

КАРУСЕЛЬНЫЙ ГИДРОКАНАЛ

Б. В. Войцеховский, А. А. Говаль

(Новосибирск)

Гидродинамические установки, применяющиеся в настоящее время для изучения движения тел в воде, разделяются на два типа: установки с движущейся моделью и неподвижной водой и установки с неподвижной моделью, погружающейся в поток жидкости.

К первому типу относятся прямолинейные бассейны с неподвижной водой. Изучаемые модели протягиваются в таком бассейне с помощью тележки, движущейся по рельсам над поверхностью воды. Время пробега, определяемое длиной бассейна, и расположение измерительной аппаратуры на движущейся тележке затрудняют проведение эксперимента. Скорости, достигаемые в таких бассейнах, обычно не превышают 15 м/сек.

К первому типу установок относятся и ротационные бассейны, в которых модель протягивается вдоль кольцевого бассейна с помощью вращающегося коромысла — «журавля». Время эксперимента ограничивается одним периодом оборота «журавля». Измерительная аппаратура также монтируется на подвижном основании. Ротационные бассейны позволяют получать скорость до 50 м/сек.

Значительно более широкие возможности в проведении эксперимента представляет второй тип установок с неподвижной моделью, поскольку измерительная аппаратура в этом случае не требует дистанционного управления и является более безотказной и несложной в обращении.

К числу установок второго типа относятся различные виды кавитационных труб. Наиболее распространенными являются трубы, имеющие вид замкнутого канала, в котором с помощью мощных насосов создается циркуляция воды. В верхней, наиболее суженной части канала имеется рабочий участок, в котором устанавливается исследуемое тело. Скорость в кавитационных трубах обычно бывает порядка 10—15 м/сек, а кавитационные установки, позволяющие получать более высокие скорости, имеют малое поперечное сечение рабочей части трубы.

Работа кавитационной трубы вследствие трения между потоком и неподвижными стенками требует затраты большой энергетической мощности. Если стенки привести в движение со скоростью воды, то потребляемая мощность при том же сечении потока снижается в сотни раз.

Наиболее просто этот принцип осуществляется в описываемой гидродинамической установке — карусельном гидроканале.

Устройство гидроканала. Карусельный гидроканал представляет собой кольцевой прямоугольный металлический желоб 1 с открытой поверхностью, обращенной к центру круга (фиг. 1).

Желоб свободно подвешивается на валу 2 и приводится во вращение вокруг вертикальной оси двигателем 3; после этого в канал заливается вода 4, которая центробежной силой прижимается к периферии и начинает вращаться как твердое тело с угловой скоростью вращения желоба ω .

Образующая свободной поверхности воды занимает почти вертикальное положение и составляет с вертикалью угол, определяемый выражением

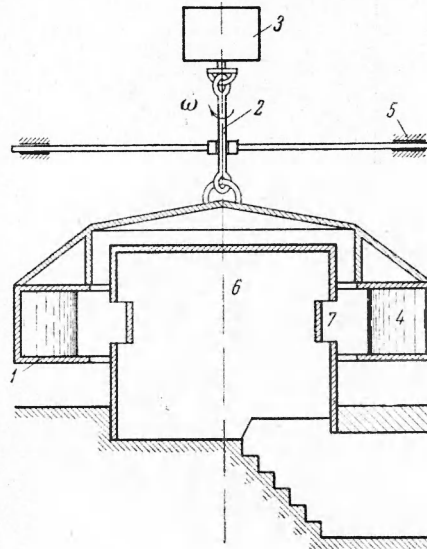
$$\varphi = \text{arc tg } \frac{R}{U^2 g}$$

где R — радиус свободной поверхности, U — скорость потока, g — ускорение силы тяжести.

Для подвески гидроканала использован «гибкий» вал, работающий по принципу струнного привода.

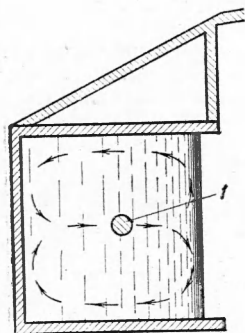
Два шарнирных соединения, связанные жестким валом, дают возможность карусельному гидроканалу вращаться вокруг оси наибольшего момента инерции и, следовательно, работать без биений в режиме самоцентрирования.

Колебания гидроканала вокруг точки подвеса гасятся с помощью демпферов 5, работающих на сухом трении.

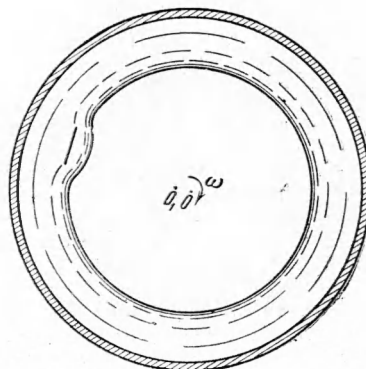


Фиг. 1. Схема устройства карусельного гидроканала

В кабине диаметром 2 м и высотой 2 м располагаются экспериментаторы и находится измерительная аппаратура. Кабина имеет окна 7, предназначенные для помещения исследуемых моделей в гидроканал и наблюдений. При этом изучаемая модель, погруженная в гидроканал и обтекаемая потоком, неподвижна относительно наблюдателя.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Вторичный поток в карусельном гидроканале. 1 — погруженная в поток модель

Фиг. 3. Поверхностная волна в карусельном гидроканале

Работающий в настоящее время карусельный гидроканал (диаметр $D = 4$ м, сечение рабочей части $S = 0,5 \times 0,5$ м²) позволяет получать скорость потока до 25 м/сек при мощности двигателя, равной 15 кВт. Работа кавитационной трубы требует затраты мощности, величина которой может быть оценена из выражения

$$W = k \frac{\rho U^3}{2} S$$

где ρ — плотность жидкости, k — коэффициент, мало отличающийся от единицы. Для трубы, имеющей сечение действующего карусельного канала и ту же скорость потока, необходима мощность 2000 кВт.

Описание работы гидроканала. Скорость потока жидкости лимитируется прочностью карусельного гидроканала и пропорциональна его радиусу и угловой скорости. При сравнительно малых затратах мощности возможно получить значительную скорость потока при достаточно большом сечении рабочего участка канала. Так, например, для работы карусельного гидроканала сечением $1,5 \times 1,5$ м², рассчитанного на скорость 100 м/сек, требуется лишь 2250 кВт. Большая часть мощности расходуется при этом на преодоление момента сопротивления воздуха, который определяется формулой Кармана [1]

$$M = C \frac{U^2 D^3}{2g} \left(\frac{\nu}{UD} \right)^{1/5}$$

Здесь ν — кинематическая вязкость воздуха, C — коэффициент, зависящий от формы карусельного гидроканала. Для сравнения укажем, что для аналогичной кавитационной трубы необходима мощность более одного миллиона киловатт.

Погруженное в поток тело образует за собой след, состоящий из замедленной и завихренной жидкости. В поле центробежных сил заторможенная часть жидкости становится легче окружающего потока и всплывает на его поверхность. Движение жидкости от модели к поверхности вызывает движение жидкости от боковой стенки карусельного гидроканала к модели. Около горизонтальных стенок жидкость перемещается от поверхности к боковой стенке. Можно считать, что происходит наложение на главный поток другого, вторичного потока, направленного перпендикулярно главному потоку (фиг. 2). При отсутствии модели вторичный поток возникает тогда, когда имеется тангенциальное ускорение. Положительное тангенциальное ускорение вызывает вторичный поток, аналогичный изображенному на фиг. 2. При отрицательном тангенциальном ускорении направление вторичного потока изменяется на обратное. Лишь в том случае, когда тангенциальное ускорение равно нулю, вторичные потоки в карусельном гидроканале отсутствуют и жидкость вращается, как твердое тело.

Проведенные измерения поля скоростей потока показали, что за один оборот след успевает всплыть и изучаемая модель встречает постоянно практически однородный поток жидкости. Это важное свойство карусельного гидроканала позволяет проводить модельные эксперименты.

Вследствие случайных причин на свободной поверхности потока могут образовываться поверхностные волны (фиг. 3). Центр вращения карусельного канала смещается при этом из точки O в точку O_1 и возникает прецессия. Поскольку расстояние от нового центра вращения до волны меньше радиуса свободной поверхности, находящаяся в волне частица жидкости обладает большей энергией, чем частица жидкости, расположенная на невозмущенной поверхности волны. Волна стремится переместиться с большего энергетического уровня на меньший, при этом ее энергия увеличивается и возникает опасность раскачки карусельного канала. Для борьбы с этим служат радиальные перегородки, препятствующие перемещению воды вдоль окружности. Радиальные перегородки имеют высоту порядка $1/5$ высоты рабочей части гидроканала и устанавливаются вдоль всей рабочей части гидроканала.

К числу особенностей карусельного гидроканала следует отнести то обстоятельство, что вихри, движущиеся вместе с телом, подвергаются воздействию архимедовой выталкивающей силы, которая в натуральных условиях равна нулю. Для кругового потока принцип Даламбера—Эйлера, согласно которому сопротивление движения тел в идеальной жидкости равно нулю, не выполняется.

Моделирование. Карусельный гидроканал создает большие возможности при моделировании. Большое сечение рабочей части, что позволяет испытывать большие модели, и большая скорость потока дают возможность проводить измерения при числах Рейнольдса порядка 10^8 .

Для числа Фруда можно записать выражение

$$F = \frac{U}{\sqrt{l \sqrt{g^2 + a^2}}}, \quad a = \frac{U^2}{R}$$

здесь l — характерный размер тела, a — центробежное ускорение.

При условии $a \gg g$ число Фруда не зависит от скорости и определяется лишь радиусом карусельного гидроканала R и размером модели: $F = \sqrt{R/l}$.

Многие гидродинамические задачи требуют одновременного моделирования по числам Рейнольдса и числам Фруда, т. е. соответственно должны выполняться

$$\frac{U_1 l_1}{v_1} = \frac{U_2 l_2}{v_2}, \quad \frac{U_1}{\sqrt{l_1 g_1}} = \frac{U_2}{\sqrt{l_2 g_2}} \quad (1)$$

Значок 1 приписывается здесь величинам, относящимся к натуре, а значок 2 — к величинам модели.

Так как в обычных гидродинамических установках величина ускорения силы тяжести для условий испытания модели и натуре может быть принята одинаковой: $g_1 = g_2$ и обычно $v_1 = v_2$, то из (1) следует $l_2 = l_1$ и соответствующий эксперимент не имеет смысла.

В карусельном гидроканале центробежное ускорение на несколько порядков больше ускорения силы тяжести. Это дает принципиальную возможность моделирования одновременно по числам Рейнольдса и по числам Фруда. Размер модели l_2 связан при этом с размером натуре l_1 , как следует из (1), при $v_1 = v_2$ и $g_2 \gg g_1$ соотношением

$$l_2 = l_1 \sqrt[3]{\frac{g_1 R}{U^2}}$$

Наличие у потока свободной поверхности дает возможность изучения не только движения тел в жидкости, но и движение тел на поверхности жидкости.

Особенно большие возможности представляет карусельный гидроканал при изучении кавитационного обтекания тел. При искусственной кавитации в гидроканале можно работать в широком диапазоне чисел кавитации, вплоть до числа кавитации, равного нескольким тысячным.

Отметим, что уже после изготовления карусельного гидроканала авторам стало известно о том, что в 1929 г. сотрудник ЦАГИ Фролов О. О. высказал предположение о возможности постройки гидродинамической установки, работающей на вышеизложенном принципе.

Поступила
27 IV 60

ЛИТЕРАТУРА

1. Карман. Abhandlungen des Aerodynam. Institutes Aachen. Springer, Berlin, 1922.