

Н. М. Балаескул, В. Б. Хейман

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛОТКОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ГИДРОМЕТРИИ

Из целиковых методов определения расходов на каналах и малых естественных водотоках большое распространение получили измерения с помощью гидрометрических лотков.

В нашей стране лотки нашли широкое применение в ирригации [3, 4], а также в промышленной и коммунальной канализации [1, 8]. Эти сооружения обладают рядом преимуществ по сравнению с другими водосливными устройствами.

Лотки в зависимости от их габаритов применяются для большого диапазона расходов. Так, определяемые с помощью лотка Паршалла расходы могут изменяться от 0,010 до 80 м<sup>3</sup>/сек при сохранении достаточно высокой точности измерения [4].

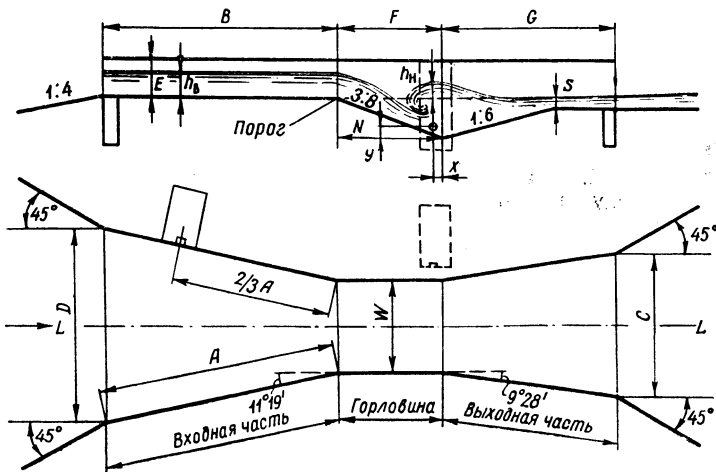


Рис. 1. Схема лотка Паршалла.

Лоток работает с очень небольшими потерями напора: при свободном истечении через лоток Паршалла потеря напора в четыре раза меньше, чем в водосливах [2, 4]. Гораздо меньше потери напора и при затопленном режиме.

Влекомые наносы свободно проходят через лоток, не отлагаясь в верхнем бьефе. Скорость подхода мало влияет на результаты измерения.

При свободном истечении расход является лишь функцией глубины

над порогом, измеряемой в определенной точке входной части лотка. Для фиксации глубины можно применить обычный самописец уровней или дистанционную установку.

Гидрометрические лотки одновременно могут служить и смесителями [5, 12]. Разработана конструкция лотка, позволяющая использовать турбулентность потока для перемешивания химических веществ. Для ирригационных систем часто конструируются лотки, обеспечивающие одновременно учет и регулирование подачи расхода воды [3].

В современных условиях мелиорации осушительные сети недостаточно оснащены гидрометрическими сооружениями для непрерывного учета расходов воды. Вместе с тем для эксплуатационной гидрометрии мелиоративных систем гидрометрические лотки являются весьма рациональными измерительными устройствами (малые подпоры, слабая заиляемость верхнего бьефа, возможность непрерывного учета стока, большой диапазон измеряемых расходов). По-видимому, можно конструировать лотки-шлюзы и использовать сооружения для учета и спорадического обратного регулирования (шлюзования).

Наибольшее распространение в практике получили лотки Вентури и уже упоминавшиеся лотки Паршалла.

В основе работы лотка Вентури лежит связь между расходом и перепадом давления, создаваемым сужением открытого канала [15]. Снижение уровня определяется по разности глубин над горизонтальным дном.

Таблица 1

| Конструктивные элементы водомера Паршалла                            | Правила для подбора конструктивных элементов                                    |
|--|---|
| <b>Переменные элементы</b>   |   |
| Ширина горловины $W$ (ширина порога), $м$                            | Выбирается в зависимости от максимального расхода и других условий эксплуатации |
| Длина входной части по оси лотка, $м$                                | $B = 0,5 W + 1,20$  |
| Ширина входа, $м$ . . . . .  | $D = 1,2 W + 0,48$  |
| Ширина выхода, $м$ . . . . .   | $C = W + 0,30$  |
| Боковая стенка входной части, $м$ . . . . .                          | $A = \frac{B}{\cos \alpha} = 1,02B$   |
| Расстояние от порога горловины до водомерного колодца, $м$ . . . . . | $L = \frac{2}{3} A$   |
| <b>Постоянные элементы</b>   |   |
| Угол между боковой стенкой входной части и осью лотка . . . . .      | $\alpha = 11^{\circ}19'$  |
| Угол между боковой стенкой выходной части и осью лотка . . . . .     | $\beta = 9^{\circ}28'$  |
| Уклон дна горловины . . . . .  | $I_{д.г} = 0,375, N = 0,225 м$  |
| Обратный уклон дна выходной части лотка                              | $I_{вых} = 0,167, s = 0,075 м$  |
| Длина выходной части по оси лотка, $м$                               | $G = 0,92$  |
| Длина горловины по оси лотка, $м$ . . . . .                          | $F = 0,60$  |
| Высота боковых стенок . . . . .                                      | $\epsilon > h_B на 0,15 м$  |
| Угол между открылками входной части и осью потока . . . . .          | $\gamma = 45^{\circ}$   |

Лоток Паршалла создан в результате многолетних экспериментов и дальнейшего усовершенствования лотка Вентури [9, 10, 11]. При свободном истечении на гребне горловины лотка устанавливается критическая глубина, а в выходной его части формируется гидравлический прыжок.

Паршаллом разработан ряд конструктивных правил, при выполнении которых действительны формулы для вычисления расхода, полученные опытным путем.

На рис. 1 представлена схема лотка Паршалла, а в табл. 1 — нормативные требования к соотношению между конструктивными элементами.

Для создания нормального режима работы лотка, согласно исследованиям Паршалла, участок канала должен быть прямолинейным на протяжении не менее 15 м до лотка и 20 м после него. Несоблюдение этого условия приводит к неправильному распределению скоростей в зоне сооружения и несоответствию истинного расхода, вычисленному по эмпирической формуле Паршалла.

Следует отметить, что в канализационных системах вследствие тесной компоновки сооружений в плане требования, предъявляемые к установке лотков, часто не соблюдаются, что в значительной мере отражается на точности учета стока.

1. *Аналитические зависимости.* Для условий свободного истечения формула Паршалла записывается в виде

$$Q = 0,372W \left[ \frac{h_b}{0,305} \right]^{1,569W^{0,026}}, \quad (1)$$

где  $W$  — ширина горловины, м;  $h_b$  — глубина воды над порогом, измеренная в успокоительном колодце верхнего бьефа на расстоянии  $\frac{2}{3}A$ , м;  $Q$  — расход, м<sup>3</sup>/сек.

Свободное истечение имеет место, если коэффициент затопления

$$k = \frac{h_n}{h_b} < 0,7, \quad (2)$$

где  $h_n$  — глубина воды над тем же порогом, измеренная в выходной части сооружения (в конце горловины), м.

При  $k > 0,7$  истечение с порога подтопленное. В этом случае

$$Q' = Q - q. \quad (3)$$

Значение поправки  $q$  определяется по формуле

$$q = 0,0746 \left\{ \left[ \frac{h_b}{\left( \frac{0,928}{k} \right)^{1,8} - 0,747} \right]^{4,57 - 3,14k} + 0,093k \right\} W^{0,815}, \quad (4)$$

где  $k$  — степень затопления струи. Для  $k > 0,95$  точность формулы (4) резко падает.

Формулы (1) и (4) являются эмпирическими и выведены на основе большого количества экспериментов. Для облегчения пользования формулами (1) и (4) нами построены номограммы. Формула (1) может быть приведена к канонической форме Коши. Для нее построена номо-

грамма из выравненных точек (рис. 2) [6]. На номограмме показано решение примера. Дано:  $W=1,0$  м;  $h_b=0,3$  м. Ответ:  $Q=0,370$  м<sup>3</sup>/сек.

Для формулы (4) построена номограмма из равноудаленных точек (рис. 3). При построении номограммы использованы методы, разработанные Г. С. Хованским [7]. Способ пользования номограммой покажем на примере. Дано:  $W=1,0$  м;  $h_b=0,7$  м;  $k=0,8$ . Найти  $q$ .

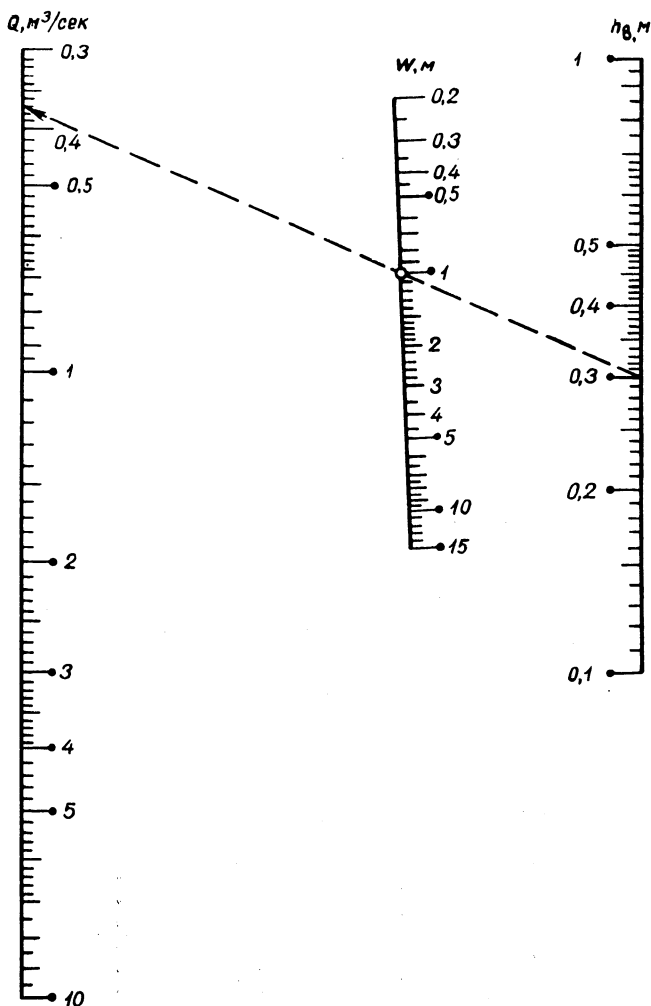


Рис. 2. Номограмма для определения расходов в лотке Паршалла при свободном истечении (формула (1)).

В поле  $(h_b, k)$  номограммы находим точку, соответствующую значениям  $h_b=0,7$  и  $k=0,8$ . Приняв эту точку за центр, проводим дугу от точки шкалы  $W$  с пометкой  $1,0$  до точки пересечения со шкалой  $q$ . На шкале  $q$  читаем ответ:  $q=0,128$  м<sup>3</sup>/сек.

2. Новые исследования в области применения лотка Паршалла. Приведенные формулы Паршалла применимы для строго определен-

ных, так называемых стандартных ширин горловины в диапазоне от 1 дюйма до 50 футов (0,025 м ÷ 15,2 м).

Стандартные ширины горловины по Паршаллу приведены в табл. 2.

В связи со строгой стандартизацией ширин использование лотков других размеров, не указанных Паршаллом, на практике затруднительно.

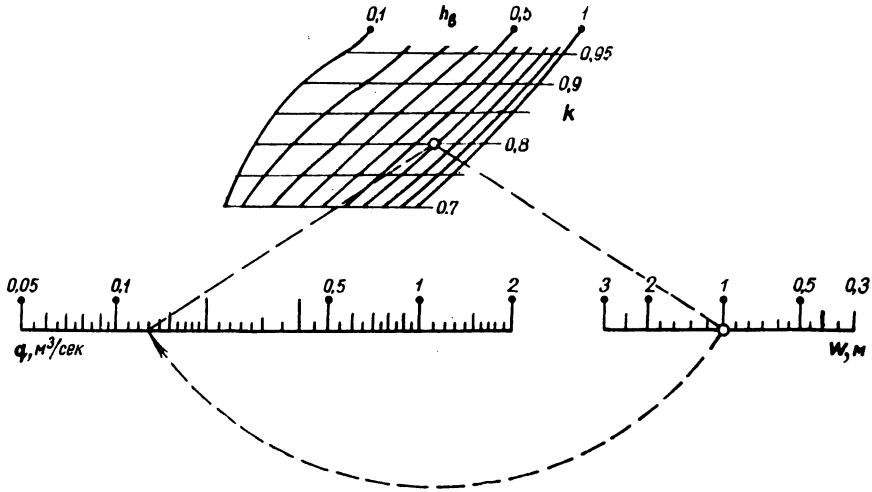


Рис. 3. Номограмма для определения поправки к расходу в лотке Паршалла при условии подтопления (формула (4)).

В последнее время предпринимались неоднократные попытки теоретически обосновать для лотка Паршалла зависимость расходов и глубин в верхнем бьефе. В результате этих поисков Дэвисом [13, 14] выведено уравнение, связывающее расход и глубину для всех лотков ши-

Таблица 2

| Ширина горловины |       |             |      |
|------------------|-------|-------------|------|
| Дюймы, футы      | м     | Дюймы, футы | м    |
| 1"               | 0,025 | 4'          | 1,22 |
| 2"               | 0,050 | 6'          | 1,83 |
| 3"               | 0,075 | 8'          | 2,44 |
| 6"               | 0,152 | 10'         | 3,05 |
| 9"               | 0,228 | 12'         | 3,66 |
| 1'               | 0,305 | 20'         | 6,10 |
| 2'               | 0,610 | 40'         | 12,2 |
| 3'               | 0,914 | 50'         | 15,2 |

риной от 1 дюйма до 50 футов. По мнению Дэвиса, согласованность между этим уравнением и опубликованными Паршаллом данными позволит использовать лотки нестандартных размеров и расширить область применения этого типа измерительных устройств.

Вывод уравнения Дэвиса основан на анализе методом размерностей. Все величины, входящие в уравнение, даны в безразмерном выражении (взяты в отношении к ширине горловины). При выводе уравнения Дэвис исходит из предположения, что в измеряемом сечении

имеет место параллельный однородный поток, для которого величина удельной энергии выражается в виде

$$E_1 = Y_1 + \frac{Q_1^2}{2gY_1^2W_1^2} \quad (5)$$

или

$$E_1 = Y_1 + \frac{Q_1^2}{2gY_1^2(W + 0,4X_1)^2}, \quad (6)$$

где  $E_1$  — величина удельной энергии сечения;  $Y_1$  — глубина воды в измеряемом сечении над порогом;  $X_1$  — расстояние по оси лотка от гребня до сечения;  $W$  — ширина горловины;  $Q$  — расход;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Выражая все величины равенства (6) в безразмерном виде (в отношении к ширине горловины  $W$ ), получаем

$$E_0 = Y_0 + \frac{Q_0^2}{2Y_0^2(1 + 0,4X_0)^2}. \quad (7)$$

На основании эмпирических данных Дэвисом найдены величины  $Q_0$  и  $E_0$  при различных значениях  $X_0$  и  $Y_0$  и установлена зависимость между ними для лотков любых размеров в виде

$$E_0 = 1,351Q_0^{0,645}. \quad (8)$$

Приравнивая правые части уравнений (7) и (8), получаем уравнение Дэвиса

$$Y_0 + \frac{Q_0^2}{2Y_0^2(1 + 0,4X_0)^2} = 1,351Q_0^{0,645}, \quad (9)$$

где

$$Y_0 = \frac{h_b}{W}; \quad (10)$$

$$X_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{(0,5W + 1,2)}{W}. \quad (11)$$

Согласно данным Дэвиса, уравнение (9) может использоваться для подсчета расходов по лоткам любых размеров (не только стандартных, но и промежуточных). Дэвисом также высказано предположение, что это уравнение может использоваться и для корректировки тарировочных кривых лотков стандартных размеров, в которых остальные элементы не соответствуют установленным правилам.

Искомый расход определяется из соотношения

$$Q = Q_0g^{1/2}W^{3/2}. \quad (12)$$

Сопоставление результатов, получаемых по формулам Паршалла и Дэвиса, показывает, что максимальное отклонение величин расходов,

найденных по формуле (9), от значений расходов по Паршаллу не превышает  $\pm 4,9\%$ .

Формула Паршалла представляет собой чисто эмпирическую зависимость, уравнение Дэвиса является более общим, ибо оно выведено на основании теоретического анализа гидравлики потока в лотке и экспериментальных данных. Весьма близкая сходимость результатов по Паршаллу и уравнению (9), полученная Дэвисом для стандартных ширинок горловины, а нами проверенная для диапазона ширинок от 0,50 до 10 м при различных вариациях глубин в верхнем бьефе  $h_b$ , позволяет сделать следующие выводы.

1. При условии свободного истечения формулы Паршалла (1) и Дэвиса (9) дают тождественные результаты, вследствие чего формула Паршалла (1) может с успехом применяться для расчета расходов по лоткам любых размеров (стандартных и нестандартных).

2. Расчеты лотков следует вести по номограммам для формул Паршалла (1) и (4), приводимым на рис. 2, 3.

3. В случае применения лотков нестандартных размеров и нарушения конструктивных требований следует применять формулу Дэвиса как более общую. Обязательным условием для таких лотков является наличие прямых участков достаточной длины до и после лотка.

4. При нарушении конструктивных требований и правил установки лотка в канале зависимость расходов и глубин  $Q=f(h_b)$  должна устанавливаться путем тарировки сооружения.

5. Учитывая тщательную разработанность конструктивных элементов лотка Паршалла и достоверность результатов измеряемых им расходов, необходимо широко внедрять лотки Паршалла и в условиях мелиорации. Возможно, что это потребует некоторой модификации конструкции и соответствующей экспериментальной проверки гидравлических показателей.

#### Литература

1. Ботук Б. О. Лоток Паршалла. «Водоснабжение и санитарная техника», 1937, № 8.
2. Израильсэп О. Теория и практика ирригации. Пер. с англ. М., 1956.
3. Попова В. Я. Сооружения для распределения и учета воды при орошении. М., 1966.
4. Саенко Г. И. Руководство и таблицы для ирригационных водомеров Паршалла. М., 1947.
5. Терновцев В. Е. Исследование процесса смешения в открытом турбулентном потоке с вводимым в нее реагентом. Автореф. дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Киев, 1966.
6. Хованский Г. С. Методы номографирования. М., 1964.
7. Хованский Г. С. Приспособляемые номограммы из равноудаленных точек. Сб. «Номографический сборник», № 4. М., 1967.
8. Яковлев С. В. и др. Вспомогательные устройства очистных канализационных станций. М., 1955.
9. Parshall R. Parshall Flume of Large Size. Colo. Agr. Expt. Sta. Bull. 386, 1932.
10. Parshall R. The Parshall Measuring Flume. Colo. Arg. Expt. Sta. Bull. 423, 1936.
11. Parshall R. Measuring Water in Irrigation Channels. U. S. D. A. Farmers Bull., 1683, 1932, Revised October 1941.
12. Ryan A. L., Morgan C. L. Modified Parshall Flume Combines Measuring and Mixing. Engineering news-Record, v. 140, № 18, April 29, 1949.
13. Davis S. Unification of Parshall Flume Data. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Proceedings of the American Soc. of Civil Engineers. Dec. 1961.
14. Davis S. Unification of Parshall Flume Data. Discussion Journal of the Irr. and Drain. Div. Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng., June, 1963.
15. Novak V. Zlabový venturimetr—měřič průtoků. „Jemna mechanika a optika“, 1961, t. 6, № 1.