

А. О. Гамбарян

Выражи на быстротоках

Расчетная схема виража, устраиваемого на поворотах быстротоков, впервые была предложена и разработана в 1936—39 гг. Н. Е. Кондратьевым [1] в Гидроэлектрической лаборатории ВНИИГ под руководством И. В. Егиазарова.

Для расчета виражей Н. Е. Кондратьев предложил следующее дифференциальное уравнение, которое справедливо для движения твердой частицы по вынужденной криволинейной траектории, и лишь с известными допущениями может быть применено к движению струйчатой жидкости:

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{1}{\rho \left(\frac{z''}{1+z'^2} - \frac{1}{2z} \right)}, \quad (1)$$

где $\frac{\partial z}{\partial y}$ — поперечный уклон элементарного участка свободной поверхности в плоскости YZ (фиг. 1),
 ρ — радиус кривизны траектории частицы,

$$z' = \frac{\partial z}{\partial s}, \quad z'' = \frac{\partial^2 z}{\partial s^2},$$

z — вертикальная ордината (за положительное принято направление вверх).

Для интегрирования уравнения (1) необходимо найти функции $z_0 = \varphi(s)$ и $\rho_0 = f(s)$, удовлетворяющие условиям, перечисленным Н. Е. Кондратьевым, а именно:

1. Продольный профиль струй не должен иметь кривизну, обращенную выпуклостью вверх и равную или превышающую кривизну свободного падения.

Это условие в равной мере относится как к начальной, так и к последующим поверхностным струйкам потока.

2. Не должны допускаться условия, при которых в потоке может возникнуть прыжок.

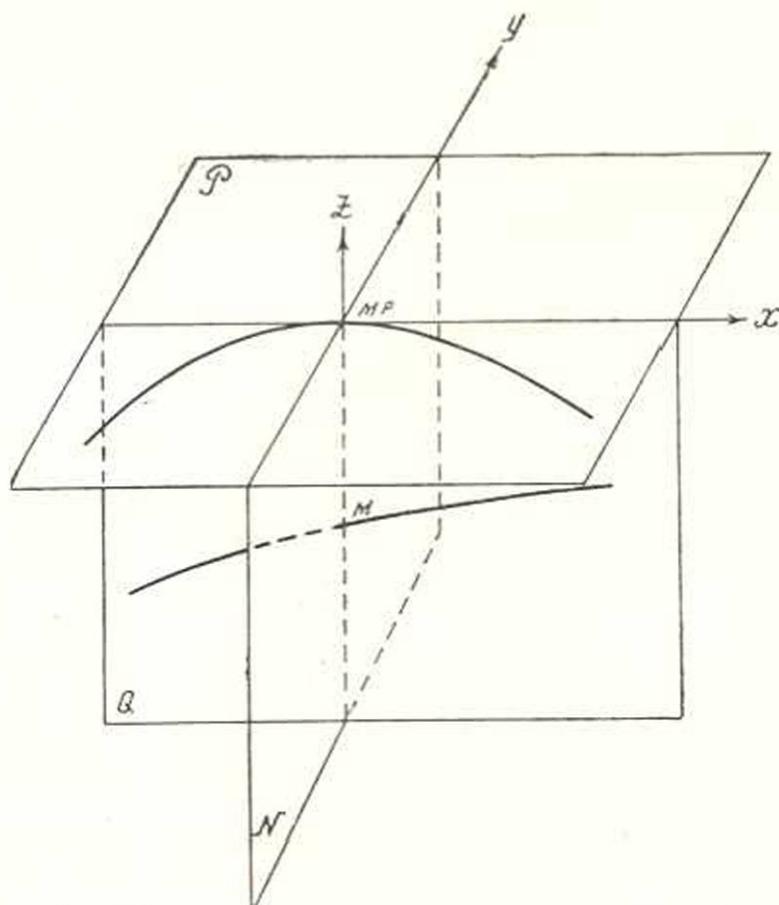
3. Функции $z_0 = \varphi(s)$ и $\rho_0 = f(s)$ должны быть выбраны так, чтобы они и входящие в расчет их производные были непрерывны во всем рассматриваемом интервале.

4. Аналитические выражения для z_0 и ρ_0 должны содержать достаточное количество постоянных, позволяющих приспособить выраж к заданным частным условиям.

Для частного случая выража, начинающегося с водосливной плотины (где имеется начальное большое падение дна водовода), Н. Е. Кондратьев предлагает следующий вид функций z_0 и ρ_0 :

$$z_0 = \frac{ks}{s+a} + z_0 \quad (2)$$

$$\rho_0 = \frac{m(s+a)}{ks} \quad (3)$$



Фиг. 1. Траектория движения частицы в пространственной координатной системе.

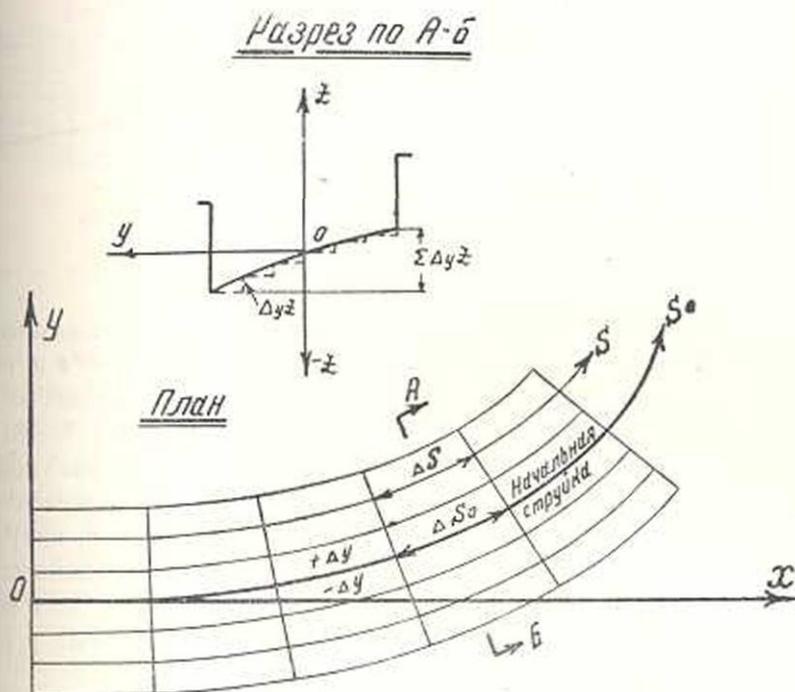
Выраж, рассчитанный по этим формулам, оправдал себя как при испытании в лаборатории, так и в натуре.

Численное интегрирование уравнения (1) легко осуществить, записав его в конечных разностях:

$$\Delta_y z = \frac{\Delta y}{\rho \left(\frac{z_0''}{\eta + z_0''} - \frac{1}{2z} \right)}, \quad (1a)$$

где индекс „0“ при производных от z указывает на их принадлежность к начальной струйке, которая принимается за исходную для расчета остальных струек;

$\eta = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2$, где ρ_0 — радиус кривизны начальной струйки, а ρ — радиус кривизны последующих струек (фиг. 2).



Фиг. 2. План параллельструйного выража.

В Гидроэлектрической лаборатории Водно-энергетического института Академии наук Армянской ССР автором были рассчитаны и исследованы модели выража, устраиваемого в середине длинного быстротока одной из строящихся гидроэлектростанций Армении (фиг. 3).

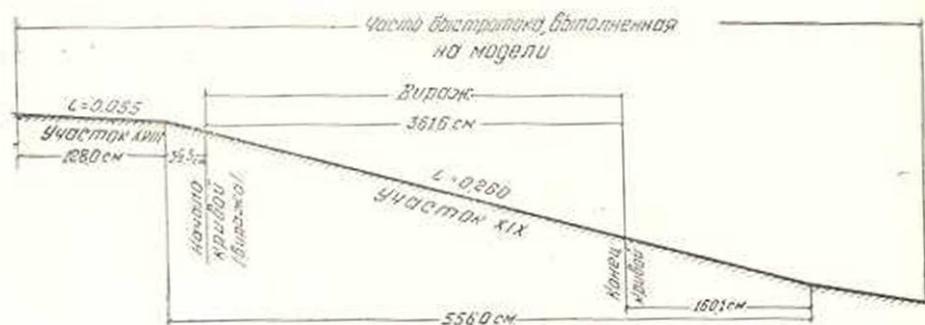
Попытки применить для этого случая функцию $z_0 = \varphi(s)$ в виде (2) не дали положительных результатов (произведенные расчеты показали, что при этом получается глубокая выемка), так как предложенная Н. Е. Кондратьевым функция относится к тем выражам, в начале которых имеется очень резкое падение.

Исходя из местных условий, для нашего быстротока представляется более целесообразным продольный профиль оси канала за-

дать в виде прямой линии: в таком случае в (1а) превращается в нуль z_0'' и уравнение принимает следующий вид:

$$\Delta_y z = - \frac{2z \Delta y}{\rho} \quad (16)$$

Этим упрощенным уравнением мы пользовались в наших расчетах.



Фиг. 3. Продольный профиль по оси быстротока в районе расположения выража (на схеме указаны модельные размеры)

Если при построении кривой оси выража в плане пользоваться формулой (3), то наибольшая кривизна кривой достигается в конце выража, что вызывает необходимость в устройстве перехода от криволинейного участка (в плане) к прямолинейному [1, стр. 79—81].

Для изображения оси выража в плане нами применена кривая, у которой радиус кривизны плавно изменяется от бесконечности в начале выража до минимального значения в середине и опять до бесконечности в конце выража. Этим обеспечивается плавное сопряжение выража с прямолинейными участками быстротока до и после выража (т. е. соблюдается условие непрерывности функции $\rho_n = f(s)$ на всем протяжении выража).

Одновременно отпадает необходимость в устройстве переходного участка в конце выража, что упрощает конструкцию сооружения.

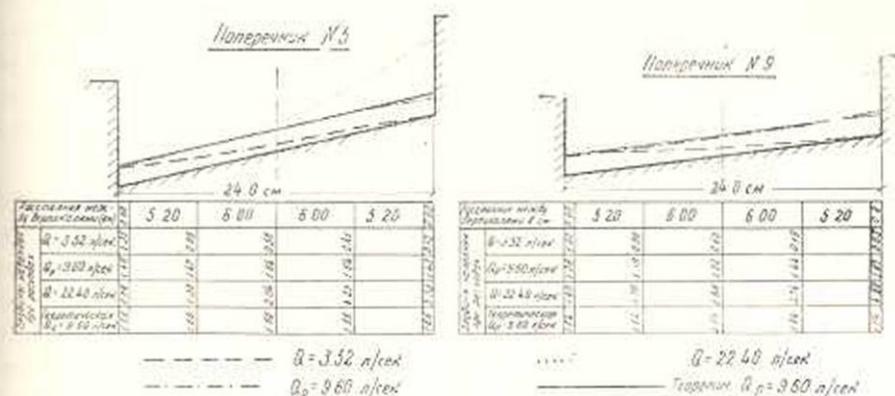
При выполнении первой модели выража в лаборатории продольный профиль выража и изображение его оси в плане были построены графически, причем продольный профиль, исходя из топографических условий местности, был принят по прямой линии. Расчет поперечных сечений выража сделан по уравнению (16).

Исходя из режима работы ГЭС, расчетным расходом модели был выбран $Q_p = 9,6$ л/сек, который близок к среднему значению расхода системы.

Произведенные опыты показали, что при этом расходе во всех поперечных сечениях выража глубины оказались почти одинаковыми. То же получилось и при расходах близких к расчетному ($Q = 7 -$

—12,8 л/сек), а при расходах, отличающихся от расчетного—в 2—3 раза, наполнение становится неодинаковым.

На фиг. 4 приведены два поперечных сечения виража, на которых показано наполнение при различных расходах, а также расчетные (теоретические) глубины.



Фиг. 4. Глубины наполнения характерных поперечных сечений виража при различных расходах.

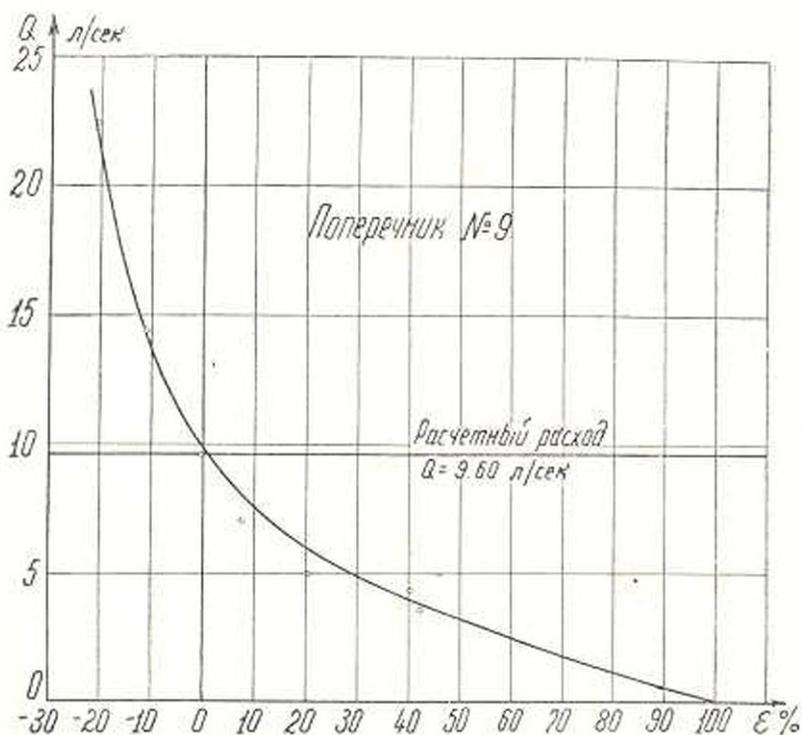
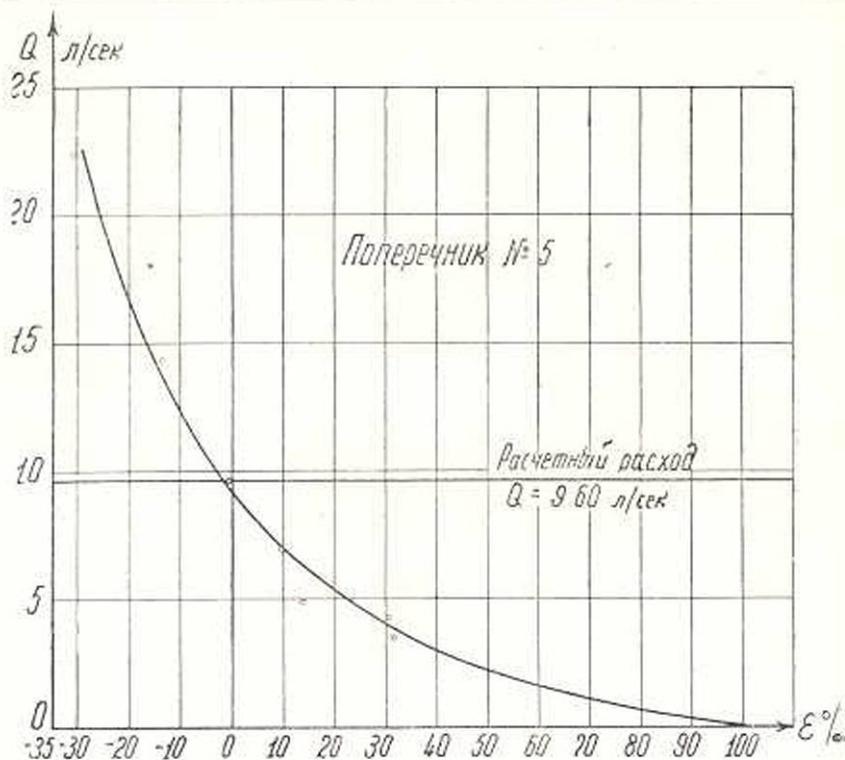
Как видно из фигуры, при $Q_{max} = 22,4$ л/сек основная масса потока прижимается к вогнутой (наружной) стенке, где глубина наполнения доходит до 4,8—5,5 см, а у выпуклой (внутренней) стенки—до 1,0—1,20 см.

При расходах, меньших $Q_p = 9,60$ л/сек, основная масса потока, наоборот, прижимается к выпуклой стенке. Начиная с расхода $Q = 4,96$ л/сек и менее, наполнение виража в поперечном направлении происходит по треугольнику, а при расходе 4,32 л/сек поток начинает отходить от вогнутой стенки, обнажая дно.

При пропуске расчетного расхода центр тяжести живого сечения потока на любом поперечнике должен находиться на геометрической оси канала. При изменении расхода происходит смещение центра тяжести живого сечения потока относительно геометрической оси канала.

На фиг. 5 приведены кривые зависимости эксцентриситетов (смещений) центров тяжести живых сечений виража (поперечника № 5, находящегося в середине, и № 9—в конце виража) причем за 100% эксцентриситета принята половина ширины канала.

Эти кривые дают наглядное представление о картине устойчивости потока на вираже при определенном диапазоне расходов. Само собой разумеется, что невозможно построить вираж, который одинаково хорошо работал бы при всех расходах. Здесь под „хорошей“ работой понимается такая, при которой в определенном диапазоне расходов указанные выше эксцентриситеты достаточно малы.



Фиг. 5. Кривые эксцентриситетов центра тяжести живого сечения потока на выраже относительно геометрической оси водовода (при графически заданном плане).

Как видно из кривых на фиг. 5, для расходов, отличающихся от расчетного на $\pm 50\%$, эксцентриситет колеблется в пределах $\pm 15 - 20\%$. Примерно такая же картина работы наблюдалась на выражах Комсомольской и Тавакской ГЭС, исследованных Н. Е. Кондратьевым.

На основании сказанного выше считаем возможным рекомендовать для пользования формулу (16) при расчете выражей в тех случаях, когда они не имеют начального большого сосредоточенного падения и, кроме того, когда продольный профиль оси выража по условиям местности можно выполнить прямым.

Графический метод получения очертаний выража в плане и в продольном профиле, наряду с некоторыми достоинствами (быстрота построения, возможность полнее учесть местные условия и т. д.), имеет ряд недостатков в точности определения некоторых геометрических элементов (радиусов кривизны, углов поворота поперечных сечений относительно заданной оси), очень важных при осуществлении выража в натуре.

Поэтому необходимо иметь аналитическое выражение для соответствующих кривых (особенно для $\rho_0 = f(s)$). Было бы ошибочно полагать, что заданием тех или иных аналитических выражений для функций $z_0 = \varphi(s)$ и $\rho_0 = f(s)$ можно разрешить задачу построения выража при любых местных условиях. На это обстоятельство обращено внимание и Н. Е. Кондратьевым [1].

Для исследованного выража, а также для подобных случаев следует считать, что при назначении кривой оси выража в плане можно применить косинусоиду или параболу (первая кривая, на наш взгляд, является более подходящей).

Для назначения продольного профиля по оси выража удобнее пользоваться графическим методом, приспособлявая кривую к продольному профилю линии грунта во избежание излишних земляных работ (разумеется, соблюдая перечисленные выше условия).

Что же касается определения z'_0 и z''_0 , то это с достаточной точностью может быть выполнено графически.

В лаборатории были проведены расчеты и исследования выража, построенного по следующему уравнению для оси канала в плане:

$$y = a \cos \omega t, \quad (4)$$

где: $\omega = \frac{\pi}{2t_0}$; t_0 — максимальная ордината по оси t (фиг. 6)

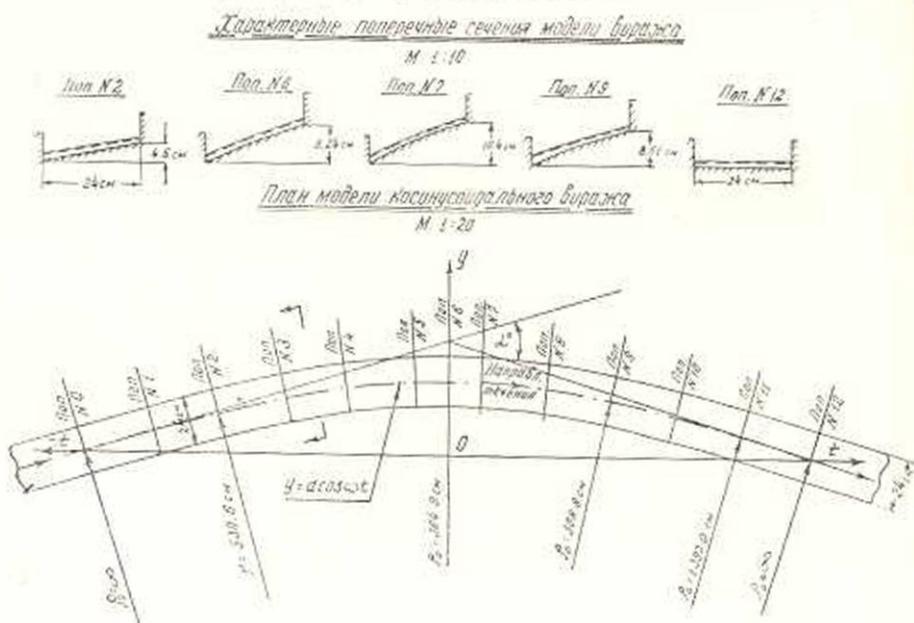
$$a = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\omega} = \frac{2t_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\pi};$$

α — угол поворота быстротока на выраже.

За ось y принято направление внешней нормали, совпадающее с биссектрисой угла поворота, а за ось t — направление хорды. На-

чало координат совпадает с точкой пересечения хорды и биссектрисы.

Произведенные исследования показали, что для расчетного и близких к нему расходов этот вираж также работает вполне хорошо, т. е. эксцентриситет центра тяжести живого сечения потока относительно геометрической оси поперечного сечения канала при расчетном расходе достигает $\pm (1-4)\%$, и лишь при расходах, отличающихся от расчетного в 2-3 раза, эксцентриситет увеличивается до $\pm (20-35)\%$.



Фиг. 6. План и характерные поперечники косинусспирального виража.

На фиг. 7 для двух поперечных сечений виража даны кривые зависимости эксцентриситетов от расхода воды, а на фиг. 8—распределение глубин наполнения для разных расходов. Поперечник № 6 находится в середине виража и совпадает с биссектрисой угла поворота, поперечник № 12—в конце виража.

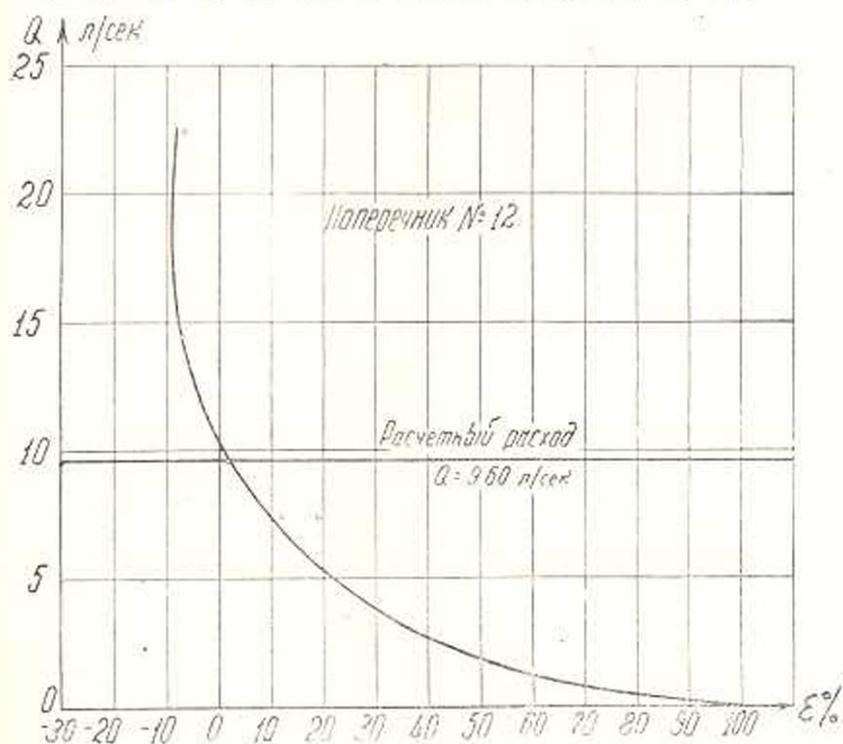
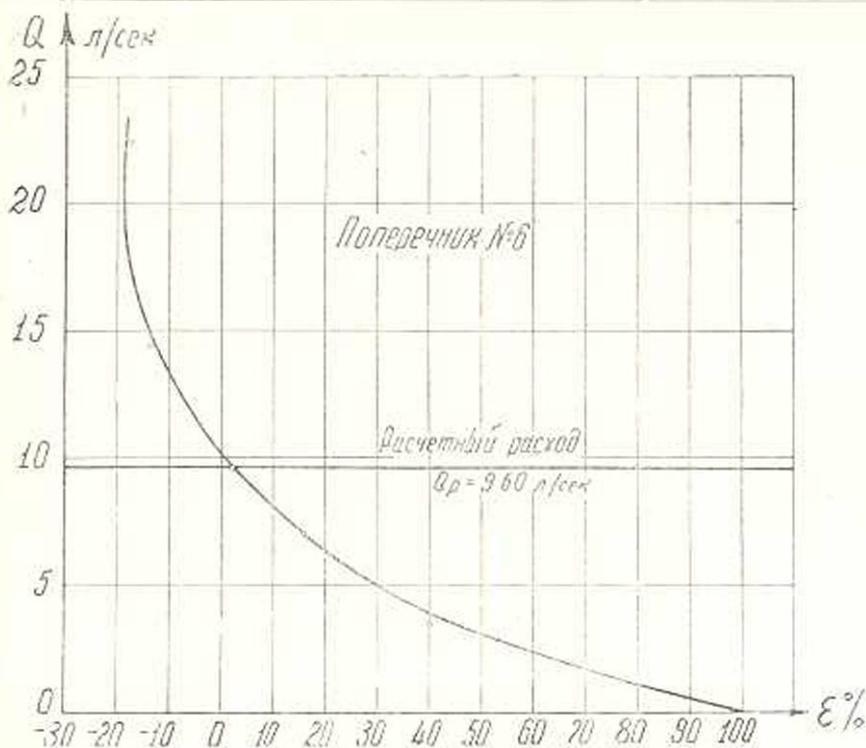
Таким образом, вышеприведенные расчетные методы дают возможность компенсировать влияние центробежных сил на повороте за счет изменения очертания дна быстротока и обеспечить условие одинакового наполнения водовода на кривом участке.

Глубины наполнения водовода на участке виража Н. Е. Кондратьев рекомендует определять по формуле:

$$h = \frac{q}{\sqrt{-2gz}}, \quad (5)$$

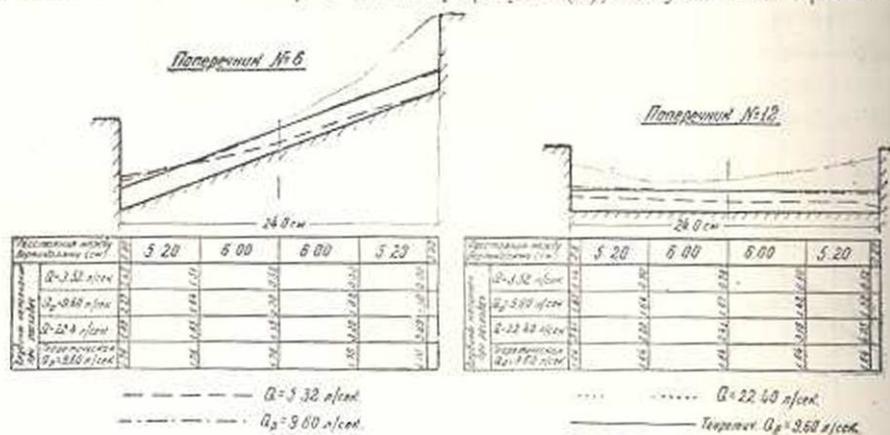
а для учета потерь он рекомендует пользоваться формулой Шези (пренебрегая потерями на изгиб потока):

$$\Delta h = \frac{v_{cp}^2}{C_{cp}^2 R_{cp}} \Delta s. \quad (6)$$



Фиг. 7. Кривые эксцентриситетов центра тяжести живого сечения потока на вираже относительно геометрической оси водовода (для косинусоидального виража).

При пользовании формулой (5) необходимо учесть, что при наличии большого падения на быстротоке формула дает очень маленькие наполнения, и, следовательно, очень большие скорости. Потери, рассчитанные по этим скоростям по формуле (6), получаются огромными.



Фиг. 8. Глубины наполнения характерных поперечных сечений косинусоидального виража при различных расходах.

Для случая, когда вираж начинается почти с гребня водосливной плотины, т. е. когда поток поступает на участок поворота со сравнительно маленькими начальными скоростями и пока еще не имеет бурного характера в начале виража (Н. Е. Кондратьев исследовал именно такие виражи на Комсомольской и Тавакской ГЭС), формула (5) может быть применена без больших погрешностей.

Что же касается виражей, находящихся где-то на середине длинного быстротока, а также в случаях большого падения, то формула (5) была бы очень удобной*, если бы ею можно было непосредственно учесть всякого вида потери, введением коэффициента скорости φ , переменного по длине виража. Однако очень трудно установить закономерность изменения φ по длине виража.

Пока нет достаточно простых и точных формул для учета потерь в бурном потоке и тем более—на повороте бурного потока, где поперечная кривизна дна водовода непрерывно меняется.

Полагая, что потери в бурном потоке на его изгиб все же малы по сравнению с путевыми потерями, считаем возможным применить, для определения глубин наполнения или, иначе говоря, для построения кривой свободной поверхности при неравномерном движении, общеизвестные формулы для расчета прямых быстротоков.

Расчеты, сделанные по методу акад. Павловского, дали удовлетворительные результаты: глубины, полученные экспериментальным путем, при наличии виража, оказались бо́льшими расчетных на 10—12%.

* Очень важно то обстоятельство, что по этой формуле расчет глубин можно произвести с учетом поперечного уклона каждого сечения (через ординату z).

Если предположить, что потери на изгиб могут быть порядка нескольких процентов от расчетных глубин, то разность между экспериментальными и расчетными глубинами приблизится к пределу точности измерений и расчетов.

При расчете и проектировании виражей существенное значение приобретает вопрос о правильном учете аэрации.

Можно рекомендовать следующий метод расчета виража с учетом аэрации:

1. Рассчитать кривую свободной поверхности для всего быстрого потока (в том числе и для виража), пренебрегая кривизной виража и пользуясь формулой акад. Павловского, учитывая аэрацию по методу проф. Ничипоровича или Эренбергера.

2. По полученным с учетом аэрации глубинам наполнения в различных сечениях (поперечниках) определить средние скорости.

3. Видоизменив уравнение (1а) восстановлением второго члена в скобках знаменателя правой части в его первоначальном виде—

$-\frac{1}{2z} = \frac{g}{v^2}$, получим:

$$\Delta_y z = \frac{\Delta y}{\rho \left(\frac{z_0''}{\eta + z_0''^2} + \frac{g}{v^2} \right)} \quad (1в)$$

4. Подставляя найденные средние скорости в уравнение (1в), построить свободную поверхность потока.

Затем, имея глубины наполнения, построить очертания дна виража.

В частном случае, когда продольный профиль по оси виража представляет прямую линию, z_0'' превратится в нуль, и уравнение (1в) переписется в виде:

$$\Delta_y z = \frac{v^2 \Delta y}{g\rho} \quad (1г)$$

Предложенная схема расчета имеет некоторые преимущества по сравнению со схемой Н. Е. Кондратьева (где наполнения определяются по формуле (5)) с точки зрения более полного учета влияния потерь и аэрации, и может быть применена для расчета виражей.

В ы в о д ы

1. Уравнение (1) может быть применено для расчета виражей на поворотах бурного потока, что подтверждается экспериментами.

2. Для многих случаев можно применить очертание в плане оси водотока на вираже в виде косинусоиды по формуле (4), чем отпадает необходимость в устройстве переходного участка.

3. Наполнение на выраже целесообразнее считать по методу акад. Павловского, где непосредственно учитываются потери на трение по длине водовода. Определение глубин по формуле (5) при больших падениях дает очень малые значения глубин наполнения, а потери, определенные по формуле (6), оказываются большими.

4. По схеме, предложенной в настоящей статье, имеется возможность учета влияния аэрации.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 3 I 1953

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Кокоратьев Н. Е.* Поворот бурного потока на выраже. Известия НИИГ, № 26, 1940.

Հ. Հ. Ղամբարյան

ՎԻՐԱԺՆԵՐԸ ԱՐԱԳԱՀՈՍՔԵՐԻ ՎՐԱ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգվածը նվիրված է արագանոսքի կորացման տեղում վիրածի նախադժմանը և հաշվարկային սխեմայի լարորաառը էքսպերիմենտալ ստուգման հարցին:

Որպես հիմք ընդունված է Ն. Ե. Կոնդրատևի առաջարկած հաշվարկային սխեման, որտեղ վիրածի լայնական հատվածքները ձևի հաշվարկման համար կիրառվում է հարկադրյալ կորագիծ արայնկառելիայով պինդ մասնիկի շարժման գիֆերենցիալ հավասարումը (1):

Հոգվածում վիրածի լցվածքի խորութունը հաշվելու համար, նկատի ունենալով նաև կորուստները, առաջարկվում է Ն. Ե. Կոնդրատևի մեթոդից աարեր մեթոդ, որը տալիս է բավարար համընկնում փորձերի նեա: