показано на рис. 1.2;

8) V_0 – скорость подхода воды на водослив, являющаяся средней скоростью потока в сечении $1-1$ и имеющая ширину русла B и глубину потока P_B+H ;

9) H_0 – полный напор на гребне водослива, по – другому можно назвать напором, учитывающим скорость подхода воды на водослив, который рассчитывается по формуле

$$H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g}; \quad (1.1)$$

10) z – характеристика, определяющая геометрический перепад уровня воды на водосливе, ее можно рассчитать, как разность между отметками уровней воды на верхнем и нижнем бьефах;

11) z_0 – параметр, определяющий полный перепад на водосливе, по – другому перепад, учитывающий скорость подхода, рассчитывается по формуле

$$z_0 = z + \frac{\alpha V_0^2}{2g}. \quad (1.2)$$

12) Q – расход через водослив, равный объему жидкости, переливающейся через гребень водослива в секунду.

На рисунке 1.2 показаны проекции водослива.

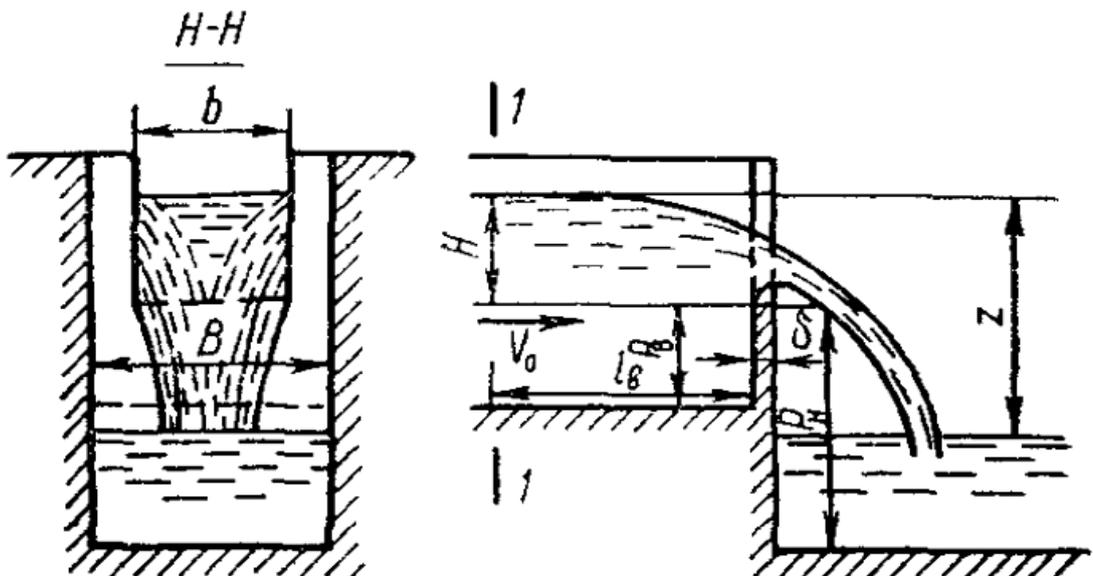


Рисунок 1.2 – Проекция водослива

Поток жидкости через водослив в основном обусловлен действием силы тяжести и напора H . Такие силы как сила трения и сила поверхностного

натяжения особо не влияют на данный процесс. Но все-таки основную роль в процессе истечения играет напор. Он представляет собой разницу удельной потенциальной энергии на высоте беспрепятственной плоскости воды в верхнем бьефе и на высоте верхнего порога. Как уже отмечено, силы поверхностного натяжения при этом никак не влияют, а из потерь энергии на трение учитываются лишь местные, который связаны с переливом воды через заграждение, то есть порог. Истечение через водослив является четким примером резкоизменяющегося движения, которое характеризуется достаточно большим искривлением струи. [9-11]

Н.Н. Павловский рекомендовал сгруппировывать водосливы по абсолютно разным признакам, таким как: толщине стенки, или порога, водослива; по геометрической форме отверстия водослива; по расположению порога в плане; по условиям подхода потока воды к водосливу; по характеру перетекания воды через водослив; в зависимости от наклона водосливной стенки.

1.2 Классификация водосливов по различным признакам

I. По форме и относительным размерам продольного (по направлению течения) сечения, т. е. по профилю:

а) Водослив с тонкой стенкой. Для такого водослива характерно, что ширина водослива (толщина водосливной стенки) S не влияет на форму переливающейся струи (рис. 1.3, а). Для вертикальной стенки водослива для этого необходимо, чтобы $S/H < 0,67$. Форма и размеры струи в этом случае показаны на рис. 1.3, б. Как видно, нижняя поверхность струи сначала поднимается, а затем опускается и пересекает горизонтальную поверхность, проходящую на отметке острого ребра водослива на расстоянии $0,67H$ от ребра. Поэтому для острого ребра водослива при $S < 0,67H$ стенка водослива не влияет на очертание струи. При наклоне стенки и при скруглении ребра водослива верхний предел отношения S/H , характеризующий водослив с тонкой стенкой, уменьшается.

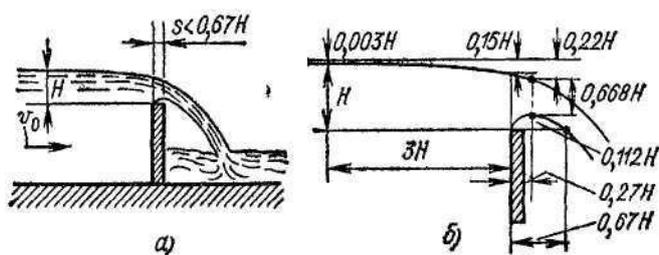


Рисунок 1.3 – Водослив с тонкой стенкой

В связи с возможными колебаниями переливающейся струи для надежной работы таких водосливов толщину водосливной стенки рекомендуют принимать $S/H < 0,5$.

б) Водослив практического профиля полигонального очертания (рис. 1.4) с относительной длиной порога (или шириной водослива по верху) $(0,5 \div 0,67) < S/H$.

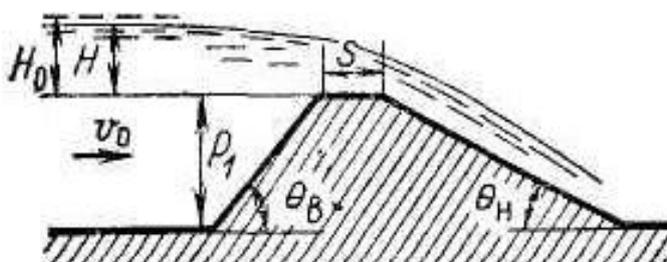


Рисунок 1.4 – Водослив практического профиля полигонального очертания

в) Водослив с широким порогом (правильнее было бы говорить «водослив с «длинным» порогом») (рис. 1.5) с горизонтальной поверхностью порога при $2 < S/H < 10$. При такой длине потери напора по длине пренебрежимо малы.

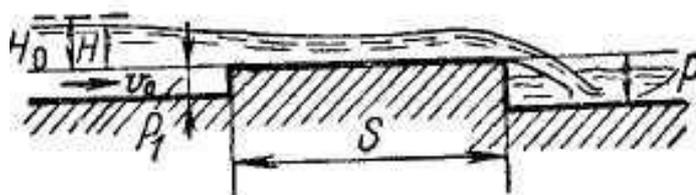


Рисунок 1.5 – Водослив с широким порогом

В литературе встречаются оценки верхнего предела S/H от 8 до 12. На водосливе с широким порогом хотя бы в пределах небольшого участка наблюдается плавно изменяющееся движение.

4. Водослив практического профиля криволинейного очертания. Верхняя часть гребня (оголовок) и низовая грань имеют плавное очертание, которое часто выполняется в соответствии с несколько откорректированными координатами струи, свободно перетекающей через вертикальную тонкую стенку (рис. 1.6, а).

Здесь можно выделить водослив практического профиля криволинейного очертания с вертикальным уступом в нижнем бьефе (рис. 1.6, б).

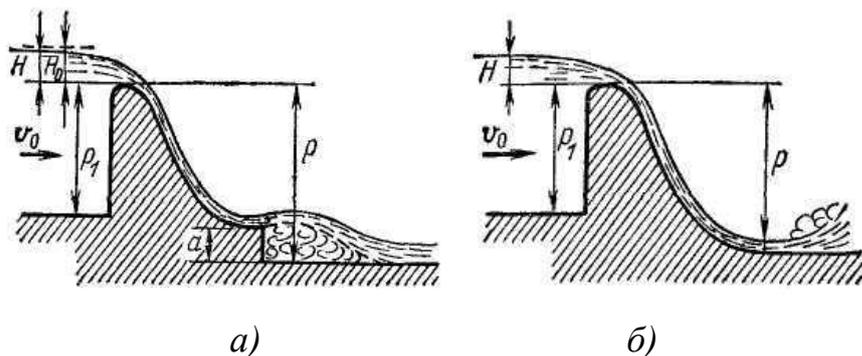


Рисунок 1.6 – Водосливы практического профиля криволинейного очертания

К водосливам этого типа относятся также цилиндрический водослив (рис. 1.7, а), водослив практического профиля распластанного типа (рис. 1.7, б) и наполняемые водой, а иногда и воздухом водосливы из мягкой синтетической ткани (рис. 1.7, в).

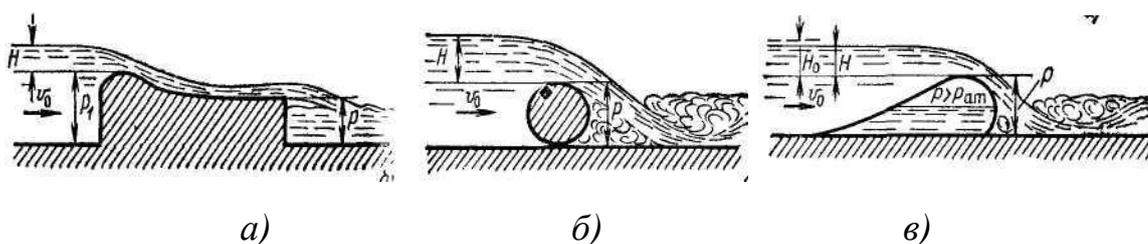


Рисунок 1.7 – Цилиндрический водослив

II. По форме отверстия: водосливы с прямоугольными (рис. 1.8, а), трапецидальными (рис. 1.8, б, в), треугольными (рис. 1.8, г) и криволинейными (рис. 1.8, д, е) отверстиями.

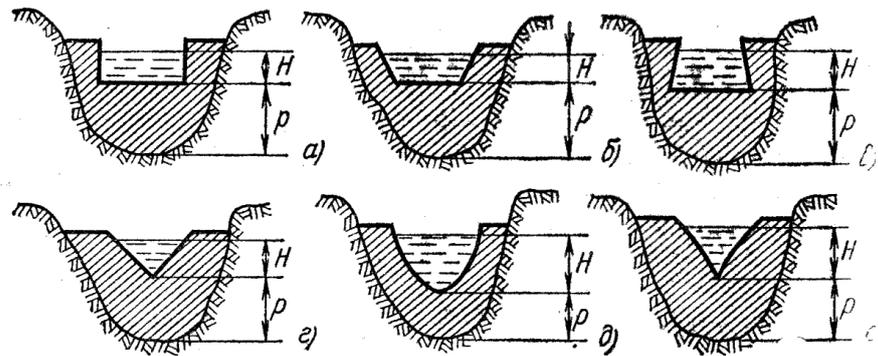


Рисунок 1.8 – Водосливы с разными отверстиями

III. По очертанию в плане: водосливы прямолинейные, полигональные, криволинейные, замкнутые. Водосливы, очерченные в плане по круговой кривой, обладают особенностью - линии тока обычно направлены к центру по радиусам.

IV. По ориентации к направлению потока: водосливы прямые, нормальные к направлению потока (рис. 1.9, а), косые (рис. 1.9, б), боковые, параллельные направлению потока (рис. 1.9, в).

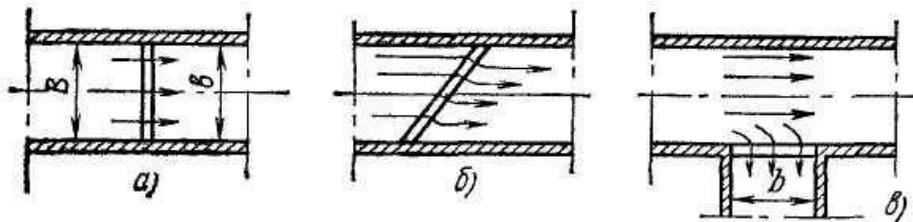


Рисунок 1.9 – Водосливы разные по ориентации к направлению потока

V. По наличию или отсутствию бокового сжатия (в плане) при истечении: водосливы без бокового сжатия (рис. 1.9, а) и водосливы с боковым сжатием (рис. 1.10).

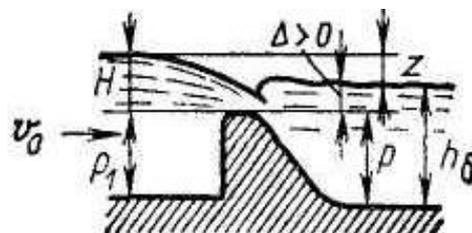


Рисунок 1.10 – Водослив с боковым сжатием

VI. По стеснению потока водосливом в вертикальной плоскости: водосливы с порогом и без порога.

При истечении через подавляющее большинство водосливов с порогом происходит сжатие потока в вертикальном направлении, линии тока искривляются и «подтягиваются» снизу к гребню водослива. Но могут быть и водосливы без порога. В этом случае истечение через водослив происходит обязательно при наличии бокового сжатия. К такому типу водосливов относятся, например, отверстия мостов и других гидротехнических сооружений на мелиоративных системах.

VII. По влиянию нижнего бьефа на истечение через водослив: водосливы неподтопленные, когда уровень нижнего бьефа не влияет на расход или напор водослива; водосливы подтопленные, когда уровень нижнего бьефа влияет на расход, переливающийся через водослив, или напор. В последнем случае при неизменном значении напора расход, пропускаемый через водослив, меньше, чем в условиях, когда подтопление отсутствует.

В выпускной квалификационной работе исследовались два тонкостенных водослива различной формы – трапецеидальный и параболический, а в качестве контрольного – треугольный водослив.

1.3 Треугольные водосливы

Треугольный водослив Я. Томсона представляет собой тонкую вертикальную стенку с вырезом треугольной формой. На рис. 1.3 представлен треугольный водослив. Обычно треугольные водосливы делают с углом $2\theta = 90^\circ$. [3]

Данные исследований показывают, что треугольный водослив с прямым углом ($2\theta = 90^\circ$) достаточно точный измеритель расхода, а поэтому такие водосливы используются как расходомеры.

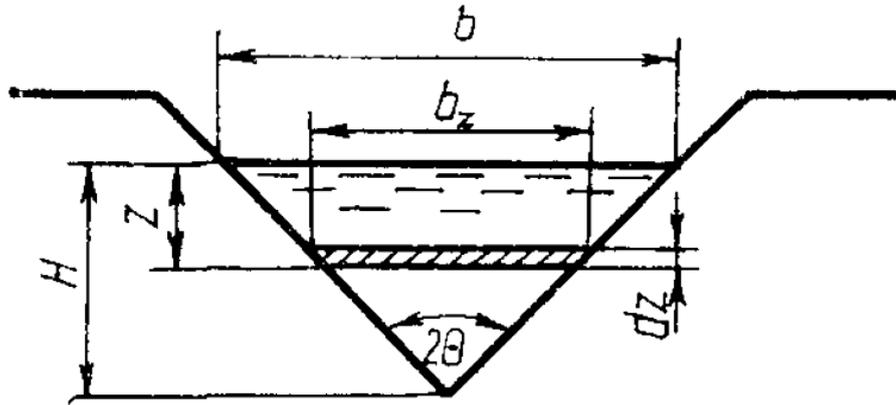


Рисунок 1.11 – Треугольный водослив

Расход через треугольный водослив с любым углом можно определить теоретически, рассматривая истечение жидкости из большого треугольного отверстия на основе зависимости

$$Q = \int_0^H \mu b_z \sqrt{2gz} dz, \quad (1.3)$$

где μ – коэффициент расхода;

b_z – отверстие водослива.

Отверстие водослива b_z изменяется по высоте и из подобия треугольников равно

$$b_z = b \frac{H - z}{H} \quad (1.4)$$

Если подставить уравнение (1.2) в уравнение (1.1), то получим

$$Q = \int_0^H \mu b \frac{H - z}{H} \sqrt{2gz} dz. \quad (1.5)$$

Проинтегрировав уравнение (1.3), получим

$$Q = \mu b \left(\frac{2}{3} H^{3/2} - \frac{2}{5} H^{3/2} \right) = \frac{4}{15} \mu b \sqrt{2H^{3/2}}. \quad (1.6)$$

Если угол выреза принять равным 90° , то отверстие водослива при напоре H будет равно $b = 2H$. Тогда уравнение (1.4) примет вид

$$Q = \frac{4}{15} \mu b \sqrt{2H^{3/2}} = MH^{5/2}, \quad (1.7)$$

где

$$M = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g}. \quad (1.8)$$

Такой водослив исследовал Я. Томпсон при напорах равных от 0,05 м до 0,25, водослив назвали его именем. С помощью различных исследований было установлено значение коэффициента расхода для данного водослива, тогда уравнение (1.6) стало иметь вид

$$M = \frac{8}{15} 0,593 \sqrt{2g} = 1,4.$$

Тогда зависимость (1.5) может записаться так

$$Q = 1,4H^{5/2}, \quad (1.9)$$

где H измеряется в метрах, а расход в $\text{м}^3/\text{с}$.

Более точно расход можно рассчитать по формуле Кинга

$$Q = 1,343H^{2,47}. \quad (1.10)$$

Если угол выреза водослива от 22° до 118° , то с помощью формулы Ф. Гриве можно рассчитать расход

$$Q = 1,331(\text{tg}\theta)^{0,996}H^{2,47}. \quad (1.11)$$

1.4 Трапецидальные водосливы

Данные водосливы с тонкой стенкой, имеющей форму трапеции, можно охарактеризовать устойчивыми коэффициентами расхода, поэтому их используют в качестве водомеров. На рисунке 1.4 показан трапецидальный водослив.

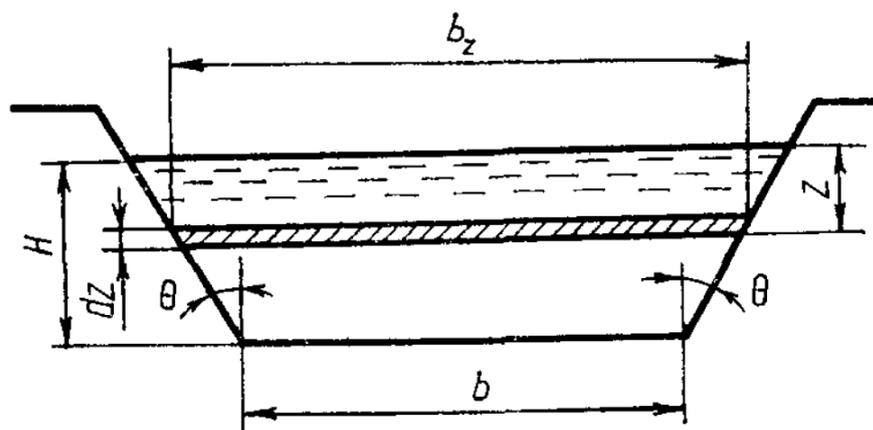


Рисунок 1.12 – Пример трапецидального водослива

Для определения расхода трапецеидальным водосливом в качестве начальной расчетной зависимости используют уравнение (1.1). Но в данном случае отверстие b_z по высоте находится

$$b_z = b + 2(H - z)tg\theta. \quad (1.12)$$

Если подставив b_z в уравнение (1.1), то получим

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^H \mu[b + 2(H - z)tg\theta]\sqrt{2gz} dz = \\ &= \int_0^H \mu b\sqrt{2gz} dz + \int_0^H 2\mu Htg\theta\sqrt{5gz} dz - \int_0^H 2\mu ztg\theta\sqrt{2gz} dz. \end{aligned}$$

Проинтегрировав данное выражение, получим

$$Q = m(b + 0,8Htg\theta)\sqrt{2gH^3}, \quad (1.13)$$

где m – коэффициент расхода, примерно равный 0,42;

$tg\theta$ характеризует крутизну заложения боковых граней водослива.

При $tg\theta = 1/4$ пропадает необходимость введения поправки на боковое сжатие струи и поэтому в расчетное уравнение берется только ширина водослива снизу b . Помимо этого, с помощью исследований С. Чиполетти для данного тангенса угла выреза установил, что коэффициент расхода может оставаться постоянным при изменении напора H . И тогда для такого трапецеидального водослива С. Чиполетти решил, что для расчета расхода можно использовать формулу вида

$$Q = 1,86bH^{3/2}. \quad (1.2)$$

Но если происходит затопление трапецеидального водослива с тонкой стенкой со стороны нижнего бьефа, то стоит привлечь коэффициент затопления σ_3 , тогда расчетная зависимость в данном случае станет принимать вид

$$Q = 1,86bH^{3/2}\sigma_3. \quad (1.3)$$

1.5 Параболические водосливы

Параболический водослив показан на рисунке 1.5. Он был изучен ученым Ф. Гривом.

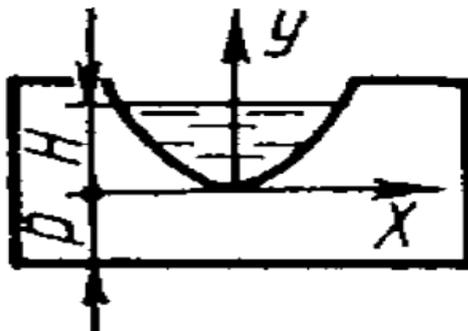


Рисунок 1.13 – Параболический водослив

Расход воды для данного водослива рассчитывается по формуле

$$Q = MH^2, \quad (1.4)$$

где $M = 2,768\sqrt{\rho}$ – коэффициент расхода для метровых размеров (ρ – параметр параболы $x^2 = 2\rho y$.)

Параболический водослив является достаточно точным расходомером, он также простой для вычисления расхода. Ещё одним достоинством является то, что он может применяться и в достаточно узких лотках при измерении расхода воды.

2 ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ НЕЗАТОПЛЕННЫМИ ВОДОСЛИВАМИ С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

Погрешность измерений расхода при помощи стандартных водосливов и лотков характеризуется совокупностью составляющих погрешности, обусловленных неточностью определения каждого из параметров, входящих в расчетные уравнения расхода.

При определении погрешности измерений расхода жидкости допускается не учитывать (ввиду их незначительности) составляющие погрешности, обусловленные влиянием температуры измеряемой среды, если она находится в пределах от 0 до 25°C, а также отклонением от расчетного значения ускорения свободного падения в зависимости от широтного и высотного расположения объекта.

Допускается не учитывать случайную составляющую погрешности измерений уровня жидкости, вызванную пульсациями ее поверхности, если при использовании успокоительных устройств амплитуда пульсаций поверхности не превышает половины основной абсолютной погрешности применяемого средства измерений уровня. [8]

Рассмотрим точность определения расходов воды незатопленными водосливами с тонкой стенкой, т.е. гидрометрическими водосливами.

Для прямоугольного водослива формула расхода имеет вид

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.1)$$

где b – ширина водослива;

H – напор на водосливе;

m_0 – коэффициент расхода водослива, определяемый по формуле:

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + p_{в.б}} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

где $p_{в.б}$ – высота водослива со стороны верхнего бьефа.

На рисунке 2.1 показана схема истечения жидкости через незатопленный водослив с тонкой стенкой.

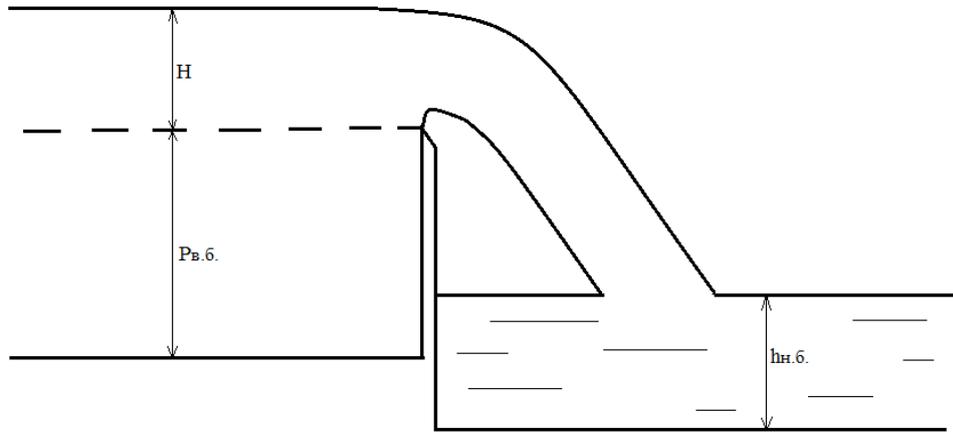


Рисунок 2.1 – Схема истечения жидкости через незатопленный водослив с тонкой стенкой.

Найдем точность расчета расхода Q из формулы (2.1) в зависимости от ошибок, входящих в эту формулу элементов потока и параметров водослива.

Для этого логарифмируя формулу (1), найдем полный дифференциал

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dm_0}{m_0} + \frac{db}{b} + \frac{3 dH}{2 H} \quad (2.3)$$

Так как m_0 является сложной функцией от H и $p_{в.б}$, найдем полный дифференциал от этой функции, логарифмируя формулу (2.2)

$$\ln m_0 = \ln \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} \right) + \ln \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + p_{в.б.}} \right)^2 \right]$$

и дифференцируя последнее выражение

$$\frac{dm_0}{m_0} = -\frac{0,0027}{mH^2} dH + \frac{0,55}{m_1} \left[\frac{2H(H + p_{в.б.})^2 dH - 2H^2(H + p_{в.б.})(dH + dp_{в.б.})}{(H + p_{в.б.})^4} \right] \quad (2.4)$$

где $m = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H}\right)$, $m_1 = \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+p_{в.б.}}\right)^2\right]$.

После преобразований выражение (2.4) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{dm_0}{m_0} &= \left[\frac{2 \cdot 0,55 H H}{m_1 (H + p_{в.б.})^2 H} - \frac{2 \cdot 0,55 H^2 H}{m_1 (H + p_{в.б.})^3 H} - \frac{0,0027}{m H^2} \right] dH \\ &\quad - \frac{2 \cdot 0,55 H^2 H}{m_1 (H + p_{в.б.})^3} \frac{dp_{в.б.}}{H} \\ &= \left[\frac{2(m_1 - 1)}{m_1} - \frac{2(m_1 - 1)}{m_1 (H + p_{в.б.})} - \frac{0,0027}{m H} \right] \frac{dH}{H} \\ &\quad - \frac{2(m_1 - 1) H}{m_1 (H + p_{в.б.})} \frac{dp_{в.б.}}{H}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Подставляя значение $\frac{dm_0}{m_0}$ из формулы (2.5) в формулу (2.3) получим

окончательно

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q} &= \left[\frac{2(m_1 - 1)}{m_1} \left(1 - \frac{H}{H + p_{в.б.}}\right) - \frac{0,0027}{m H} + \frac{3}{2} \right] \frac{\Delta H}{H} \\ &\quad + \frac{2(m_1 - 1) H}{m_1 (H + p_{в.б.})} \frac{\Delta p_{в.б.}}{H} + \frac{\Delta b}{b}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Рассмотрим возможные значения погрешностей ΔH , $\Delta p_{в.б.}$ и $\frac{\Delta b}{b}$, а также коэффициенты при этих погрешностях, входящих в формулу (2.6). [2]

При максимально (предельном) значении $\frac{H}{H+p_{в.б.}}=1$ первый член коэффициента в квадратных скобках будет равен нулю. В этом случае коэффициент при относительной погрешности $\frac{\Delta p_{в.б.}}{H}$ будет иметь максимальное значения $\frac{2(1,55-1)}{1,55} \cdot 1,0 \cong 0,7$.

Минимальная величина отношения $\frac{H}{H+p_{в.б.}}$ составляет около 0,05, при этом значение m_1 практически равно 1, следовательно, и в этом случае первый член

коэффициента в квадратных скобках равен нулю. Одновременно обращается в нуль и коэффициент при $\frac{\Delta p_{в.б.}}{H}$. Таким образом, для соотношения $\frac{2(m_1-1)}{m_1} \left(1 - \frac{H}{H+p_{в.б.}}\right)$ крайними пределами являются нули, следовательно, максимальное значение оно принимает где-то близко к середине интервала от $\frac{H}{H+p_{в.б.}}=1,00$ до $\frac{H}{H+p_{в.б.}}=0,05$, т.е. примерно $\frac{H}{H+p_{в.б.}}=0,5 \div 0,6$.

В этом случае $m_1=1,12$ и весь рассматриваемый член равен $\frac{2(1,12-1)}{1,12} \cdot 0,05 = 0,12$.

При постоянном коэффициенте $m \cong 0,40$ значение $\frac{0,0027}{mH}$ будет существенным при малых напорах H . Так, при $H=0,05$ м имеем $\frac{0,0027}{0,40 \cdot 0,05}$; начиная с $H=0,20$ м величина этого члена исчисляется сотыми долями единицы. Таким образом, величины двух первых членов квадратной скобки пренебрегаемо малы по сравнению с числом $3/2$. Это означает, что ошибки измерения напора мало влияют на величину коэффициента расхода, что можно подтвердить и элементарным подсчетом величины m в зависимости от H .

Так, при изменении H на 20% (от 0,05 до 0,06 м) и $p_{в.б.}=1,0$ м изменение m составляет всего 1%. Вследствие чего формуле (2.6) можно придать вид

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3}{2} \frac{\Delta H}{H} + \frac{2(m_1 - 1)H}{m_1(H + p_{в.б.})} \frac{\Delta p_{в.б.}}{H} + \frac{\Delta b}{b} \quad (2.7)$$

Найдем ошибку определения расхода по этой формуле для благоприятного в смысле точности расчета случая. Пусть $H=1,0$ м, $p_{в.б.}=2,0$ м, $b=15$ м; величина ошибки ΔH будет определяться в основном ошибкой отсчета по гидрометрической штанге; так как измерение напора производится от гребня водосливной стенки, ошибка ΔH не превысит 0,01 м (в полевых условиях). Величины $p_{в.б.}$ и b нетрудно измерить с высокой степенью точности. Пусть

$\Delta p_{в.б.} = \Delta b = 0,01$ м. Подставляя в формулу (2.7) все значения аргументов, в том числе и коэффициент m_1 (равный в этом случае 1,04 [4]), получим

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3 \cdot 0,01}{2 \cdot 1,00} + \frac{2(1,04 - 1) \cdot 0,01}{1,043} \frac{0,01}{H1} + \frac{0,01}{15} \cong 1,6\%.$$

При малых значениях напора, например, при $H = 0,05$ м ошибка $\frac{\Delta Q}{Q}$ возрастает в основном за счет влияния первого члена формулы (условия лабораторных работ).

В этом случае при ошибке $\Delta p_{в.б.} = 0,001$ м и при $p_{в.б.} = 0,2$ м, $b = 1$ м, $\Delta p_{в.б.} = \Delta b = 0,001$ м имеем ($m_1 = 1,02$)

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,05} + \frac{2(1,02 - 1) \cdot 0,05 \cdot 0,001}{1,02 \cdot 0,25} \frac{0,001}{H0,05} + \frac{0,001}{1} = 3,1\%.$$

Таким образом, при таком малом значении напора как 0,05 м его высоту следует измерять с точностью не менее чем до 0,0005 м; тогда ошибка $\frac{\Delta Q}{Q}$ будет равно примерно 1,5 %.

Точность определения расхода незатопленным треугольным водосливом при угле выреза в стенке $\alpha = 90^\circ$ найдем, исходя из формулы

$$Q = 1,4H^{2,5} \quad (2.8)$$

Здесь напор H выражен в м, а расход Q – в м³/с.

Логарифмируя уравнение (2.8), а затем дифференцируя по H , получим

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 2,5 \frac{\Delta H}{H} \quad (2.9)$$

Большая величина ошибки $\frac{\Delta Q}{Q}$ получается при малом напоре. Так, при $H = 0,05$ м и $\Delta H = 0,001$ м.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2,5 \cdot 0,001}{0,05} = 5\%.$$

При $H=1,0$ м и $\Delta H=0,005$ м.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2,5 \cdot 0,005}{1,0} = 1,8\%.$$

Известно, что треугольный водослив по сравнению с прямоугольным является более точным измерителем расхода, так как при одном и том же расходе у треугольного больше H , а следовательно, меньше $\frac{\Delta H}{H}$. При использовании треугольных водосливов на стоковых станциях можно принять $\Delta H=4$ мм [5, 6]. Сюда входит инструментальная ошибка крючковой рейки, ошибки нивелирования нуля, разница в уровнях верхнего бьефа водослива и колодца самописца уровня, погрешность самописца уровня, ошибка за счет пульсации расхода и другие. В естественных условиях сказывается и влияние таких факторов, как ветер, развитие растительности и прочее.

Представляет большой интерес опыт эксплуатации гидрометрических водосливов Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории, где на основе натурных исследований доказано, что треугольные водосливы при напорах $H < 50$ мм должны подвергаться индивидуальной тарировке в полевых условиях. В противном случае погрешности в измеренных расходах могут достигать очень больших величин. Необходимо прежде всего иметь в виду непостоянство коэффициента расхода водослива при малых напорах. Запишем уравнение расхода треугольного водослива в общем виде

$$Q = 0,8m\sqrt{2gt}g\frac{a}{2}H^{3/2} \quad (2.10)$$

Формула (2.8) является частным видом этой формулы при коэффициенте расхода $m=0,40$ и $\alpha=90^\circ$.

Используя опытные данные И. Б. Вольфцуна, по формуле (2.10) подсчитаны $m=m(H)$, из которого видно, что только при $H > 70$ мм можно воспользоваться постоянным значением $m=0,40$. На рисунке 2.2 изображён график зависимости коэффициента расхода m от напора H треугольного

незатопленного водослива при угле выреза $\alpha=45^\circ$ по данным тарирования в полевых условиях.

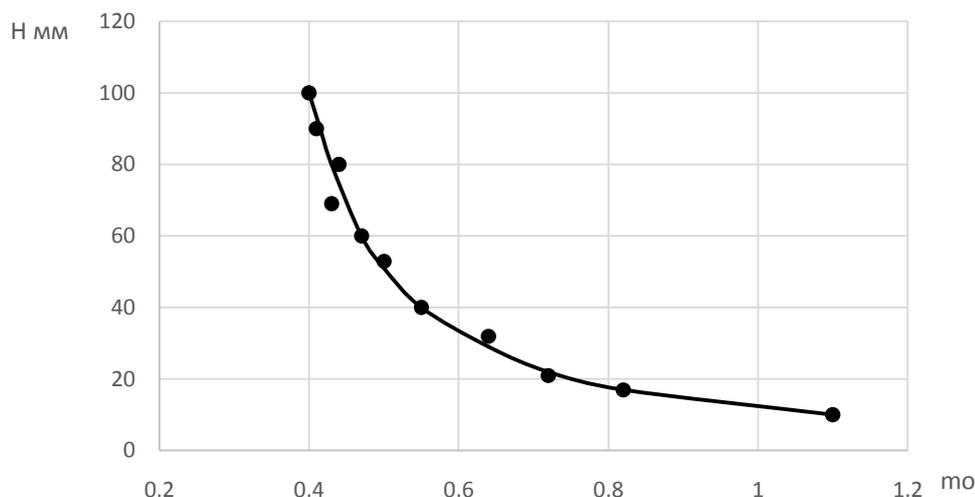


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента расхода m от напора H треугольного незатопленного водослива при угле выреза $\alpha=45^\circ$ по данным тарирования в полевых условиях.

Работа водослива при малых напорах осложняется нестабильностью формы истечения жидкости: в диапазоне напоров $66 \text{ мм} > H > 35 \text{ мм}$ истечение может происходить с отрывом и без отрыва струи от внешней стенки водослива; отрыв струи при возрастании расходов происходит при больших напорах, чем обратный процесс (прилипание струи) при уменьшении расходов. Прилипание струи наблюдались при $H < 35 \text{ мм}$. Все это приводит к тому, что отклонение точек на кривой $Q = Q(H)$, полученной тарировкой водослива объемным способом, может достигать 20-25%.

Наиболее сложны и разнообразны условия эксплуатации гидрометрических водосливов в ирригации, где они имеют очень большое распространение. Больше всего на точности измерения расходов в ирригационной практике сказывается заиливание верхнего бьефа. В таких условиях по данным В. В. Кошкина ошибки могут достигать 30%. По его же данным кривизна потока и сбойность течения, обуславливаемые кривизной русла в верхнем бьефе водослива, могут вызывать погрешности в расходах до 15%. Для измерения расходов воды потока, транспортирующие наносы, особенно донные, В. В. Кошкин [7] рекомендует применять водосливы

со съёмным порогом. После измерения расхода порог убирают, следовательно, создаваемый водосливом подпор не носит стационарного характера, что важно при эксплуатации дренажных каналов.

В ирригации получил широкое использование новый тип водослива, а именно, пропорциональный. Ниже рассматривается точность определения расходов воды таким водосливом.

Трапецеидальный, суживающийся кверху, водослив в определённых пределах его параметров работает, как пропорциональный, т.е. имеет линейную связь между расходом и напором. Теоретическая формула расхода такого водослива, предложенная Г. В. Железняковым, имеет вид

$$Q = m\sqrt{2g} \frac{b^{\frac{5}{2}}}{n^{\frac{2}{3}}} (0,05\theta - 0,025) \quad (2.11)$$

где $\theta = \frac{nH}{b}$ – безразмерный параметр водослива;

$$n = ctg\beta;$$

β – угол наклона боковых сторон водослива к его гребню.

На рисунке 2.3 показан пропорциональный водослив (трапецеидальный суживающийся кверху).

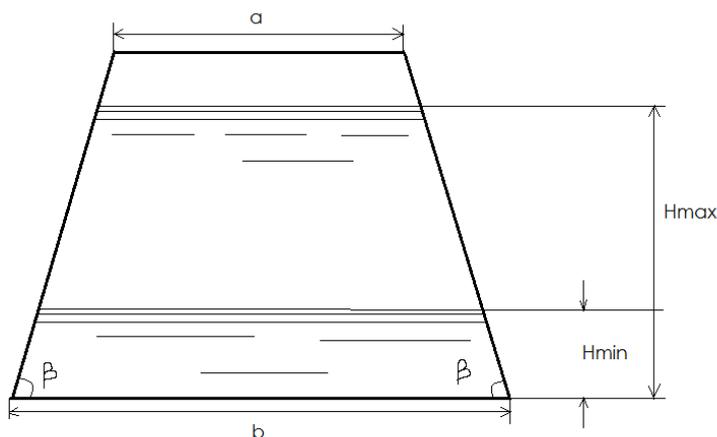


Рисунок 2.3 – Пропорциональный водослив (трапецеидальный суживающийся кверху).

Формула (2.11) справедлива при $0,45 \geq \theta \geq 0,15$, следовательно,

$$\theta_{min} = \frac{nH_{min}}{b} = 0,15, \theta_{max} = \frac{nH_{max}}{b} = 0,45.$$

Коэффициент расхода m определяется по формуле Г. В. Железнякова

$$m = 0,55 - 0,24\sqrt{\theta} \quad (2.12)$$

Найдем ошибку $\frac{\Delta Q}{Q}$ из формулы (2.11).

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dm}{m} + \frac{5}{2} \frac{db}{b} - \frac{3}{2} \frac{dn}{n} + \frac{0,50}{0,50\theta - 0,025} d\theta \quad (2.13)$$

Найдем теперь значение $\frac{dm}{m}$ из выражения (2.12)

$$\frac{dm}{m} = -\frac{0,24}{2m\sqrt{\theta}} d\theta = -\frac{0,12}{m\sqrt{\theta}} \quad (2.14)$$

Подставляя $\frac{dm}{m}$ по формуле (2.14) в формулу (2.13), получим

$$\frac{dQ}{Q} = \left(\frac{0,50}{0,50\theta - 0,025} - \frac{0,12}{m\sqrt{\theta}} \right) d\theta + \frac{5}{2} \frac{db}{b} - \frac{3}{2} \frac{dn}{n} \quad (2.15)$$

Из выражения для θ имеем

$$d\theta = \theta \frac{dn}{n} + \theta \frac{dH}{H} - \theta \frac{db}{b} \quad (2.16)$$

Подставляя $d\theta$ по формуле (2.16) в формулу (2.15), получим

$$\frac{dQ}{Q} = \theta \left(\frac{0,50}{0,50\theta - 0,025} - \frac{0,12}{m\sqrt{\theta}} \right) \left(\frac{dn}{n} + \frac{dH}{H} - \frac{db}{b} \right) + \frac{5}{2} \frac{db}{b} - \frac{3}{2} \frac{dn}{n} \quad (2.17)$$

Обозначим

$$\frac{0,50}{0,50\theta - 0,025} - \frac{0,12}{m\sqrt{\theta}} = \theta_m \quad (2.18)$$

Из формулы (2.17) после преобразований получим

$$\frac{dQ}{Q} = \theta_m \frac{dH}{H} - \left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m \right) \frac{dn}{n} + \left(\frac{5}{2} - \theta\theta_m \right) \frac{db}{b} \quad (2.19)$$

Выразим величину $\frac{dn}{n}$ через дифференциал линейных элементов отверстия водослива высотой c , из рис. 2.3 имеем

$$n = \frac{b - a}{2c} \quad (2.20)$$

откуда,

$$\frac{dn}{n} = \frac{db}{b - a} - \frac{da}{b - a} - 2 \frac{dc}{c} \quad (2.21)$$

Из формулы (2.21), подставляя величину $\frac{dn}{n}$ в формулу (2.19), получим

$$\begin{aligned}
\frac{dQ}{Q} &= \theta_m \frac{dH}{H} - \left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m\right) \left(\frac{db}{b-a} - \frac{da}{b-a} - 2\frac{dc}{c}\right) + \left(\frac{5}{2} - \theta\theta_m\right) \frac{db}{b} = \\
&= \theta\theta_m \frac{dH}{H} - \left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m\right) \frac{db}{b-a} + \left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m\right) \frac{da}{b-a} \\
&+ 2\left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m\right) \frac{dc}{c} + \left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m + 1\right) \frac{db}{bb}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Переходя от дифференциалов к ошибкам и принимая $\Delta a = \Delta b = \Delta c = \Delta s$, получим

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \theta\theta_m \frac{\Delta H}{H} + \left[\left(\frac{3}{2} - \theta\theta_m\right) \left(\frac{2}{b-a} + \frac{2}{c} + \frac{1}{b}\right) + \frac{1}{b}\right] \Delta s \tag{2.23}$$

Пусть $H=0,20$ м, $n=1,00$, $b=0,50$ м, $c=0,20$ м, $\theta = \frac{1,0 \cdot 0,20}{0,50} = 0,40$, $\Delta H=0,002$ м и $\Delta s=0,002$ м, $m=0,40$. Из формулы (2.20) найдем $a=b-2c=0,10$ м.

Подставив в формулу (2.23) численные значения входящих в нее величин, получим

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta Q}{Q} &= 0,40 \left(\frac{0,50}{0,50 \cdot 0,40 - 0,025} - \frac{0,12}{0,40 \cdot 0,63} \right) \frac{0,002}{0,2} + \left[\left(\frac{3}{2} - \frac{0,40 \cdot 0,50}{0,50 \cdot 0,40 - 0,025} + \right. \right. \\
&+ \left. \frac{0,40 \cdot 0,12}{0,40 \cdot 0,63} \right) \left(\frac{2}{0,40} + \frac{2}{0,20} + \frac{1}{0,50} \right) + \frac{1}{0,50} \left. \right] 0,002 = \left(\frac{0,20}{0,20 - 0,025} + \frac{0,05}{0,25} \right) 0,010 + \\
&\left[\left(1,5 - -1,1 + \frac{0,05}{0,25} \right) (5 + 10 + 2) + 0,02 \right] 0,002 = 0,008 + 0,024 = 3,2\% .
\end{aligned}$$

Заметное влияние на величину погрешности $\frac{\Delta Q}{Q}$ оказала ошибка линейных элементов водослива вследствие малых его размеров. Очевидно, величину этой ошибки легко уменьшить до нужного предела, например, до $\Delta s=0,001$ м. В этом случае величина $\frac{\Delta Q}{Q}$ составит $\frac{\Delta Q}{Q} = 0,008 + 0,012 = 2\%$.

В сложных условиях эксплуатации этих водосливов, также, как и других, точность измерений ими расходов понижается.

Расходы воды измеряются также и водосливами практического профиля, и широким порогом. Поскольку в формулу расхода таких водосливов

включается полный напор $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$, то и формула ошибки будет принимать абсолютно другой вид. Точность определения расходов воды водосливом практического профиля и с широким порогом найдем, считая, что водослив незатопленный и без бокового сжатия струи. Формула расхода в этом случае имеет вид

$$Q = mb\sqrt{2g} \left(H + \frac{v_0^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (2.24)$$

где v_0 – средняя скорость подхода к водосливу.

Коэффициент расхода воды принимаем в этом случае постоянным, учитывая, что при рассмотрении прямоугольного водослива с тонкой стенкой его влияние на точность было выяснено. Из формулы (2.24) имеем

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{db}{b} + \frac{3}{2} \frac{v_0}{\left(H + \frac{v_0^2}{2g} \right)} \left(dH + \frac{v_0}{g} dv_0 \right) \quad (2.25)$$

при переходе от дифференциалов к абсолютным ошибкам, получим

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3}{2} \frac{\Delta H}{H} + \frac{3}{2} \frac{v_0}{gH_0} \Delta v_0 + \frac{\Delta b}{b} \quad (2.26)$$

Подсчитаем ошибку $\frac{\Delta Q}{Q}$ для выгодного, в смысле точности Q , случая, то есть для большого значения H_0 , входящего в знаменатели первых двух членов формулы (2.26). При $H=2,5$ м и $v_0=1$ м/с получим $H_0 = 2,5 + \frac{1}{19,6} = 2,5 + 0,05=2,55$ м. Ошибку определения скорости подхода примем равной $\frac{\Delta v_0}{v_0} = 2\%$, откуда $\Delta v_0=1 \cdot 0,02=0,02$ м/с; учитывая возможность значительного набега воды

на гидрометрическую рейку при такой скорости подхода, примем $\Delta H=0,02$ м; $b=20$ м, $\Delta b=0,05$ м. Будем иметь

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,02}{2,5} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1,0 \cdot 0,02}{9,81 \cdot 2,5} + \frac{0,05}{20} = 0,012 + 0,0012 + 0,0025 + 1,7\%.$$

При сравнительно малых напорах порядка H 1 м и малых скоростях течения ошибка $\frac{\Delta Q}{Q}$ может увеличиться незначительно, так как можно повысить точность измерения напора. Что касается ошибки измерения скорости подхода, то для малых значений скорости эта ошибка может заметно возрасти, но так как сама скорость в этом случае мала, то влияние второго члена формулы (2.25) остается практически незаметным: так, при $H=1,0$ м, $v_0=0,10$ м/с, $\frac{\Delta v_0}{v_0} = 5,0\%$, $\Delta H=0,01$ м; $b=10$ м, $\Delta b=0,02$ м имеем

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01}{1,00} + \frac{3}{2} \cdot \frac{0,10 \cdot 0,005}{9,81 \cdot 1,0} + \frac{0,02}{100} \cong 1,8\%.$$

Большие ошибки при определении расходов водосливами могут быть обусловлены несовпадением коэффициентов m по лабораторным исследованиям с действительными коэффициентами, так как условия истечения жидкости при эксплуатации гидротехнических сооружений могут быть сложными.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДОВ ВОДЫ ВОДОСЛИВАМИ С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

Измерение расхода воды при помощи водослива относится к косвенному методу.

В гидравлической лаборатории кафедры гидрометрии Российского государственного гидрометеорологического университета использовались водосливы с тонкой стенкой, установленные на открытом участке русла модели со специальным успокоителем, имеющим перед водосливом систему решетчатых гасителей. Эксперименты проводились в гидравлическом лотке со стеклянными стенками высотой 40 см и длиной 250 см. Ширина лотка 50 см.

Объем воды в успокоителе из условия успокоения свободной поверхности воды перед водосливом равен не менее тридцати расходов.

Расход воды определялся положением уровня воды относительно порога (гребня) водослива. Так как перед водосливом наблюдается значительное понижение уровня, то измерение напора воды H на пороге водослива производилось с помощью шпигенмасштаба с ценой деления до 0,1 мм в створе, расположенном перед водосливом на расстоянии $l \geq (3 \div 5)H$. На контрольном водосливе треугольного профиля уровень воды измерялся так же с помощью шпигенмасштаба с ценой деления до 0,1 мм в створе, расположенном перед водосливом на расстоянии $l \geq (3 \div 5)H$.

Процесс измерения уровня воды с помощью шпигенмасштаба показан на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Измерения уровня воды шпиценмасштабом

Напор на водосливе H , необходимый для дальнейшего определения расхода воды, определялся по двум отсчетам по шпиценмасштабу

$$H = \nabla_1 - \nabla_0$$

где ∇_1 – отсчет уровня воды в опыте по шпиценмасштабу, мм;

∇_0 – отсчет по шпиценмасштабу, называемый «нулем водослива», при условии, что конец мерной иглы уровнемера располагается на отметке гребня водослива, мм.

«Ноль водослива» определялся с большой точностью заранее, до начала проведения основных опытов. Поскольку малая точность в определении «нуля»

может привести к значительным погрешностям в определении расходов, в особенности небольших.

Водосливы работали в условиях свободного истечения, были неподтопленными, когда уровни воды за водосливом не влияют на определяемый расход жидкости и напор на водосливе.

Эксперименты с водосливом трапецеидального профиля

На рисунке 3.2 показан водослив со стенкой трапецеидальной формы.



Рисунок 3.2 – Эксперименты с водосливом трапецеидального профиля

Перед началом эксперименты были определены «нули водослива»: для водослива трапецеидального профиля получено значение 33,01 см, для контрольного водослива треугольного профиля использовали известное

значение 7,7 см. Далее снимались измерения уровней воды на водосливе трапецидальной формы сечения и на контрольном водосливе треугольного профиля. После чего производился расчет напоров воды.

В таблице 3.1 показаны измеренные данные и напоры воды.

Таблица 3.1 – Расчет напора воды

№ п/п	Уровень воды трапецидального водослива, см	Уровень воды на контрольном водосливе, см	Напор воды трапецидального водослива, м	Напор воды на контрольном водосливе, м
1	31,70	11,65	0,0131	0,0395
2	31,21	12,55	0,0180	0,0485
3	30,29	13,85	0,0272	0,0615
4	29,15	15,33	0,0386	0,0763
5	28,45	16,11	0,0456	0,0841
6	27,58	17,22	0,0543	0,0952
7	26,77	17,80	0,0624	0,101
8	26,11	18,43	0,0690	0,107
9	25,95	18,61	0,0706	0,109
10	25,69	18,97	0,0732	0,113

После определения напора производились расчеты расхода воды на контрольном водосливе треугольного профиля по формуле (1.9) и расчеты расхода воды на водосливе трапецидального водослива по формуле (1.13). В формуле (1.13) $tg\theta$, характеризующий крутизну заложения боковых граней водослива, был рассчитан с помощью измеренных размеров трапеции при основании водослива и составил 0,262. Ширина водослива $b=15$ см. Коэффициент расхода m подбирался с помощью решения оптимизационной задачи и оказался равен $m = 0,42$, что соответствует справочным данным [4].

Далее рассчитывалась погрешность измерения расхода воды трапецеидального водослива, отклоняясь от измерения расхода воды на контрольном водосливе, по формуле:

$$\delta = \frac{Q_{к.в.} - Q_{в.}}{Q_{к.в.}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где $Q_{к.в.}$ – расход воды на контрольном водосливе треугольного профиля;
 $Q_{в.}$ – расход воды на водосливе трапецеидального/параболического профиля.

В таблице 3.2 показан расчет расхода и погрешности его определения.

Таблица 3.2 – Расчет расхода воды и ее погрешности

№ п/п	Расход воды на контрольном водосливе, м ³ /с	Расход воды на трапецеидальном водосливе, м ³ /с	δ , %
1	0,000434	0,000426	1,86
2	0,000725	0,000691	4,74
3	0,00131	0,00130	1,05
4	0,00225	0,00223	0,93
5	0,00287	0,00289	0,66
6	0,00391	0,00380	2,97
7	0,00454	0,00473	4,19
8	0,00528	0,00555	5,03
9	0,00550	0,00575	4,48
10	0,00597	0,00609	2,05
Среднее	–	–	2,80

По таблице 3.2 видно, что в среднем отклонение расходов воды, измеренных трапецеидальным водосливом, составляет 2,8 % от расходов воды, измеренных контрольным водосливом с треугольным профилем.

На рисунке 3.3 показан график зависимости $Q=f(H)$ для водослива трапецеидального профиля.

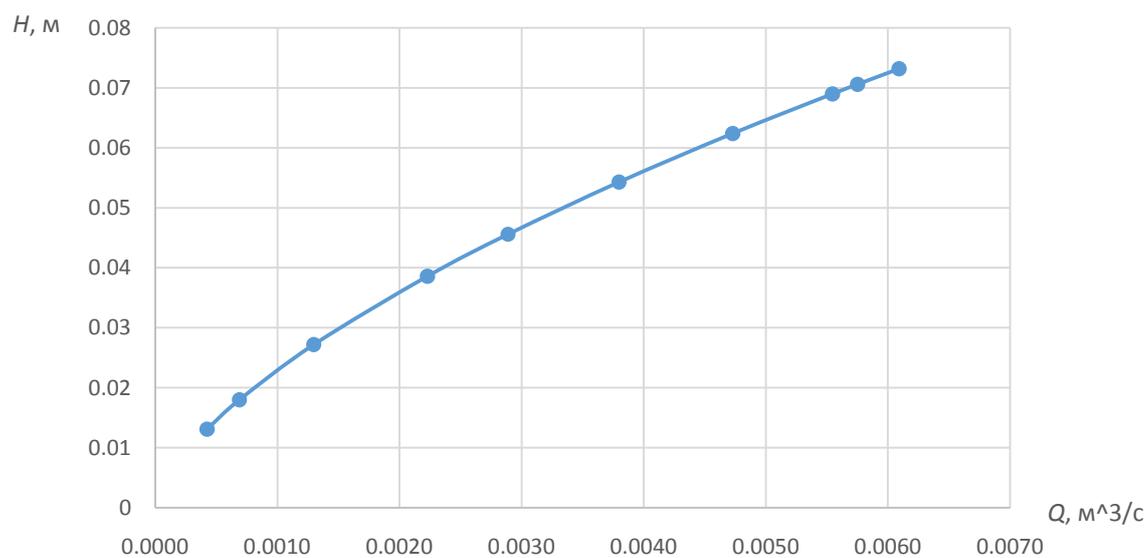


Рисунок 3.3 – График зависимости $Q=f(H)$ для водослива трапецеидального профиля.

Эксперименты с водосливом параболического профиля

На рисунке 3.4 показан эксперимент, проводимый с водосливом параболического профиля.

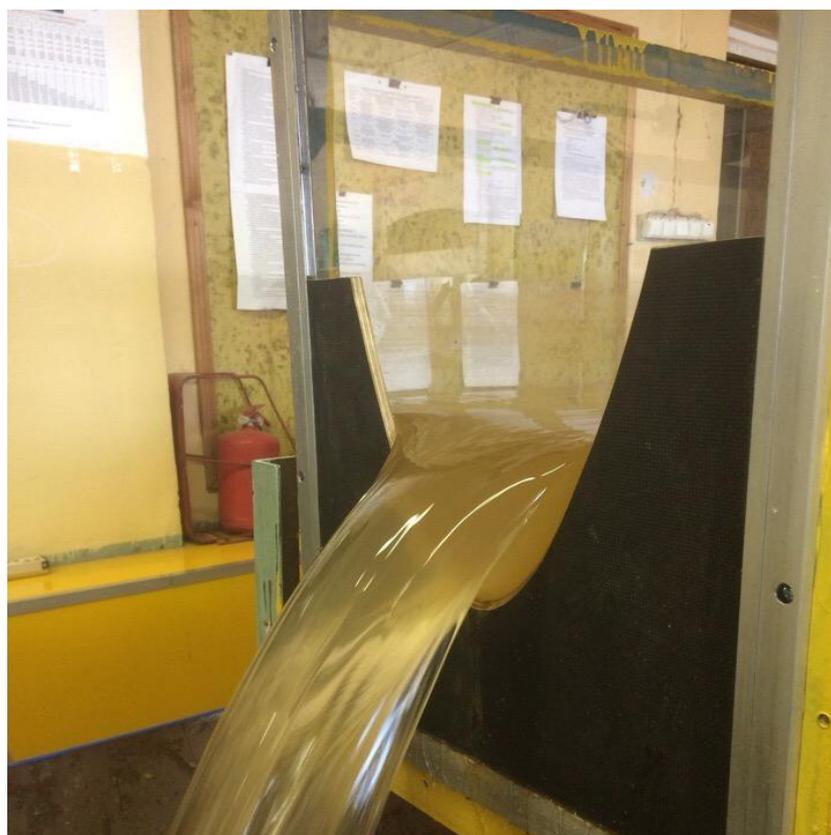


Рисунок 3.4 – Эксперименты с водосливом параболического профиля

«Нуль водослива» параболического профиля измерен перед началом эксперимента и составил 33,02 см. Проведены измерения уровня воды водослива параболического профиля и контрольного водослива треугольного профиля. После чего рассчитан напор на обоих водосливах.

Расчеты приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет напора воды

№ п/п	Уровень воды параболического водослива, см	Уровень воды на контрольном водосливе, см	Напор воды на параболическом водосливе, м	Напор воды на контрольном водосливе, м
1	28,8	11,95	0,0422	0,0425
2	28,5	12,15	0,0452	0,0445
3	27,55	13,01	0,0547	0,0531

№ п/п	Уровень воды параболического водослива, см	Уровень воды на контрольном водосливе, см	Напор воды на параболическом водосливе, м	Напор воды на контрольном водосливе, м
4	26,24	14,00	0,0678	0,0630
5	24,01	15,56	0,0901	0,0786
6	23,1	16,30	0,0992	0,0860
7	22,1	17,06	0,109	0,0936
8	21,31	17,61	0,117	0,0991
9	20,1	18,33	0,129	0,106
10	19,5	18,70	0,135	0,110

После определения напора произведены расчеты расхода воды на контрольном водосливе треугольного профиля по формуле (1.9) и расчеты расхода воды на водосливе трапецеидального водослива по формуле (1.16). Коэффициент расхода параболического водослива подобран с помощью решения оптимизационной задачи и оказался равен $M = 0,3$.

Расчет расхода воды приведен в таблице 3.4. Погрешность рассчитана с помощью формулы (3.1).

Таблица 3.4 – Расчет расхода воды и ее погрешности

№ п/п	Расход воды на контрольном водосливе, м ³ /с	Расход воды на параболическом водосливе, м ³ /с	δ , %
1	0,000521	0,000534	2,48
2	0,000585	0,000613	4,80
3	0,000910	0,000898	1,32

№ п/п	Расход воды на контрольном водосливе, м ³ /с	Расход воды на параболическом водосливе, м ³ /с	δ, %
4	0,00139	0,00138	1,12
5	0,00242	0,00244	0,44
6	0,00304	0,00295	2,78
7	0,00375	0,00358	4,67
8	0,00433	0,00411	4,96
9	0,00516	0,00501	2,91
10	0,00562	0,00548	2,40
Среднее	-	-	2,79

По таблице 3.4 видно, что в среднем отклонение расходов воды, измеренных параболическим водосливом, составляет 2,79 % от расходов воды, измеренных контрольным водосливом с треугольным профилем.

Для определения качества зависимости уровня воды от расхода для параболического водослива был построен график $Q=f(H)$.

На рисунке 3.5 показан график зависимости $Q=f(H)$ для водослива параболического профиля.

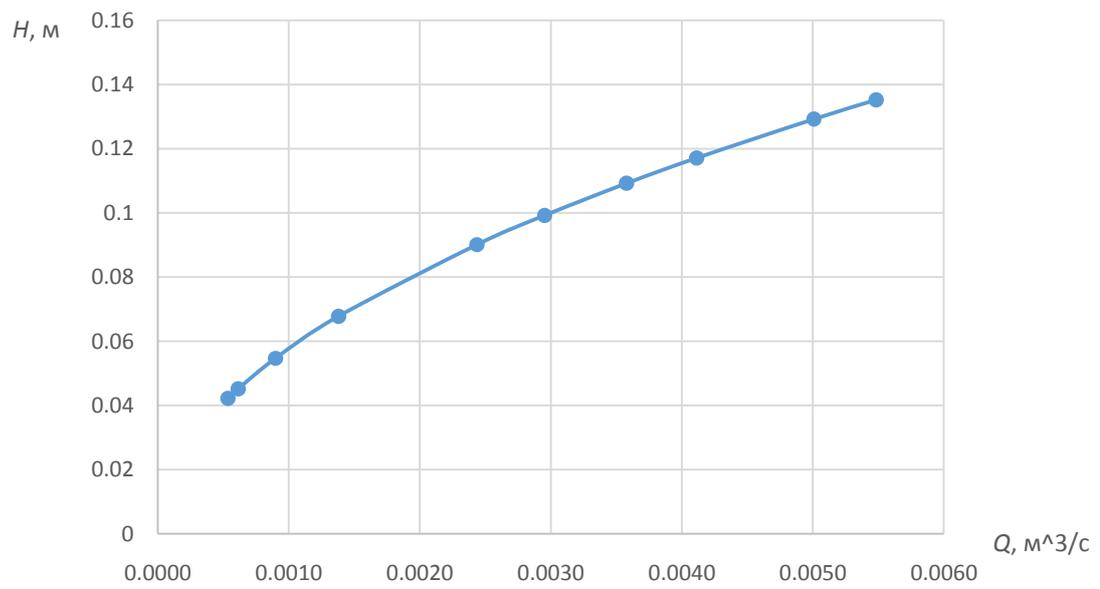


Рисунок 3.5 – График зависимости $Q=f(H)$ для водослива параболического профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований в работе решена задача оценки точности измерения расхода воды водосливами с тонкой стенкой различной формы (трапецеидальной и параболической).

Целью работы является оценка точности измерения расхода воды водосливами с тонкой стенкой. Для достижения поставленной цели изучена литература по данному вопросу и проведена серия лабораторных экспериментов.

При этом были решены следующие основные задачи:

1. Обобщена информация по водосливам с тонкой стенкой.
2. Теоретически исследована точность определения расходов воды незатопленными водосливами с тонкой стенкой.
3. Проведена серия лабораторных экспериментов для определения коэффициентов расхода водосливов.

При проведении экспериментальных исследований работы водосливов с тонкой стенкой получены следующие результаты:

- Определены коэффициенты расхода для водосливов трапецеидального и параболического профиля.
- Построены графики зависимости $Q=f(H)$ для исследуемых водосливов.

В результате проведенных экспериментов получено, что водосливы трапецеидального и параболического профиля при измерении малых расходов в лабораторных условиях дают значения расходов с точностью 2 %.

Из теоретических формул видно, что при одинаковой погрешности измерения напора на водосливе и одинаковых напорах воды относительная погрешность определения расхода воды треугольным водосливом больше, чем трапецеидальным. Однако, один и тот же расход воды через треугольный и трапецеидальный водослив будет проходить с разными напорами. При пропуске малого расхода воды на треугольном водосливе создается значительно больший напор, чем на трапецеидальном, и, следовательно,

относительная погрешность будет существенно меньше. Поэтому треугольные водосливы рекомендуются для измерения небольших расходов воды.

При больших расходах трапецеидальные и параболические водосливы обеспечивают большую точность измерения расхода воды, чем треугольные.

Преимуществом трапецеидального водослива при использовании его не в лабораторных условиях, а в каналах является то, что допустимый максимальный напор составляет 1 м [8]. Для сравнения допустимый максимальный напор для треугольного водослива составляет 0,4 м.

В качестве практических рекомендаций к использованию водосливов для определения расхода жидкости, измеряемого в открытых каналах, можно указать следующее. Чтобы получить надежные результаты измерений расходов, водосливы необходимо устанавливать с соблюдением правил:

1) перед подходом к водосливу поток должен протекать прямолинейно во избежание перекоса водной поверхности в отверстии водослива; ось потока должна совпадать с осью водослива;

2) уровень нижнего бьефа всегда должен быть ниже ребра водослива во избежание его подтопления;

3) под струю переливающейся воды должен быть свободный доступ воздуха;

4) края водосливного отверстия должны быть заострены, без вмятин и зазубрин, фаска среза должны быть обращена в сторону падения струи;

5) ребро прямоугольного и трапецеидального водосливов должно быть установлено горизонтально, а сама рамка водослива вертикально;

6) перед стенкой водослива не должно быть скоплений наносов и мусора;

7) водомерная рейка для определения величины напора располагается выше рамки водослива на расстоянии не менее $2H_{max}$; нуль рейки должен быть на одной отметке с порогом водослива.

Таким образом, цель выпускной квалификационной работы достигнута полностью, выполнены поставленные задачи, выработаны предложения по практическому использованию водосливов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения
2. Железняков Г.В., Данилевич Б.Б. Точность гидрологических измерений и расчетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 240 с.
3. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. Общий курс: Учебник для вузов. – К.: Выща школа, 1989. – 215 с.
4. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – М.: госэнергоиздат, 1961. – 124с.
5. Вольфцун И.Б., Квасов Д.Д. О точности учета стока гидрометрическими сооружениями на стоковых станциях // Труды ГГИ, вып. 62, 1957.
6. Вольфцун И.Б. О точности полевых измерений малых расходов тонкостенными треугольными водосливами // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VIII. – Л.: Гидрометеиздат, 1959.
7. Кошкин В.В. Водослив-водомер с тонкой стенкой и со съемным порогом // Гидротехника и мелиорация, № 11, 1962.
8. МИ 2406-97. Расход жидкости в безнапорных каналах систем водоснабжения и канализации. Методика выполнения измерений при помощи стандартных водосливов и лотков
9. Бейшекеев К.К., Сатаркулов С.С., Мамбетов Э.М. К вопросу совершенствования расходомеров с тонкими водосливами // Актуальные вопросы современной науки. 2016. № 47. – С. 228-234.
10. Батыкова А.Ж. Усовершенствованные конструкции водоучета на водомерных сооружениях с водосливами // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2015. Т. 15. № 3. – С. 159-162.
11. Садыбакова Д.К. К вопросу оценки пропускных способностей водосливов с тонкой стенкой // Вестник КГУСТА. 2017. № 2 (56). – С. 176-180.