

ГИДРОМЕХАНИКА

С. С. Аветисов

Определение скорости и направления потока
во всасывающей трубе водяных турбин цилиндрическим зондом

Для измерения направления скорости потока на практике применяются специальные насадки (трубки). К числу таких насадков относятся цилиндрический насадок и шаровый зонд. Шаровый зонд имеет пять отверстий на сфере: одно в центре, а две пары — в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях симметрично центрального отверстия. Здесь, также как в цилиндрическом насадке, центральное отверстие с каким-либо из крайних может служить для определения величины скорости потока. Каждая пара других отверстий, расположенных в одной плоскости с центральным отверстием, служит для определения направления струй потока.

Для испытания всасывающей трубы в натуре возникла необходимость создать такой прибор, которым можно было бы произвести замеры величины и направления скорости, а также давлений во всасывающей трубе при работе агрегата и получить картину потока в натуре.

Существуют приборы, при помощи которых в лабораторных условиях определяют интересующие величины вблизи граничной поверхности потока, а также и внутри него. К числу таких приборов относятся трубка Пито и шаровый зонд.

Эти приборы крепятся консольно и вводятся в поток. Применение этого способа затруднительно в условиях исследований в натуре ввиду больших размеров всасывающей трубы. При этом сильно осложняется крепление консоли, подверженной большим усилиям.

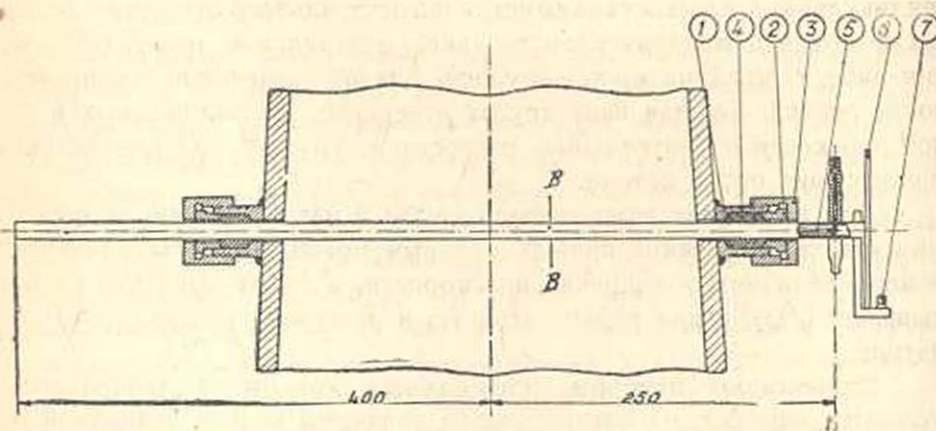
На основании вышесказанного проф. И. В. Егиазаровым было предложено автору сконструировать как для турбин КанакерГЭС, так и для турбин Гидро-электрической лаборатории АН Арм. ССР цилиндрический зонд, который проходил бы всасывающую трубу насквозь и опирался бы на обе ее стенки. С помощью сконструированного прибора были проведены испытания на агрегате № 1 Канакер-ГЭС (Тер-Акопов и др.), показавшие всю практическую его применимость и прочность.

Показания прибора дают возможность проанализировать поток во всасывающей трубе. Результаты испытания приведены в отчетах

полевой группы КанакерГЭС-а, работавшей под руководством Г. Д. Тер-Акопова.

В настоящее время изготовлен и оттарирован такой прибор для лабораторных исследований. В основу идеи цилиндрического зонда положен принцип действия цилиндрического насадка, применяющегося для измерения направления скорости потока в одной плоскости [2]. Прибор позволяет производить замеры скорости и направления потока от стенки до среднего сечения всасывающей трубы.

Прибор состоит из цилиндра, в одном из сечений которого имеются три отверстия, расположенные друг относительно друга на 30° (рис. 1, сеч. В—В). Диаметры отверстий—1,5 мм. От каждого отверстия отходят медные трубки, расположенные внутри цилиндра и оканчивающиеся штуцерами, связанными пьезометрами. На свободном конце цилиндра укреплен металлический круг с градусными делениями, с помощью которого можно определить угол поворота зонда относительно вертикали. Общий вид прибора изображен на рис. 1.



1. Корпус сальника. 2. Вкладыши. 3. Гайка накидная.
4. Набивка сальника. 5. Цилиндрический зонд. 6. Лимб зонда. 7. Уровень лимба.

Рис. 1.

В диаметрально противоположных точках образующей всасывающей трубы просверливаются два отверстия и привариваются корпусы сальника (рис. 1, деталь № 1). В эти отверстия пропускается цилиндрический зонд, затем набиваются сальники и затягиваются накидной гайкой (дет. № 3). Такое крепление дает возможность вращать цилиндрический зонд относительно продольной оси, пока установится одинаковое давление в боковых отверстиях. Угол поворота лимба дет. № 6 по отношению к уровню лимба дет. № 7 определяет направление потока.

Цилиндрический зонд, по сравнению с другими насадками, обладает, прежде всего, тем преимуществом, что взаимное располо-

жение отверстий строго фиксировано и, следовательно, коэффициенты тарировки обладают большим постоянством. Благодаря большой разности давлений в боковых отверстиях на цилиндре, точность измерения повышается и доходит приблизительно до 5%.

Крепление прибора, которое осуществляется в диаметрах на противоположных точках всасывающей трубы, обеспечивает надежную и устойчивую работу прибора. Вследствие этого режим потока во всасывающей трубе мало искажается благодаря сравнительно небольшим размерам прибора (диаметр цилиндра 12 мм).

Теоретическая схема действия прибора

Основной принцип действия цилиндрического зонда можем получить после анализа потока во всасывающей трубе, который обтекает прибор.

При исследовании потока во всасывающей трубе нужно иметь в виду следующее обстоятельство.

В потоке, за исключением тех его зон, где образуются вихри, равнодействующая скорости потока симметрична относительно оси всасывающей трубы и определяется следующими условиями:

во-первых—масса жидкости, выходящая из каналов рабочего колеса турбины, равномерно вращается с постоянной угловой скоростью ω около оси z всасывающей трубы; во-вторых—поток имеет начальную скорость v_0 , направленную по оси всасывающей трубы и, в-третьих—поток находится под действием силы тяжести.

В соответствии с этим получим:

$$v_x = \omega y \quad v_y = \omega x \quad v_z = v_0 \quad (1)$$

Притом имеется в виду, что поток установившийся. Тогда соблюдается уравнение неразрывности

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} = 0 \quad (2)$$

Так как уравнение неразрывности выполняется тождественно, то уравнения движения будут иметь вид:

$$\omega^2 x = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \quad \omega^2 y = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + g \quad (3)$$

Эти уравнения имеют общий интеграл

$$-\frac{p}{\rho} = \frac{1}{\rho} \omega^2 (x^2 + y^2) - gz + \text{const} \quad (4)$$

Следовательно, в каждой точке плоскости, проходящей через ось z всасывающей трубы, для несжимаемой жидкости можно определить давление в потоке по формуле (4).

Рассматривая изменение давления в данной плоскости, мы можем принять второй член в правой части уравнения (4) в виде

$$-gz = C \frac{1}{\rho}$$

Следовательно, для k -той плоскости, перпендикулярной z , будем иметь общий интеграл уравнения движения в следующем виде:

$$-\frac{p}{\rho} = -\frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + \text{const} + \frac{1}{\rho} C. \quad (5)$$

Принимая на основании второго условия

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} = \text{const}, \text{ получим:}$$

$$-\frac{p}{\rho} = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + \frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} - \frac{1}{\rho} C \quad (6)$$

или

$$-p = \frac{\rho}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} - C. \quad (7)$$

Но так как

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= r^2, \quad \text{то} \\ p + p_0 &= p_s. \end{aligned}$$

Отсюда

$$-p_s = \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + v_0^2) - C. \quad (8)$$

Здесь ωr есть окружная скорость данной точки, которую обозначим через v_r .

Уравнение (8) перепишется так:

$$-p_s = \frac{\rho}{2} (v_r^2 + v_0^2) - C. \quad (9)$$

Обозначив суммарную скорость движения жидкости в данной точке плоскости через v_s , будем иметь

$$p_s + \frac{\rho v_s^2}{2} = C. \quad (10)$$

При исследовании всасывающей трубы нас интересует полное давление p_s , величина суммарной скорости и направление этой скорости.

Рассмотрим поле скоростей:

Ось Z — направлена перпендикулярно к плоскости чертежа.

Возьмем на плоскости XOY точку N (рис. 2) на расстоянии r от центра O . Проведя через точку N плоскость, параллельную оси Z и перпендикулярную к радиусу r , можем представить диаграмму скоростей.

Рассмотрим цилиндр с бесконечно малым диаметром, ось которого совпадает с радиусом r . На основании вышесказанного попереч-

ное сечение цилиндра будет совпадать с плоскостью, проведенной через точку (N).

Выбираем оси координат так, чтобы ось X совпадала с вектором скорости v_s , ось Z — с осью цилиндра.

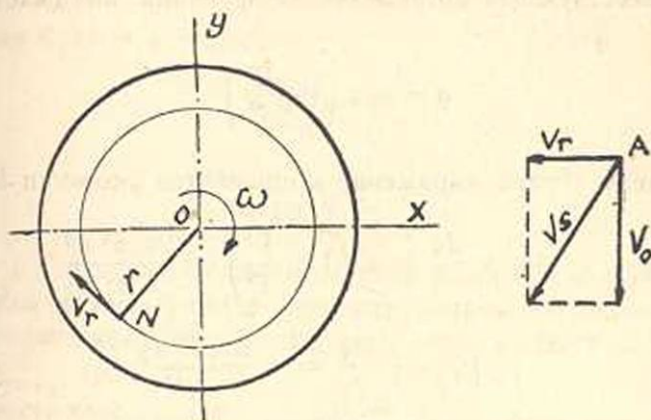


Рис. 2.

На основании сделанных допущений мы получим случай обтекания цилиндра параллельным потоком, находящимся под статическим давлением p_s и имеющий скорость v_s .

Для любой точки P круга (рис. 3) имеет место равенство.

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

Потенциальная функция потока должна удовлетворять следующим трем условиям.

1. Вдали от цилиндра должно быть:

$$v_x = v_s, \quad v_y = 0, \quad (11)$$

где v_x и v_y — скорость в данной точке.

2. При обтекании цилиндра потоком, в силу пограничных условий, скорость направлена по касательной к окружности цилиндра. Тогда компоненты скорости нормальные и поверхности равны нулю, т. е.

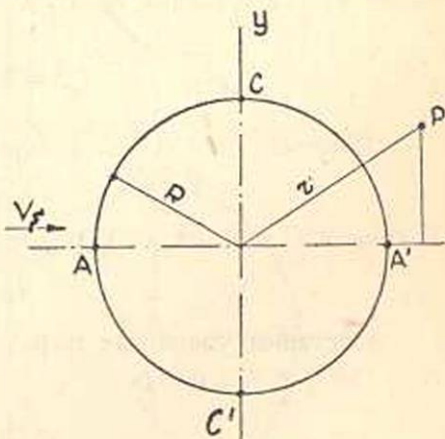


Рис. 3.

$$v_x \frac{dF}{dx} + v_y \frac{dF}{dy} = 0, \quad (12)$$

где функция F, определяющая поверхность цилиндра, имеет вид:

$$F = x^2 + y^2 - R^2 = 0 \quad (13)$$

3. Уравнение неразрывности:

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad (14)$$

Соответствующая потенциальная функция выражается уравнением [1]

$$\varphi = v_s x \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (15)$$

Составим теперь выражение компонентов скорости по осям:

$$\begin{aligned} v_x &= + \frac{d\varphi}{dx} = v_s \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{2v_s x^2 R^2}{r^4}, \\ v_y &= + \frac{d\varphi}{dy} = - \frac{2v_s R^2 xy}{r^4}. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение полной скорости будет:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2.$$

Нас интересует давление на поверхности цилиндра. Для этого предварительно вычислим скорость на поверхности и обозначим ее через v_R . Подставляя везде в уравнения $r = R$, получим (рис. 3 и 4):

$$v_R^2 = 4v_s^2 \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right). \quad (17)$$

В точках A и A' , т. е. при $x = \pm R$

$$v_R = 0.$$

В точках C и C' , т. е. при $x = 0$ скорость будет наибольшая:

$$v_R = 2v_s.$$

Составим уравнение Бернулли для двух точек вдали от цилиндра, где $v = v_s$, $p = p_s$:

$$p_s + \frac{\gamma}{2g} v_s^2 = C \quad (18)$$

и соответственно для точки, лежащей на поверхности цилиндра:

$$p_R + \frac{\gamma}{2g} v_R^2 = C. \quad (19)$$

Из этих уравнений получим* давление на поверхности цилиндра из выражения:

$$p_R = p_s + \frac{\gamma}{2g} (v_s^2 - v_R^2). \quad (20)$$

Подставив вместо v_R ее значение, получим давление в любой точке поверхности цилиндра:

$$p_R = p_s + \frac{\gamma}{2g} v_s^2 \left(4 \frac{x^2}{R^2} - 3 \right) \quad (21)$$

или, обозначив буквой k величину

$$k = 4 \frac{x^2}{R^2} - 3,$$

будем иметь

$$p_R = p_s + k \frac{\gamma}{2g} v^2 \quad (22)$$

На рис. 4 представлено распределение давления на поверхности цилиндра. Силы давления везде перпендикулярны к поверхности цилиндра. В критической точке А скорость равна нулю $v=0$, а давление равно $p_{\max}$. (рис. 4). В точке С скорость наибольшая, $v_{\max} = 2v_s$, а соответственно давление равно $p_{\min}$. Между точками А и С должна быть, следовательно, некоторая точка, например, точка В, в которой скорость имеет промежуточное значение между $v=0$ в точке А и $v=2v_s$ в точке С, т. е. в этой точке скорость должна иметь значение v_s невозмущенного потока. Положение этой точки мы получим из уравнения (17), подставляя $v_R = v_s$. Тогда получаем:

$$x = x_s = \pm \frac{R}{2} \sqrt{3}.$$

Давление в точке В получается из уравнения (20) при $v_R = v_s$ и будет $p = p_s$, как и следовало ожидать.

Следовательно в точках В и В' значения скорости и давления соответствуют их значениям вдали от цилиндра для невозмущенного потока.

Последнее обстоятельство служит теоретической основой прибора цилиндрический зонд.

Давление в точке А в силу того, что в этой точке $v_R=0$, соответствует $p_{\max}$. Подставляя значение $v_R=0$ в формулу, получим

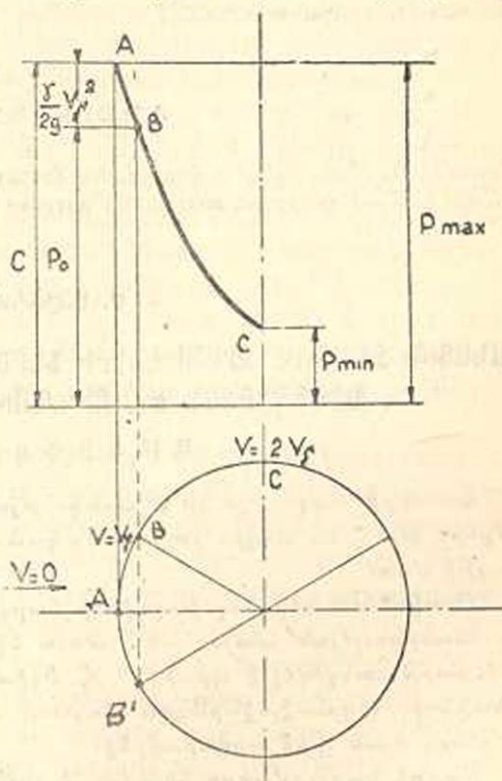


Рис. 4.

давление в точке В, соответствующее давлению невозмущенного потока и равное p_s . Следовательно, если мы замерим давление в точках А и В, то разность давлений в этих точках даст нам скоростной напор, из которого мы можем вычислить скорость невозмущенного потока.

Таким образом

$$p_{\text{макс}} - p_s = \frac{\gamma}{2g} v_s^2 = \gamma h.$$

Прибор позволяет также определить направление потока. Для этого необходимо вращать цилиндрический зонд вокруг оси, пока показания пьезометров, присоединенных к левому и правому отверстиям, не выравняются. Таким образом, можно установить направление потока на разных расстояниях от оси всасывающей трубы.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 10 VIII 1949.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочин Н. Е., Кибель И. А. и Розе Н. В.—Теоретическая гидромеханика, 1948 г., ч. I.
2. Попов С. Г.—Измерение воздушных потоков, 1947 г.

Ս. Ս. Ավետիսով

ԳԼԱՆԱՅԻՆ ԶՈՆԴՈՎ ԶՐԱՆԻՎՆԵՐԻ ՆԵՐԾԾՈՂ ԽՈՂՈՎԱԿՈՒՄ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՈՒՂՂՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոսանքի ուղղությունը և արագությունը որոշող գոյություն ունեցող սարքերը թույլ են տալիս չափումներ կատարել ներծծող խողովակի մակերևույթի մոտ:

Բնականում ներծծող խողովակի կտրվածքի բոլոր կետերում հոսանքի ուսումնասիրության համար անհրաժեշտ եղավ ստեղծել նոր սարք: Այդպիսի սարք ստեղծվել է պրոֆ. Ի. Վ. Եղիազարովի առաջարկությամբ, որը Քանաքեռի հիդրա-էլեկտրական կայանի № 1 ագրեգատի փորձարկման ժամանակ իրեն լրիվ արդարացրեց:

Սարքի կառուցվածքը հիմնված է շրջնաձև գեղձում գլանի շրջանային հատույթի ուղղությամբ արագության փոփոխության վրա: