

ГИДРАВЛИКА

С. М. Исаакян (Матинян)

Воронки у гидротехнических сооружений и
их пропускная способность

В в е д е н и е

Явление воронкообразования хорошо известно из практики эксплуатации гидротехнических сооружений, а также по лабораторным исследованиям. Его можно наблюдать перед забральными стенками напорных камер ГЭС, у входа в напорные тоннели, при опорожнении шлюзных камер, при истечении из отверстий и т. д.

Воронкообразование сопровождается целым рядом побочных явлений, весьма отрицательно сказывающихся на гидравлической работе сооружений, а именно:

1. Воронки, поглощая энергию потока, приводят к понижению гидравлического к. п. д. сооружения.
2. При развитой форме воронки происходит весьма интенсивное засасывание воронкой воздуха, что приводит к еще большему понижению гидравлического к. п. д.
3. Помимо воздуха засасываются также плавающие тела, что приводит иногда к аварии на гидростанции.
4. Периодически изменяющееся гидродинамическое давление в воронке приводит к весьма нежелательной вибрации элементов сооружения.

С другой стороны, эти же воронки, в настоящее время используются для отвода от сооружений плавающих тел и шуги.

Изучение механизма воронкообразования и причин его обуславливающих имеет поэтому большое практическое значение, ибо только таким путем можно найти наиболее рациональные решения задачи как для борьбы с воронкообразованием, так и для искусственного усиления ее действия.

Изучением воронкообразования занимались многие исследователи.

А. Гибсон [1] указывает на резкое понижение коэффициента расхода при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке в условиях воронкообразования. Для этих условий им был приведен коэффициент расхода μ для отверстия диаметром 2,5 см—0,287 и для отверстия диаметром 8,75 см—0,178, в то время как для нормальных усло-

вий истечения (при отсутствии воронок) коэффициент расхода через отверстие в тонкой стенке $\mu=0,62$.

Б. А. Бахметев [2] отмечает, что уменьшение глубины воды над щитовым отверстием имеет своим следствием образование воронок и связанное с ним уменьшение коэффициента расхода при истечении из отверстия.

Н. М. Шапов [3] приводит пример засасывания через воронку деревянного бруска, вызвавшего аварию гидротурбины.

Л. Н. Шакунов [4] во время опытов, выполненных в ГЭЛ НИИГ под руководством И. В. Егiazарова, заметил образование интенсивных воронок перед забральными стенками и разработал метод их гашения с помощью специальных щитков. В этой же лаборатории разработан способ предотвращения воронкообразования путем утолщения забрала и уменьшения глубины погружения его кромки.

А. Х. Халпахчян [5], исходя из общих дифференциальных уравнений движения жидкости, опровергнул теорию, объясняющую воронкообразование Корнолисовым ускорением. Установив экспериментально вихревое происхождение воронок, он показал, что:

- а) воронки можно создать или уничтожить образованием в потоке искусственных вихрей при помощи обтекаемых экранов*;
- б) интенсивность воронок зависит от интенсивности вихревых шнуров и поверхностного натяжения жидкости;
- в) в зависимости от интенсивности вихря, воронки бывают с засасыванием воздуха и без засасывания его;
- г) нестационарность потока усиливает воронкообразование.

Тот же автор высказал предположение о возможности моделирования воронкообразования по Фрудру с введением некоторого поправочного коэффициента.

А. Х. Халпахчян рекомендовал следующие методы гашения воронок:

- а) увеличение слоя воды над отверстием,
- б) создание противовихрей при помощи обтекаемых экранов,
- в) устройство плавающих решеток,
- г) устройство плавающих щитков.

Должна быть особо подчеркнута роль А. Х. Халпахчяна в объяснении воронкообразования наличием вихревых шнуров в потоке и в установлении возможности гашения воронок, созданием противовихрей с помощью обтекаемых экранов (пластинок).

