

Х. А. НАВОЯН

ОБ УТОЧНЕНИИ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА СИСТЕМЫ КОРОТКИХ НАПОРНЫХ ТРУБ ПРИ ЗАТОПЛЕННОМ ИСТЕЧЕНИИ

В соответствии с нормативными положениями [1], перепад z в напорных трубах определяется по формуле (рис. 1):

$$z = \frac{Q^2}{2g\omega^2\omega_c^2} \quad (1)$$

где ω — площадь поперечного сечения трубы;

ω_c — коэффициент расхода системы, определяемый в рассматриваемом случае по формуле

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c}}; \quad (2)$$

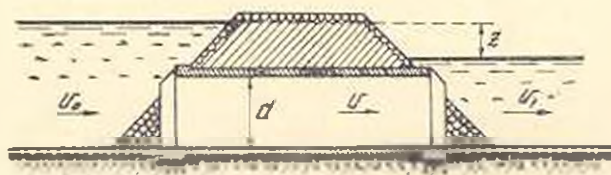


Рис. 1.

ζ_c — коэффициент сопротивления системы.

Для определения коэффициента сопротивления системы имеем соотношение:

$$\zeta_c = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \zeta_{\text{тр}} \quad (3)$$

где $\zeta_{\text{вх}}$ — коэффициент сопротивления при входе в трубу, равный 0,04—0,50, в зависимости от плавности входа;

$\zeta_{\text{тр}}$ — коэффициент сопротивления при выходе из трубы, определяемый по формуле Борда:

$$\zeta_{\text{тр}} = \left(1 - \frac{v_1}{v}\right)^2 \quad (4)$$

v — скорость течения в трубе; v_1 — скорость течения в канале ниже трубы;

ζ_1 — коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора по длине трубы, равный

$$\zeta_1 = \lambda \frac{l}{d} \quad (5)$$

где l — длина трубы; d — диаметр трубы; λ — коэффициент, определяемый по эмпирическим формулам.

Для бетонных и железобетонных труб в среднем принимается $\lambda = 0,020 - 0,022$. Расчет по зависимости (2) приводит к ошибкам при определении расхода или напора z .

Покажем это на числовом примере.

Пример 1. Трубчатый водовыпуск круглого поперечного сечения устраиваемый в теле бетонной плотины ($\lambda = 0,020$) имеет размеры $d = 3,0$ м, $l = 9,0$ м. Водовыпуск выходит в прямоугольный канал шириною $b = 3,0$ м и глубиною наполнения $h = 3,14$ м; дно выходного сечения водовыпуска и канала имеет одну и ту же отметку; расход

$$Q = 14,1 \frac{\text{м}^3}{\text{сек.}}$$

вход в трубу устроен в виде раструба с плавнотрапециевидными кромками:

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,04.$$

Решение:

Площадь поперечного сечения круглой трубы $\omega = 7,06$ м².

Площадь поперечного сечения канала $\omega_1 = b \cdot h = 9,42$ м².

Скорость течения в трубе

$$v = \frac{Q}{\omega} = 2,0 \frac{\text{м}}{\text{сек.}}$$

Скорость течения в канале

$$v_1 = \frac{Q}{\omega_1} = 1,50 \frac{\text{м}}{\text{сек.}}$$

По формуле (4):

$$\zeta_{\text{сж}} = \left(1 - \frac{v_1}{v}\right)^2 = 0,0625.$$

По формуле (5):

$$\zeta_1 = \frac{\lambda l}{d} = 0,06.$$

По формуле (3):

$$\zeta_{\text{с}} = 0,04 + 0,0625 + 0,06 = 0,1625.$$

По формуле (2):

$$p_c = \sqrt{\frac{1}{\zeta_{\text{с}}}} = 2,48.$$

Неточность в вышеприведенном расчете является результатом неучета необходимого напора (энергии) для создания скорости v_2 за напорным водоводом; пользования для определения потерь на выходе зависимостью Борда для внезапного расширения, которая правильна в применении к двум напорным водоводам, но не применима для случая безнапорных водоводов и при переходе из напорного в безнапорный, так как основные положения, лежащие в основе вывода зависимости Борда не применимы к безнапорным водоводам (см например, Кригер и Джестин. Гидроэнергетический справочник, ч. 1)

Перед тем, как перейти к выводу правильной зависимости по определению коэффициента расхода системы, установим зависимость по определению потерь на выход. Для установления картины распределения давлений, а так же изучения явлений при выходе из трубы, нами проводились экспериментальные исследования. Схема лабораторной установки, которая приводится на рис. 2, очень проста и не требует дополнительных пояснений.

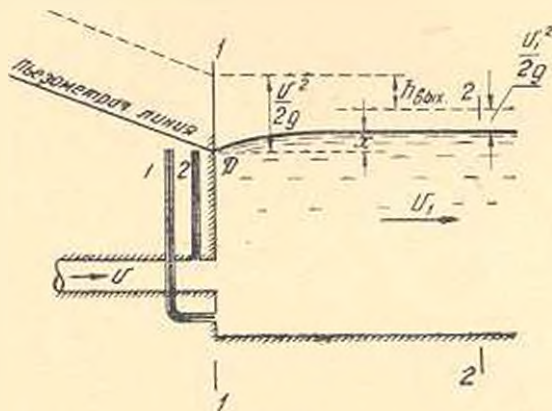


Рис. 2.

Экспериментальными исследованиями было установлено что:

1. Пьезометрическая линия упирается в точку D свободной поверхности потока в водоводе за трубой. Показания пьезометров, установленных в самом конце напорного водовода (1) и в начале отводящего русла (2) при всех расходах имели одно и то же значение.

2. Непосредственно за трубой (точка D) происходило понижение горизонта воды по сравнению с таковым в отводящем русле, то есть происходило частичное восстановление кинетической энергии в потенциальную.

Написав уравнение Бернулли (рис. 2) для сечения 1-1 и 2-2, легко найдем:

$$h_{\text{вых}} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} - x, \quad (7)$$

где: x — величина восстановления, определение которой будет изложено ниже.

Выведем зависимость по определению коэффициента расхода системы. Напишем уравнение Бернулли для сечений 0—0 и 1—1 относительно плоскости сравнения $N-N$ (рис. 3):

$$H_1 + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = H_2 + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_w, \quad (8)$$

где

$$h_w = h_{\text{вх}} + \Sigma h_l + \Sigma h_{\text{пов}} + h_{\text{вых}}, \quad (9)$$

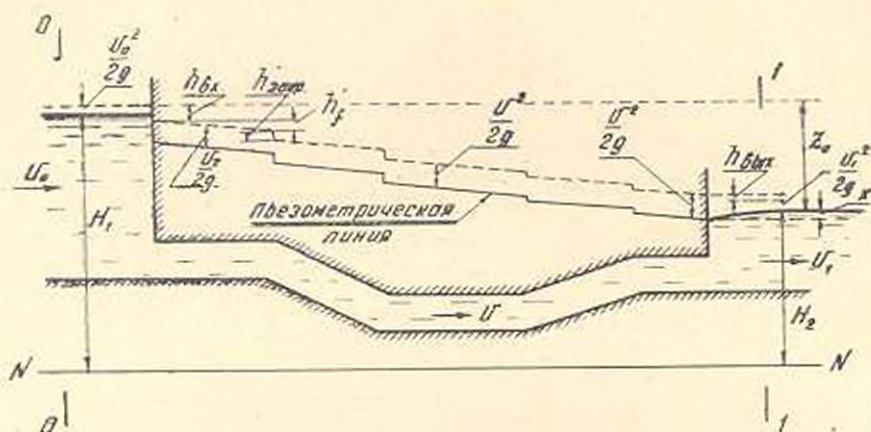


Рис. 3.

Потери при входе, на поворотах, на трение можно выразить формулой:

$$h_l = \zeta_l \frac{v^2}{2g}. \quad (10)$$

Подставляя соответствующие значения из 7) и (10) в (9), находим

$$h_w = \zeta_c \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} - x. \quad (11)$$

В этих выражениях

ζ_l — коэффициент данного вида сопротивлений.

ζ_c — коэффициент сопротивления системы, за исключением сопротивления при выходе.

Непосредственно из рисунка следует:

$$H_1 - \frac{v_0^2}{2g} - H_2 = z_0. \quad (12)$$

Подстановка соответствующих значений из (11) и (12) и (8) дает:

$$z_0 + x = \zeta_c \frac{v^2}{2g} - \frac{v^2}{2g}.$$

откуда имея в виду, что $Q = v \cdot \omega$, находим

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_w}} \cdot \sqrt{2g(z_0 + x)}$$

или

$$Q = \mu_c \cdot \sqrt{2g(z_0 + x)} \quad (13)$$

и следовательно

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}} \quad (14)$$

Единица, находящееся под корнем зависимости (14), является суммой коэффициентов сопротивлений на выход и на создание скорости v_1 за напорным водотоком. Таким образом сумма этих двух коэффициентов всегда постоянна и равна единице.

При пользовании зависимостью Борда, как это будет показано ниже, сумма этих двух коэффициентов есть переменная величина, имеет минимальное значение равное 0,5.

Предположим поток из напорного водотока выходит в бассейн больших размеров, тогда $v_1 = 0$, и член $\frac{v_1^2}{2g}$ одновременно отпадает как из зависимости (11), так и из (8), и в результате приходим к зависимости (13). Если же предположить, что сечение за напорным водотоком такое же как сечение самого напорного водотока и следовательно скорости в них одинаковы (случай истечения в атмосферу), то по (11).

$$h_w = \zeta_c \frac{v^2}{2g} = x. \quad (15)$$

Кроме того в этом случае, как это следует из зависимостей (18) и (19), $x = 0$.

Подстановка значения из (15) в (8) и заменой значения v , через v_1 мы придем снова к зависимостям (13) и (14). Таким образом устанавливаем, что коэффициент расхода системы во всех случаях определяется по (14), и что он не зависит от скорости за напорным водотоком.

Далее, как это следует из изложенного, коэффициент расхода системы не зависит ни от скорости и ни от расхода в напорном водотоке, является постоянной величиной для рассматриваемого водотока и зависит только от геометрических размеров и конструкций его.

Пример 2. По данным примера 1, определить коэффициент расхода системы по предлагаемой зависимости (14).

Имеем: $\zeta_1 = 0,06$, $\zeta_{\text{ст}} = 0,04$. Коэффициент сопротивления системы в рассматриваемом случае

$$\zeta_c = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_l = 0,04 + 0,06 = 0,10.$$

По (14)

$$\mu_c = \frac{1}{1 + \zeta_c} = \frac{1}{1 + 0,10} = 0,953.$$

Величину „восстановления“ x (рис. 2), или, что тоже самое, понижение уровня отводящего русла непосредственно у выхода из трубы, можно найти из закона количества движения.

Для простоты выводов будем полагать, что отводящее русло имеет прямоугольное поперечное сечение.

Составляя уравнение изменения проекции количества движения для сечения 1—1 (непосредственно в конце напорного водовода) и 2—2 (сечение отводящего русла, где влияние явления восстановления исчезает, то есть сечение правее конца кривой подпора), можно получить следующую зависимость

$$\frac{\gamma Q}{g} \cdot \frac{Q}{bh_0} - \frac{\gamma Q \cdot Q}{g\omega} = \frac{\gamma b (h_0 - x)^2}{2} - \frac{rb A^2}{2}, \quad (15)$$

Подставляя значение Q из (13) в (16), после преобразований, найдем

$$2h_0 x - x^2 = 2(z_0 + x)A, \quad (17)$$

где

$$A = 2\mu_c^2 \frac{\omega}{b} \left(1 - \frac{\omega}{bh_0} \right). \quad (18)$$

Из (17), найдем

$$x = \frac{2Az_0}{(h_0 + A) + 1} \frac{1}{(h_0 - A)^2 - 2Az_0}. \quad (19)$$

В зависимостях (16) — (19) приняты следующие обозначения:

γ — объемный вес жидкости; b — ширина прямоугольного отводящего русла; h_0 — глубина потока в отводящем русле; ω — площадь поперечного сечения трубы; g — коэффициент расхода системы, определяемый по (14); z_0 — разность уровней верхнего бьефа и отводящего русла.

Покажем, что даже при правильном применении уравнения Бернулли, учет потерь энергии на выход по Борда также приводит к невязкам.

Уравнение Бернулли (8) с учетом (12) можно переписать в следующем виде

$$z_0 = \frac{v_1^2}{2g} + h_w. \quad (20)$$

Для того, чтобы получить зависимость для расхода в виде (1) обозначим член $\frac{v_1^2}{2g}$ уравнения (20), который условно назовем „потерей“ энергии на создании скорости v_1 за напорным водотоком, через h_v и запишем его следующим образом:

$$h_v = \frac{v_1}{2g} - \left(\frac{v_1}{v} \right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (21)$$

По аналогии с (10) можно написать

$$h_v = z_v \frac{v^2}{2g}, \quad (22)$$

где

$$z_v = \left(\frac{v_1}{v} \right)^2. \quad (23)$$

Назовем z_v — коэффициентом „сопротивления“ на создание скорости за напорным водотоком.

Имея в виду (9) и (22) можно (20) представить в следующем виде:

$$z_0 = h_v + h_{\text{от}} + \sum h_f + \sum h_{\text{отв}} + h_{\text{выт}}. \quad (24)$$

Подставляя соответствующие значения согласно (10) и (22), будем иметь

$$z_0 = \frac{v^2}{2g} (z_v + z_{\text{от}} + \sum z_f + \sum z_{\text{отв}} + z_{\text{выт}}) \dots \quad (25)$$

Обозначим

$$z_v = z_v + z_{\text{от}} + \sum h_f + \sum z_{\text{отв}} + z_{\text{выт}}. \quad (26)$$

Имея в виду, что $Q = m \cdot v$, из (25) и (26), получим

$$Q = m \sqrt{2g z_0},$$

где

$$m = \frac{1}{\sqrt{z_v}}. \quad (28)$$

Обозначим сумму коэффициентов z_v и $z_{\text{отв}}$, входящих в (26), через y , т. е.

$$y = z_v + z_{\text{отв}}$$

Имея в виду (23) и (4), можно эту зависимость представить в следующем виде:

$$y = 1 - 2 \frac{v_1}{v} + 2 \left(\frac{v_1}{v} \right)^2$$

или обозначая

$$\frac{v_1}{v} = x,$$

будем иметь

$$y = 1 - 2x + 2x^2. \quad (29)$$

Из (29) легко установить, что при $x = \frac{v_1}{v} = 0,5$ сумма $y = z_v + z_{\text{отв}}$

приобретает свое минимальное значение, равное 0,5.

Таким образом, обращаясь к (26), устанавливаем, что в случае $z_v + z_{\text{отв}} = 0,5$ при $z_{\text{от}} + \sum z_f + \sum z_{\text{отв}} < 0,5$, z_v принимает значение

меньше единицы, и следовательно, по выражению (29) μ_c становится больше единицы.

Пример 3. По данным примера 1 вычислить с помощью зависимости (28) коэффициент расхода μ_c .

По формуле (23):

$$\zeta_c = \left(\frac{v_{\text{ср}}}{v} \right)^2 = 0,0625.$$

По формуле (4):

$$\zeta_{\text{отх}} = \left(1 - \frac{v_{\text{ср}}}{v} \right)^2 = 0,0625.$$

По формуле (26):

$$\zeta_c = 0,5626 + 0,04 + 0,06 + 0,0625 = 0,725.$$

По формуле (28):

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c}} = 1,17.$$

Результат расчета показывает, что и рассматриваемом случае формула Борда не применима.

Армянский сельскохозяйственный институт

Поступило 23. I. 1957

Խ. Ա. ՆԱՅՈՅԱՆ

ԽՈՐԱՍՈՒՅՂԱՅ ԱՐՏԱՀՈՍՄԱՆ ԴԵՊՐՈՒՄ ԶՆՇՄԱՆ ՏԱԿ ԱՇԽԱՏՈՂ
ԿԱՐՃ ԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐԻ ՍԻՍՏԵՄԻ ԵՂՔԻ ԿՈՐԾԱԿՅԻ ԱՐԹԵՔՐ ՃՇՏԵԼՈՒ
ԻՐԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Հոգովածում նշվում է, որ տեխնիկական պայմաններում և նորմաներում առաջարկվող հաշվման մեթոդը ճիշտ չէ և բերում է անհեթեթ արդյունքների: Ցույց է արվում, որ սխալը արդյունք է՝

1. Բեռնուլլիի հավասարման ոչ ճիշտ կիրառման և
2. Ելքի կորուստները Բորդայի բանաձևով հաշվելու:

Մանրամասնորեն վերլուծելով նշված անճշտությունները, սեփական արտածումների հիման վրա առաջարկվում է նոր հաշվարկին բանաձև, որով ճշտվում է ինչպես ելքի զործակցի հաշվումը, այնպես էլ ելքի հաշվումը, նկատի ունենալով կրիտիկ էներգիայի մասնակի վերականգնումը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Дренационные каналы, М., 1952.