

HİDROTEKNIKA VƏ MELİORASIYA

УДК. 627.832

А.А. ЛИПИН

Азербайджанское НПО Гидротехники и Мелиорации

ВЛИЯНИЕ ВОДНОГО КОЛЕБАНИЯ НА РАБОТУ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОЗАБОРА

Резюме: Изучено влияние колебаний водной поверхности на работу поверхностных водозаборов. Обобщены формулы и зависимости для определения волновых колебаний вызванных ветром и движением судов. Рассмотрены типы волновых процессов. Установлено влияние волновых процессов на определение критической глубины.

Ключевые слова: колебания водной поверхности, водяные волны, поверхностный водозабор, ветер и движение судна.

Введение: В практике вода забирается поверхностными водозаборами из динамических водных источников, таких как реки или каналы, на различные цели начиная с мелиорации и заканчивая бытовым водоснабжением и энергетикой. Как правило, водозабор погружен на определенную глубину для обеспечения непрерывного забора воды. Если же глубина погружения недостаточна или поверхность воды колеблется, то образуются вихревые потоки и кавитация. Данный феномен может негативно сказаться на работе водозаборного сооружения. Воздух попавший, в систему водозабора может привести к уменьшению производительности, повреждению конструкции, повреждению насосов и увеличению частоты ремонтных работ.

Многочисленные эксперименты были проведены для предотвращения вихреобразования, помещая головную часть водозабора в ограждающую конструкцию, которая теоретически должна предотвращать волновые колебания водной поверхности. Эта ограждающая конструкция имеет форму прямоугольного и цилиндрического железобетонного кессона, который может быть устроен, как в пойме

реки, так и возле берега. Однако в этих гидроузлах водозаборный оголовок располагается значительно ниже поверхности воды. Со временем это приводит к засорению оголовка взвешенными наносами. Следовательно, требуются частые очистки решеток и промывки системы, что также нарушает бесперебойность водозабора. Поэтому целесообразно размещать водозаборный оголовок непосредственно под водной поверхностью. При этом возникает вопрос, какая глубина будет достаточной для избежание вихревых процессов. Это зависит от магнитуды колебаний свободной поверхности воды.

Определение вихревых потоков. Погружение водозаборного оголовка ниже уровня поверхности воды необходимо во избежание феномена под названием вихреобразование (рис. 1). Когда глубина погружения недостаточна воздух попадает в систему через вихревую воронку *Kocabas and Yildirim* [7], *Isbasoiu* [6] заявил, что вихреобразование может оказать негативное воздействие на работу водозаборных сооружений, в том числе и поверхностных водозаборов. В соответствии с *Whitesides* [13], воздух попавший в поток вызывает уменьшение производительности, вибрацию, кавитацию и повреждение конструкции водозабора. Глубина погружения при которой не образуются вихревые потоки называется критической глубиной. Критическая глубина является основной характеристикой образования вихрей с воздушным стволем.

Водяные волны и определение их параметров. В соответствии с *Crappier* [2], *Mei* [10], *Dean and Dalrymple* [4], любое физическое описание водяных волн включает их поверхностную форму и те-

чение ниже поверхности. Волна, которая может быть описана простым математическим условием называется простой волной. Волны, состоящие из нескольких компонентов сложные для описания по форме или движению, называются комплексными (сложными) волнами. Синусоидальные или монохроматические волны являются примером простых волн, так как их поверхность может быть описана простой синусоидой или косинусной функцией. Волна является периодической, если ее движение и поверхностный профиль повторяется в равные интервалы времени, называемые периодом волны. Форма волны, которая движется горизонтально относительно неподвижной точки называется прогрессивной волной, а направление, в котором она движется называется направлением прогрессии волны. Прогрессивные волны – это волны постоянной формы, если они распространяются без каких-либо изменений.

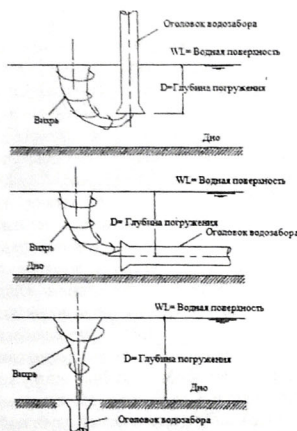


Рис. 1. Формы вихреобразования и критические глубины для 3 различных позиций водозаборного оголовка.

Рис. 2 отображает параметры простой, прогрессивной волны по мере его прохождения относительно неподвижной

точки в реке. Простая, периодическая волна постоянной формы, распространяющаяся по горизонтальному дну, может быть полностью описана: высотой волны H , длиной волны L , глубиной d . Наивысшая точка волны считается гребень, а низшая в свою очередь желоб.



Рис. 2. Определение параметров водяных волн

Для линейных волн и волн маленькой амплитуды, высота гребня над уровнем поверхности воды и расстояние от желоба до поверхности воды в отдельности считаются равными амплитуде a . Поэтому $a=H/2$, где H -высота волны. Интервал времени прохождения двух гребней или двух желобов относительно неподвижной точки называется периодом волны T . Длиной волны L называется горизонтальное расстояние между двумя идентичными точками двух гребней или двух желобов волны.

Влияние волн на минимальную глубину погружения поверхностного водозабора (MSD). Как было упомянуто ранее, свободная поверхность всегда испытывает снижение ниже среднего уровня поверхности воды из-за волн, вызванных природными воздействиями и движением судов. Величина колебания может быть представлена как максимальная глубина желоба волны (полу амплитуда $a=H/2$), прибавленной к критической глубине погружения для получения конечного значения MSD, которое полностью гарантирует избежание образования вихревых процессов. Поэтому критическая глубина погружения MSD_0 , которую необходимо

учитывать при проектировании глубины погружения водозаборной воронки гидроузла, может быть вычислена по следующей формуле:

$$MSD_0 = MSD_i + a \quad (1)$$

где MSD_i - критическая глубина погружения, вычисленная для спокойной поверхности воды;

$$a = a_{(из-за\ движения\ судов)} + a_{(из-за\ ветра)} \quad (2)$$

где a (из-за движения судов) – полу амплитуда колебания вызванная движением судов; a (из-за ветра) – полу амплитуда колебания вызванная ветром.

Полу амплитуда волны a , приведенная выше, принимается максимальной для самого невыгодного случая, который может произойти в районе строительства водозаборного сооружения.

Прежде всего следует отметить что волны, вызванные движением судов, обычно классифицируются двумя системами: основной и второстепенной. De Schipper [3] заявлял, что когда объект (судно) движется по прямому каналу с постоянной скоростью V_s , то вода перемещается от начала объекта за его конец. Локальное ускорение скорости воды по краям корпуса судна, вызывает соответствующие колебания уровня воды вдоль объекта. Этот обратный поток и колебания водной поверхности называются основной системой волны от движущегося объекта.

Поток обтекающий объект вызывает градиенты скорости и давления потока. Эти градиенты генерируют маленькие волны, которые распространяются по жидкости, напоминая брошенный в воду камень. Так как точка возмущения движется, то волны будут пересекаться друг с другом позади судна. Результат результирующей интерференции и есть второстепенная система волны, и может наблюдаться позади судна или любого движущегося объекта в виде V-образной модели как показано на рис. 3.

Расчет колебаний вызванных основной системой волн. De Schipper [3]

утверждает что основная система волн судна в канале описывается определением колебания уровня воды вдоль судна z_a и соответствующим обратным потоком U_r . Магнитуда этих колебаний может быть вычислена, используя сохранение массы и импульса. Для расчетов удобно использовать новую систему отсчета, в которой принято, что судно не имеет скорости и вода протекает вдоль со скоростью V_s . Это преобразование справедливо, так как никакой потери энергии не происходит в расчете. Уравнения баланса в этой системе приводят к группе уравнений (принимая не сжимаемость воды).

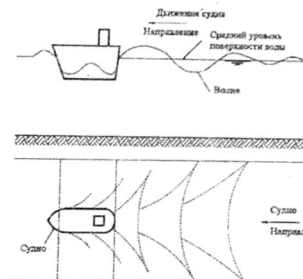


Рис. 3. Основная и второстепенная система волн для движущегося судна, вид сверху и сбоку.

Баланс объема:

$$A_c V_s = [A_c - A_s - z_a (B_c - B_s)] (V_s + U_r) \quad (3)$$

Баланс импульса:

$$\rho V_s^2 + \rho g h = \rho \alpha_u (V_s^2 + U_r^2) + \rho g (h - z_a) \quad (4)$$

В формулах V_s – скорость корпуса (м/с); A_c – площадь поперечного сечения канала (м²); A_s – площадь поперечного сечения судна (м²); B_c – ширина канала (м); B_s – ширина судна (м); z_a – уровень колебания воды по бокам корпуса (м); U_r – средний обратный поток по бокам корпуса (м/с); h – глубина воды (м); g – ускорение свободного падения (м/с²); ρ – плотность воды (кг/м³); α_u – коэффициент распрес-

трагения скорости ($\alpha_u = 1.4 - 0.4 \frac{V_s}{\sqrt{gh}}$). Из формулы (4) видно, что уровень колебаний водной поверхности по краям корпуса z_a может быть рассчитан, если известна величина обратного потока по краям корпуса U_r . Лар [8] вывел фундаментальное уравнение движения судна по каналу, определяющее U_r :

$$\frac{V_s}{\sqrt{gh}} = \frac{V_s + U_r}{\sqrt{gh}} \left\{ 1 - K - \frac{\alpha_u \beta}{2} \left(\frac{V_s + U_r}{\sqrt{gh}} \right)^2 - \left(\frac{V_s}{\sqrt{gh}} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

где K – безразмерный коэффициент, опре-

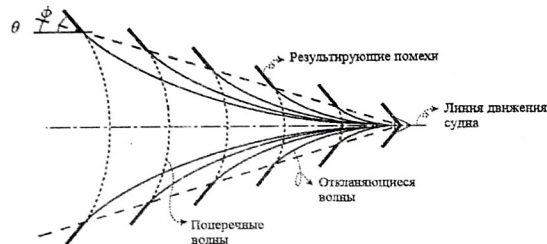


Рис. 4. Модель второстепенных волн на глубокой воде

Рассчет колебаний вызванных второстепенной системой волн. Точное описание модели второстепенных волн было впервые получено Лордом Кельвином [14]. На глубокой воде, если число Фруда $F_{r,d} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \leq 0.6$, они имеют одинаковую форму не зависимо от формы и скорости судна. V - модель состоит из отклоняющихся и поперечных волн. Эти волны пересекаются на линии расположенной под $19^\circ \theta$ к линии движения судна, и результирующие поперечные образуются на этой линии.

Рассчет высоты волн. Рассчет высоты результирующих поперечных волн был темой многих исследований. Однако не одно из этих исследований не дало конкретной теоретической зависимости между формой корпуса судна и скоростью относительно высоты волн. Тем не менее, основываясь на экспериментальной информации, было

делющийся геометрию канала и судна необходимый для расчетов $K = \frac{A_s}{A_c}$; β – безразмерный коэффициент, определяемый шириной свободной поверхности B_{fs}

$$\beta = \frac{B_{fs}}{B_c}$$

Зная остальные параметры уравнения (5), методом проб и ошибок можно определить значение U_r , которое может быть использовано в уравнение (4) для определения величины колебаний z_a :

$$z_a = \frac{\alpha_u}{2g} (V_s + U_r)^2 - \frac{V_s^2}{2g} \quad (6)$$

получено несколько зависимостей. В общем виде высота волны H на расстоянии y от судна является функцией геометрии судна, глубины воды h и скорости v .

$$H = f(L, B, D, h, v, y) \quad (7)$$

Результирующие поперечные на глубокой воде пропорциональны $y^{-1/3}$, это было математически доказано Havelock (1908). Уравнение (8) дает определение результирующих поперечных, вызванных волнами от движения судна на глубокой воде.

$$\frac{H}{h} = \alpha_1 \left(\frac{y}{h} \right)^{-1/3} (F_{r,d})^{\alpha_2} \quad (8)$$

где H – высота волны (м); h – глубина воды (м); y – расстояние до центра судна; $F_{r,d}$ – число Фруда (должно быть < 1 чтобы поток основывался докритическим; α_1 – коэффициент формы; α_2 – безразмерный

коэффициент отношения высоты волны к числу Фруда.

В соответствии с уравнением (8) колебания волн на любом расстоянии y от судна могут быть рассчитаны по формуле:

$$WD_s = \frac{H}{2} = \frac{h}{2} \alpha_1 \left(\frac{y}{h} \right)^{-1/3} (F_{r,d})^{\alpha_2} \quad (9)$$

Рассчет волновых колебаний, вызванных ветром. Имеются несколько формул для расчета высоты волн, вызванных ветром. Модель US Army Corps of Engineers (1984) наиболее широко используется для рек и каналов:

$$WD_w = \frac{H_s}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{0.283 U^2}{g} \right] \cdot \left\{ 0.53 \left(\frac{g d^3}{U^2} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{0.00565 (g F / U^2)^{1/2}}{\left[0.53 \left(\frac{g d^3}{U^2} \right)^{1/4} \right]} \right] \right\} \quad (10)$$

где U – средняя скорость ветра в рассматриваемом районе (м/с); g – ускорение свободного падения (м/с²); d – средняя глубина (м); F – длина выборки (м) (получаемая из прогноза погоды)

Сравнивая величины волновых колебаний от основных и второстепенных волн, было выявлено что значения второстепенных колебаний всегда выше. Они также имеют серьезное увеличение по сравнению с начальной критической глубиной, следовательно, ими нельзя пренебрегать при расчетах. Волновые колебания, вызванные ветровой нагрузкой должны быть учтены в расчетах не зависимо от их значения, так как они влияют на величину критической глубины.

Заклучение. При расчетах критической глубины поверхностных водозаборов должны быть учтены волновые колебания водной поверхности и волны, вызванные ветром и движением судов. Приведенные выше зависимости показывают влияние волновых эффектов на образование вихревых процессов и кавитации при работе поверхностных водозаборов. Было установлено что эффект от второстепенных волн всегда больше чем от основных, следовательно, они всегда должны быть

учтены при расчетах критической глубины водозаборных сооружений. Определение абсолютной критической глубины дает четкое представление о глубине установки поверхностного водозабора. В некоторых случаях могут потребоваться мероприятия по углублению дна для достижения необходимой глубины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anwar, H.O. 1968, "Prevention of vortices at intakes", *Water Power*, (October), pp. 393-401.
2. Crapper, G.D. 1984, "Introduction to Water Waves", John Wiley & Sons, New York.
3. de Schipper, M.A. 2007, "On the generation of surfable ship waves in a circular pool: Part I". MSc. Thesis, Delft University of Technology; Delft. Faculty of Civil Engineering and Geosciences Section of Hydraulic Engineering and Environmental Fluid Mechanics.
4. Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. 1991, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
5. Havelock, T.H., 1908, "The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media with Application to Waves on Water Produced by a Travelling Disturbance", *Proceedings of the Royal Society, Series A*, Vol. 81, pp 398-430. London.
6. Isbasoiu, E.C., Muntean, T., Safta, C.A. and Stancu, P. 2005, "Swirling Flows in the Suction Sumps of Vertical Pumps, Theoretical Approach", *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Mechanics, Special Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC 14 2010, Cairo, Egypt* 1033 issue, Workshop on Vortex Dominated Flows-Achievements and Open Problems, Timisoara, Romania, June 10 - 11, 2005.
7. Kocabas, F. and Yildirim, N. 2000, "Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, 2002, No. 6, pp. 741-752.