С. М. Исаакян [6] при исследовании явления истечения воды изпод щита, как наиболее распространенного элемента гидротехнических сооружений, работающего в условиях воронкообразования, установила, что:

* Идея применения обтекаемых щитков для усиления действия воронок изложена в 1939 г. А. Х. Халпахчяном в его кандидатской диссертации. Дальнейшее развитие этой идеи с точки зрения ее практического использования можно найти в работе В. С. Фокеева [7].

а) воронки перед щитом являются следствием образования вертикальных вихревых шнуров и горизонтального вальца при истечении воды из-под щита.

Вертикальные вихревые шнуры образуются вследствие наличия градиента скоростей по ширине лотка. Увеличением или уменьшением этого градиента можно усилить или ослабить воронкообразование.

Усиление интенсивности воронок достигается увеличением шероховатости стенок лотка. Выравнивание же скоростей по ширине лотка путем увеличения скоростей у его боковых стенок предотвращает воронкообразование. Последнее было достигнуто автором созданием щелей в щите у его боковых кромок;

б) воронки, как и всякий вихрь, имеют пульсирующий характер. Частота пульсаций подчиняется определенной закономерности;

в) образуясь перед щитом, воронки движутся вверх по течению и в некоторой точке приобретают устойчивое положение. Местоположение этой точки на свободной поверхности воды определяется глубиной h погружения нижней кромки щита и равно примерно $0,837 h$.

Гашение воронок достигается таким назначением размеров забальной стенки, чтобы охватить ею область, занятую воронкой;

г) не верна схема, представляющая воронки бесконечным вихревым шнуром. Как теорией, так и опытом отвергнуто их представление и Ранкиновым вихрем.

В. С. Фокеев [7] предложил в целях борьбы с шугой в напорных бассейнах ГЭС установить шугосбросы, состоящие только из щитка-вихреобразователя и водовыпуска. Получаемые таким путем воронки им удачно используются также с целью сброса плавающих тел из верхнего бьефа сооружений.

К сожалению, количественных данных относительно эффективности действия таких воронок еще нет, а предположение автора об их моделируемости по закону Фруда опровергается И. Д. Гридневым и А. Д. Победимским [8], которые указывают, что показатели лабораторных исследований почти вдвое отличаются от данных натурных исследований.

Т. М. Василишин [9], исследовав явление воронкообразования при истечении воды из донного отверстия, помещенного в бассейн со спиральным очертанием в плане, установил, что:

а) распределение скоростей в воронке подчиняется закону площадей;

б) коэффициент расхода донного отверстия, помещенного в центре этого спирального бассейна, определяется некоторым безразмерным числом, представляющим отношение чисел Рейнольдса и Фруда (отнесенным к отверстию).

На первый взгляд получается расхождение между мнениями С. М. Исаакян и Т. М. Василишина, однако нужно учесть следующие соображения.

Т. М. Василишвили рассматривает движение в спиральном бассейне, на дне которого расположено отверстие. Такое движение теоретически можно представить как сумму стока и вихревого шнура. Касательные составляющие скорости при таком движении будут удовлетворять закону площадей. Механизм образования воронок при истечении воды из-под щита отличается от этого случая существенным образом, поэтому нужно ожидать расхождения и в кинематической структуре.

Из приведенного выше обзора работ в области исследования воронкообразования следует, что еще остаются количественно неразрешенными все основные вопросы, относящиеся как к условиям воронкообразования, так и к его действию и затуханию. Незвестны количественные характеристики мероприятий, направленных на усиление или предотвращение воронок, а также неизвестны законы моделирования.

Учитывая те трудности, которые связаны с установлением пространственного поля скоростей в пульсирующей воронке и то, что практика требует ответа на вопрос о пропускной способности воронок, в настоящей работе приводится экспериментальное решение задачи определения пропускной способности воронок для случая истечения воды из-под щита.*

1. Исследование пропускной способности воронок в ГЭЛ ВЭНИ

а) Постановка вопроса. Целью исследования является установление пропускной способности воронки, образующейся при истечении воды из-под щита в зависимости от геометрических и гидравлических параметров сооружения, минуя вопрос механизма воронкообразования.

Экспериментальная установка представляет собой прямой лоток, перегороденный частично погруженным в воду плоским щитом, имеющим ширину, равную ширине лотка (фиг. 1). Уклон дна лотка $i=0$.

Истечение происходит при незатопленном отверстии.

Пропускная способность воронок при этом будет определяться геометрическими характеристиками лотка и щита, а также физическими свойствами жидкости и гидравлическими параметрами потока.

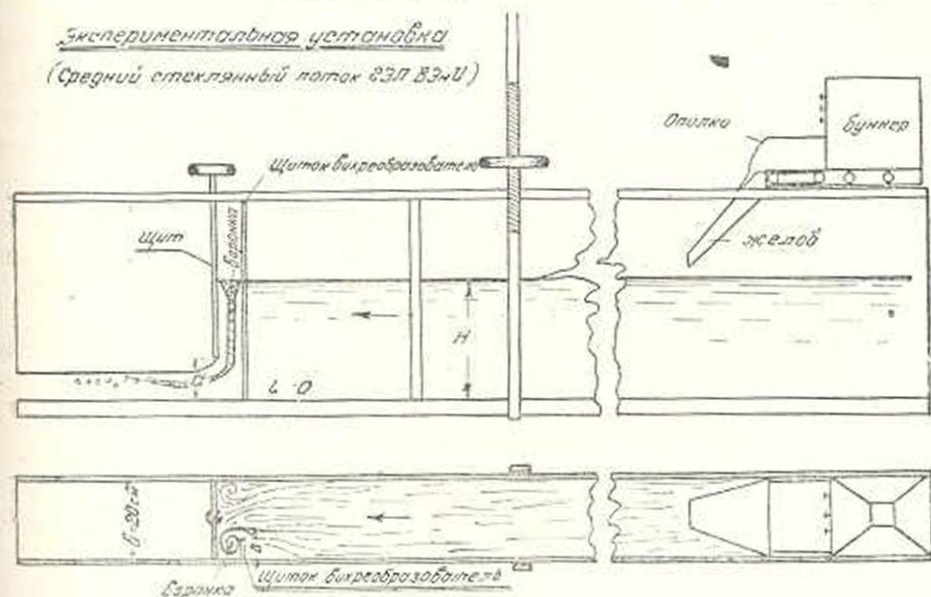
Для задачи истечения воды из-под щита очевидно будет иметь влияние плотность ρ и вязкость жидкости μ , а что касается поверхностного натяжения, то, по видимому, его роль ограничивается моментом образования воронок, а в их пропускной способности оно решающей роли не играет.

Из инерционных констант нужно учесть ускорение силы тяжести g .

Работа щитового отверстия будет полностью задана, если известна ширина лотка— b , высота открытия щитового отверстия— a и средняя скорость в щитовом отверстии— $v_{ср}$.

* Позже автором разработана методика измерения пространственного нестационарного поля скоростей [10].

Учитывая, что форма щитового отверстия также влияет на явление, рассмотрим совместно гидравлический радиус $R = \frac{a b}{2(a+b)}$ и высоту открытия щитового отверстия a . Тем самым учитывается как форма отверстия, так и его размеры.



Фиг. 1.

Таким образом, выбираем в качестве гидравлических и геометрических характеристик щитового отверстия величины R , a , $v_{ср}$. Они совместно определяют расход воды Q . Величины a и $v_{ср}$ определяют напор H над щитовым отверстием. Величины a и R определяют ширину лотка b .

Учтем также характеристику того материала, который подается к воронке и служит для определения ее пропускной способности. Обозначим плотность этого материала через ρ_1 . Тогда, учитывая действие архимедовой силы, будем иметь плотность в воде $(\rho_1 - \rho_0)$.

Обозначая пропускную способность воронки через G , можем писать в общем виде следующую функцию:

$$G = f[a, R, v_{ср}, g, \rho_0, (\rho_1 - \rho_0), \mu]. \quad (1)$$

С целью расширения области применимости полученных результатов функцию (1) представляем в виде связи между безразмерными величинами.

С этой целью выбираем в качестве основных величин R (см), v (см/сек), ρ_0 ($\frac{г}{см^3}$). Тогда можем написать:

$$\frac{G}{\rho_0 v_{ср} R} = f\left(\frac{a}{R}, \frac{\mu}{\rho_0 v_{ср} R}, \frac{gR}{v_{ср}^2}, \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0}\right). \quad (2)$$

Здесь $\frac{G}{\rho_0 v_{cp}^3 R}$ — безразмерный комплекс, характеризующий пропускную способность воронки,

$\frac{a}{R}$ — симплекс, характеризующий щитовое отверстие,

$\frac{\mu}{\rho_0 R v_{cp}}$ — величина, обратная числу Рейнольдса Re , выраженному через параметры щитового отверстия,

$\frac{gR}{v_{cp}^2}$ — величина, обратная числу Фруда Fr , выраженному через параметры щитового отверстия,

$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0}$ — относительная плотность плавающих тел, поступающих в воронку.

Отметим, что количество полученных комплексов и симплексов в (2) вполне согласуется с требованиями известной в теории размерностей π -теоремой.

Определение вида функции (2) и представляет задачу нашего экспериментального исследования.

б) *Постановка опытов.* Опыты были произведены в двух стеклянных лотках ГЭЛ ВЭНИ, при ширине $b=20$ см и $b=50$ см (фиг. 1).

Были исследованы режимы работы щитового отверстия при открытиях $a=4 \div 18$ см (через каждые 2 см) и глубины заполнения воды $H=6-30$ см (через 2 см).

Критерием оценки пропускной способности воронок служило количество древесных опилок, свободно пропускаемых воронками через щитовое отверстие.

Объемный вес опилок* $\gamma_1=0,2$ т/м³. Размеры опилок: $d>3$ мм—9%, $d=3-1$ мм—47%, $d<1$ мм—44%.

Опыты были поставлены следующим образом. При определенном открытии щитового отверстия a и установленном горизонте воды H , зафиксирован расход воды Q . Равномерной подачей древесных опилок с ленты транспортера визуальным образом установлен режим динамического равновесия подачи и отвода опилок воронками. Зафиксирована интенсивность подачи опилок при равновесном состоянии и при этом выделена масса опилок, прошедшая в голове лотка в течении 60 сек. Взвешиванием ее на весах определено секундное количество опилок, пропущенных воронкой при данном режиме работы щитового отверстия.

Всего таких опытов было произведено 80.

Поставлено также 150 опытов для определения пропускной способности искусственных воронок, образованных при обтекании щитков, имевших ширину $B=2-12$ см, расположенных у левой стенки лотка на расстоянии $1,5B$ от щитового отверстия.

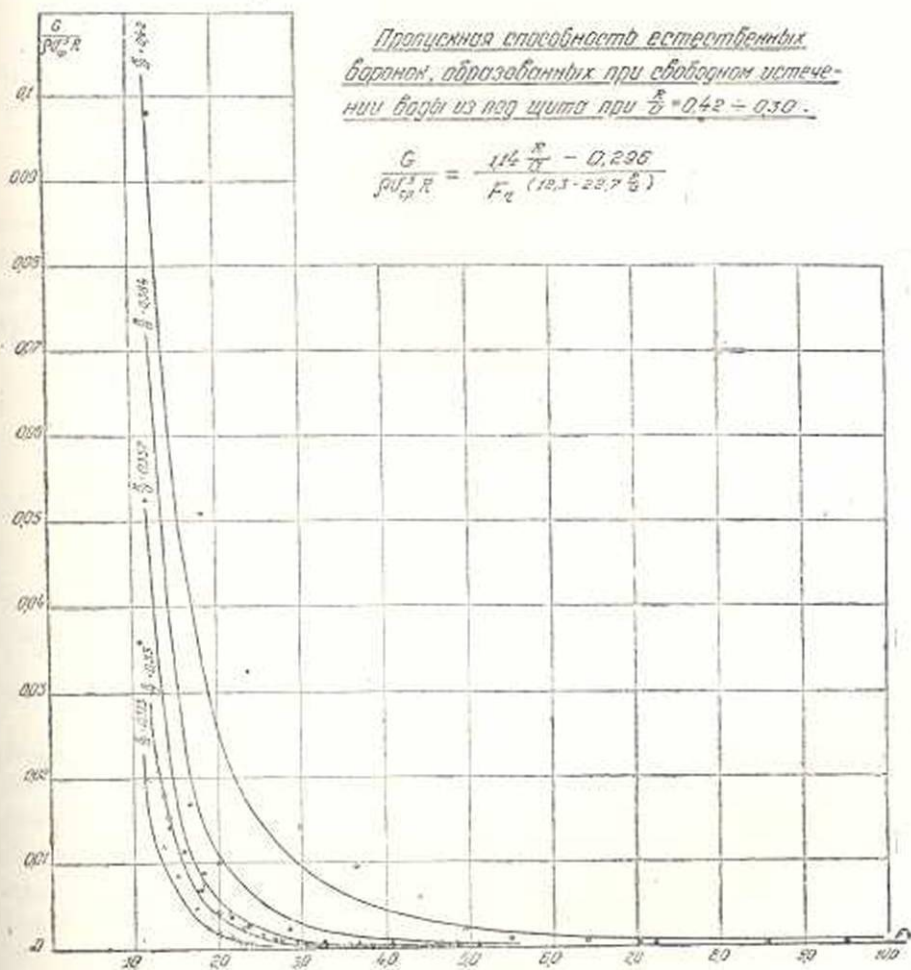
* В сухом виде, без трамбовки.

2. Опыты по определению пропускной способности естественных воронок

Обработка экспериментального материала заключалась в представлении экспериментальных данных в виде безразмерных комплексов, входящих в функцию (2).

Опыты в лотке с шириной $b=20$ см произведены с достаточной точностью и никаких сомнений не вызывают. Что же касается опытов в большом лотке ($b=50$ см), то здесь более достоверны данные, относящиеся к малым открытиям щитового отверстия, которые и охвачены с целью расширения области применения полученных результатов (охват случаев, ближе подходящих к случаю лотка бесконечной ширины).

Связь между пропускной способностью естественных воронок и числом Фруда представлена в прямоугольной системе координат на графике фиг. 2, где по вертикальной оси отложены значения $\frac{G}{\rho_0 v_{cp} R}$, а по горизонтальной — $Fr = \frac{v_{cp}^2}{gR}$.



Фиг. 2.

При этом, экспериментальные точки соединены по линиям равных $\frac{R}{a}$, что экстраполируется выражением:

$$\frac{G}{\rho_0 v_{ср}^2 R} = \frac{1,14 \frac{R}{a} - 0,296}{\left(12,3 - 22,7 \frac{R}{a}\right)} F_r \quad (3)$$

Здесь $\frac{R}{a}$ меняется в пределах 0,42—0,313. Это означает, что выражение (3) применимо для определения пропускной способности воронок, начиная от достаточно широких и низких щелей, до щелей почти квадратного сечения. Число Фруда для исследованных щитовых отверстий менялось в пределах от $F_r = 1$ до 9.

Полученная зависимость (3) удовлетворяет экспериментальным точкам с точностью 3—6% для разных ветвей $\frac{R}{a}$, что нужно считать достаточной для опытов такого рода.

Сопоставляя полученное на основании опытов выражение в виде (3) с предварительно выведенным на основе теории размерностей выражением (2) замечаем, что в (3) отсутствуют члены $\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0}$ и R_e .

Однако первый симплекс входит в функцию (3) как постоянная величина, а независимость пропускной способности воронок от числа Рейнольдса, отнесенного к щитовому отверстию, является следствием того, что скорости под щитом находятся вне области влияния числа Рейнольдса ($F_r = 1-9$).

3. Опыты по определению пропускной способности искусственно усиленных воронок

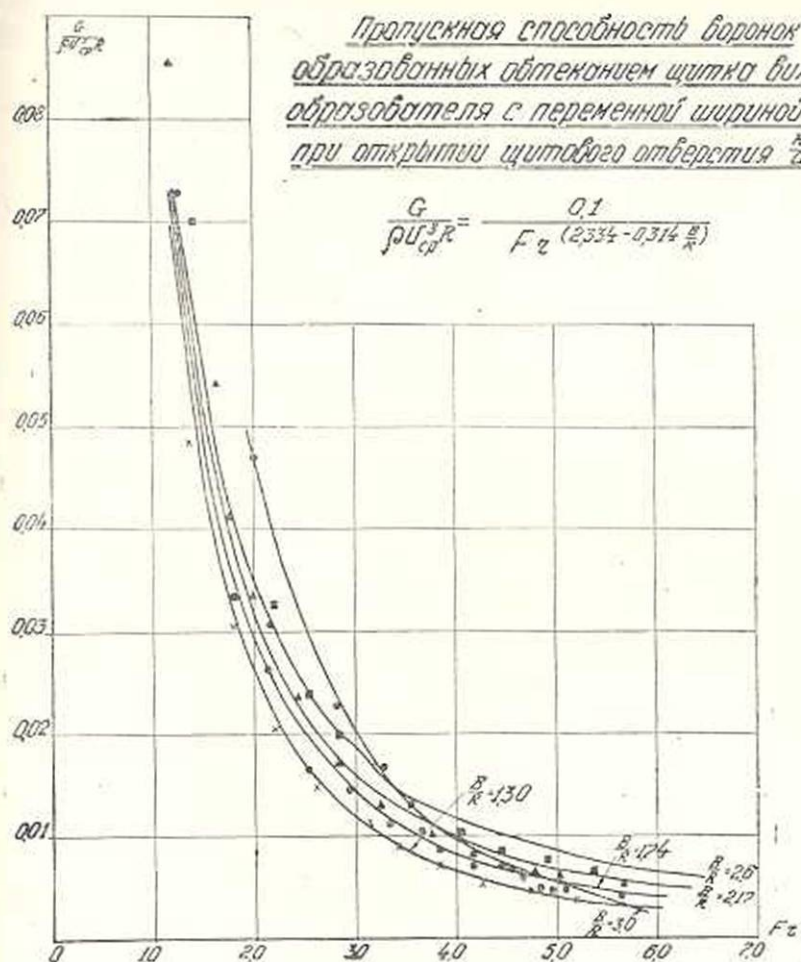
Согласно [5], [6] и [7] внесением в поток обтекаемых экранов (щитков-вихреобразователей) можно усилить воронкообразование.

Для получения количественных данных по пропускной способности таких воронок проведена серия опытов в лотке шириной $b=20$ см с разными ширинами вихреобразователей при открытии щитового отверстия $a=6$ см $\left(\frac{R}{a} = 0,384\right)$ и при вертикальном расположении щитка

вихреобразователя около левой стенки на расстоянии от щитового отверстия $1,5B^*$. Результаты приведены на фиг. 3.

Кривые фиг. 3 показывают, что в пределах изменений ширины щитка $B=(0,1-0,3)b$ пропускная способность воронок увеличивается с увеличением ширины щитка. Эти кривые приблизительно могут быть представлены в следующем виде:

* По данным Фокеева, а также по нашим опытам, такое расстояние дает наилучший эффект.



Фиг. 3.

$$\frac{G}{\rho_0 v_{cp}^3 R} = \frac{0,1}{F_z \left(2,334 - 0,314 \frac{B}{R} \right)} \quad (4)$$

С дальнейшим увеличением ширины щитка-вихреобразователя пропускная способность воронок начинает падать. Для иллюстрации этого на фиг. 3 приведена кривая для ширины щитка вихреобразователя $B=0,35b$ ($\frac{B}{R}=3,0$). Как видно, начиная с некоторого значения числа Фруда, эта кривая располагается ниже кривых, принадлежащих к более узким щиткам вихреобразователям. Дальнейшим увеличением B кривые ложатся все ниже и ниже. Здесь эти данные не приведены.

Таким образом, приходим к выводу, что для достижения наибольшего эффекта в отношении повышения пропускной способности искусственных воронок нужно выбрать ширину щитка вихреобразователя, равную 0,3 ширины щитового отверстия.

Опыты, поставленные при разных режимах работы щитового отверстия, но с одним щитком-вихреобразователем шириной $B=0,25b$ ($B=5$ см) также дают положительный результат.

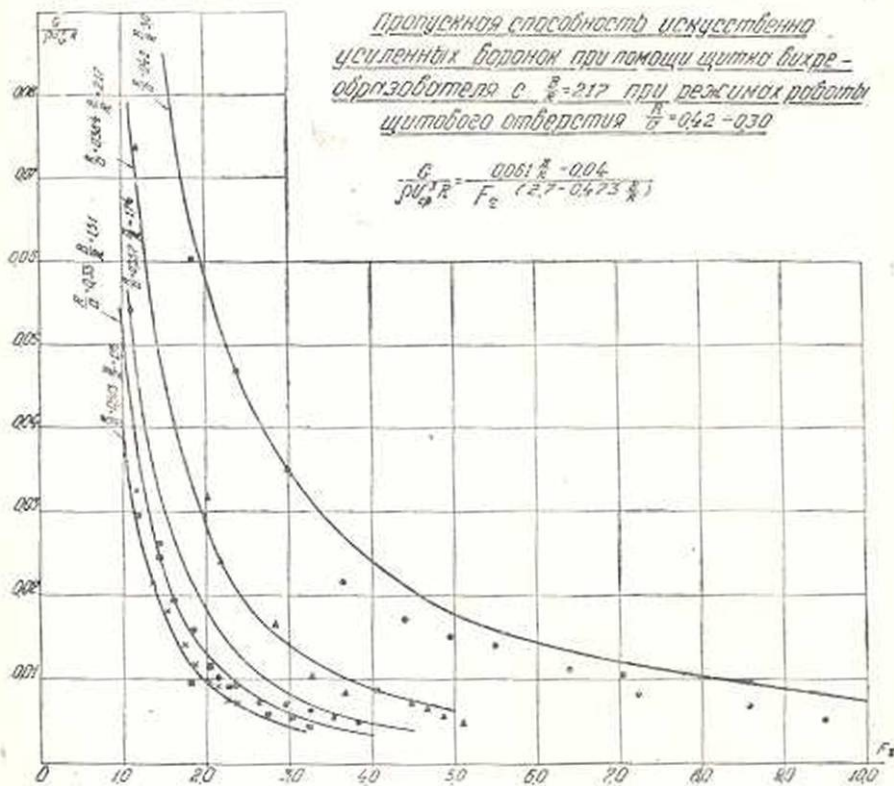
Эти кривые аналитически представляются следующим образом:

$$\frac{G}{\rho_0 v_{\text{ср}}^3 R} = \frac{0,935 \frac{R}{a} - 0,255}{F_r \left(4,75 - 8,25 \frac{R}{a} \right)} \quad (5)$$

или

$$\frac{G}{\rho_0 v_{\text{ср}}^3 R} = \frac{0,061 \frac{B}{R} - 0,141}{F_r \left(2,69 - 0,46 \frac{B}{R} \right)} \quad (6)$$

Кривые (5) и (6) также достаточно хорошо ложатся на опытные точки (фиг. 4); среднеквадратичное отклонение составляет 3–6%.



Фиг. 4.

Полученные соотношения (2), (4), (5) и (6) позволяют определить пропускную способность воронок, когда в качестве плавающего твердого тела использованы древесные опилки.

Для перехода от этих данных к пропуску другого материала G_1

с другим объемным весом γ_1 , предварительные теоретические соображения позволяют рекомендовать соотношение:

$$G_1 = \left(1 + \frac{\gamma_0}{\gamma} \cdot \frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_0} \right) G, \quad (7)$$

где γ и G — объемный вес и весовой расход опилок, определенный одним из выражений (3), (4), (5), (6).

Р е з ю м е

Исследование воронкообразования в гидротехнических сооружениях представляет большой практический интерес.

В условиях отсутствия теоретического решения поставленной задачи в настоящей работе сделана попытка экспериментального определения пропускной способности воронок, образованных как при естественном истечении воды из-под щита, так и при их искусственном усилении с помощью обтекания щитков-вихреобразователей.

Полученные безразмерные соотношения (3), (4), (5) и (6) вместе с (7) позволяют рекомендовать их для ориентировочных расчетов, а также для моделирования пропускной способности воронок по числу Фруда и отношению $\frac{R}{a}$.

Среднеквадратичное отклонение предложенных соотношений (3, 4, 5, 6) от экспериментальных точек находится в пределах 3—6%.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 10 II 1954.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гибсон А. С. Гидравлика и ее приложения, 1934.
2. Бахметев Б. А. Гидравлика, 1932.
3. Шапов Н. М. Исследования Сызранской ГЭС, 1934.
4. Шакунов Л. Н. Метод борьбы с воронкообразованием над затопленными входными отверстиями гидротехнических сооружений. Известия НИИГ, т. XXIII, 1938.
5. Халпахчян А. Х. Воронкообразование в напорных водоприемниках гидростанций (кандидатская диссертация), 1939.
6. Исаакян С. М. Воронкообразование перед забральными стенками водоприемников гидротурбинных установок (канд. диссертация), 1948.
7. Фокеев Г. С. Некоторые свойства устойчивой вихревой воронки. Гидротехническое стр-во, № 5, 1951.
8. Гриднев И. Д. и Победимский А. Л. Пропуск шуги через турбины с помощью вихревых воронок. Гидротехническое стр-во, № 6, 1952.
9. Василишин Т. М. О моделировании воронкообразования. Гидротехническое стр-во, № 8, 1953.
10. Исаакян (Матинян). Метод измерения пространственного поля скоростей в неустановившемся потоке в условиях воронкообразования. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. VIII, № 2, 1955.

Ս. Ս. Իսահակյան (Մատինյան)

ԶԱԳԱՐՆԵՐԸ ՀԻԴՐՈՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ
ԵՎ ՆՐԱՆՑ ԹՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հիդրոտեխնիկական կառուցվածքներում ձագարառաջացման ուսումնասիրությունը կիրառական մեծ նշանակություն ունի:

Հոդվածում փորձ է արվում, քննարկվող խնդրի տեսական լուծման բացակայության պայմաններում, որոշելու վաճառների տակից ջրի արտահոսման ժամանակ առաջացող ձագարների թողունակությունը:

Քննարկված են ինչպես բնական ձագարառաջացման, այնպես էլ արհեստականորեն նրա ակտիվացման (շրջնավոր վաճառիկների միջոցով) դեպքերը:

Ստացված են 3, 4, 5, 6, 7 առնչությունները, որոնք հնարավորություն են տալիս էֆեկտիվ դարձնելու լողացող մարմինները հիդրոտեխնիկական կառուցումներից հեռացնելու խնդրի լուծումը: Քանի որ այս առնչությունները ներկայացված են չափում չունեցող կոմպլեքսների միջոցով, ուստի նրանք հնարավորություն են տալիս նույնպես հեշտությամբ մոդելացնելու երևույթը: Սա հատկապես կարևոր է խնդրի տեսական լուծման բացակայության պայմաններում:

Բերված առնչությունների միջին քառակուսային շեղումը փորձնական կետերից կազմում է $3-6\%$: