

Э.П. АЩИАЦ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ВОДОНАПОРНОЙ КОЛОННЕ

Разработана методика расчета амплитуды колебания горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне при установке диафрагмы у ее основания.

Ключевые слова: водонапорная колонна, диафрагма, амплитуда колебаний.

Надежным способом гашения гидравлического удара в нагнетательном водоводе насосной установки при незначительной высоте подъема воды и малой инерции вращающихся масс насосных агрегатов является использование водонапорной колонны, установленной в начале водовода после обратного клапана (см. рис.).

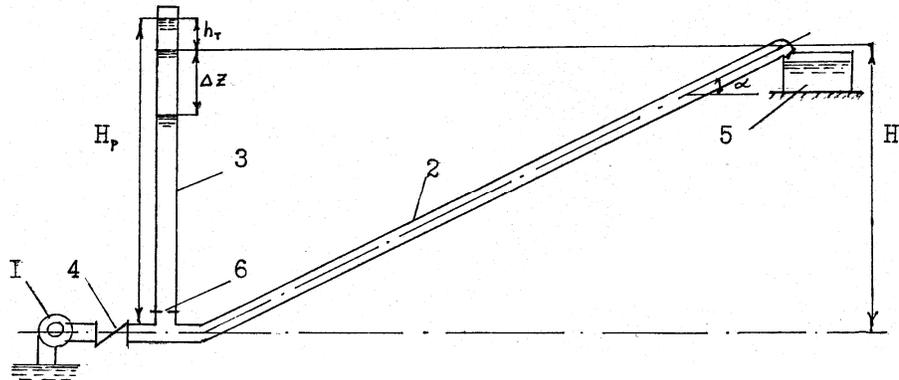


Рис. Схема нагнетательного водовода с водонапорной колонной:

1-насос; 2-нагнетательный трубопровод; 3-водонапорная колонна; 4-обратный клапан; 5-приемный бассейн; 6-диафрагма

Водонапорная колонна представляет собой одну из разновидностей уравнильных резервуаров, используемых на напорных водоводах ГЭС.

Гидравлический расчет амплитуды колебаний уровня воды в водонапорной колонне несколько проще, чем в уравнильных резервуарах. Этому способствует следующее обстоятельство. При отключении электропитания двигателя насоса давление, развиваемое насосом в течение очень малого промежутка времени (секунда или доли секунды), резко уменьшается и становится значительно меньше статического уровня в водонапорной колонне. За такой промежуток времени уровень свободной поверхности воды в

водонапорной колонне не в состоянии значительно понизиться, что вызывает перепад давления до и после обратного клапана, в результате чего он закрывается, и подача воды насосом прекращается.

При стационарном режиме работы насосной установки уровень горизонта воды в водонапорной колонне равен $H_p = H_0 + h_T$, где H_0 - статический напор в начале водовода; h_T - потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений.

При отключении электропитания двигателя насоса 1 (см. рис.) в напорной системе возникает нестационарный процесс, начинающийся с понижения давления. В этот промежуток времени в нагнетательном водоводе 2 имеет место явление гидравлического удара с последующим колебанием колонны жидкости. Понижение уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне 3 определяется запасом кинетической энергии колонны жидкости в нагнетательном водоводе, диаметром водонапорной колонны, наличием гидравлических сопротивлений и другими факторами. Так же, как и в уравнильных резервуарах ГЭС [1,2], с целью уменьшения амплитуды колебаний горизонта вода в водонапорной колонне у е, основания рекомендуется устанавливать диафрагму б (см. рис.).

При установке водонапорной колонны основной задачей гидравлического расч, та является определение оптимального диаметра водонапорной колонны и площади отверстия диафрагмы, при которых обеспечивается допускаемая амплитуда колебаний горизонта воды в водонапорной колонне.

Диаметр трубы водонапорной колонны вначале рекомендуется принимать равным диаметру нагнетательного водовода.

При установке у основания водонапорной колонны диафрагмы, для исключения возможности образования в начале водовода при понижении давления разрыва сплошности потока, минимальная площадь отверстия диафрагмы определяется исходя из необходимости выполнения условия

$$V_0 A_1 = A_d \sqrt{2gH_0} / \sqrt{1 + \xi_d}, \quad (1)$$

где V_0 - скорость течения жидкости в нагнетательном трубопроводе при стационарном режиме работы насосной установки; A_1 - площадь сечения нагнетательного водовода; A_d - площадь отверстия диафрагмы; ξ_d - коэффициент гидравлического сопротивления диафрагмы, определяемый по формуле [3]

$$\xi_d = \left(\frac{A_k}{\varepsilon A_d} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

A_k - площадь сечения водонапорной колонны; ε - коэффициент сжатия.

Имея в виду (2), минимальная площадь отверстия диафрагмы определяется из равенства

$$\left(\frac{A_k}{\varepsilon A_d} - 1\right)^2 = \left(\frac{A_d}{A_1}\right)^2 \frac{2gH_0}{V_0^2} - 1. \quad (3)$$

При нестационарном процессе волновые явления в нагнетательном водоводе быстро затухают, а колебания горизонта свободной поверхности воды водонапорной колонны будут иметь значительный промежуток времени. Поэтому основным динамическим уравнением движения колонны жидкости для рассматриваемой напорной системы является уравнение Д. Бернулли для нестационарного течения.

Если за плоскость сравнения принять уровень статического напора - H_0 в начале водовода, то уравнение, составленное для сечений, взятых на свободной поверхности воды в водонапорной колонне и на конце нагнетательного водовода, может быть представлено в виде

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} + \xi_d \frac{V_1^2}{2g} + \xi_\ell \frac{V^2}{2g} + \frac{\ell}{g} \frac{dV}{dt}, \quad (4)$$

где $Z_1 = h_T - \frac{A_1}{A_k} S$; S - расстояние, пройденное колонной жидкости в нагнетательном водоводе; $h_T = -\frac{\lambda_0 \ell}{S} \frac{V^2}{2g}$; ℓ -- длина нагнетательного водовода; $\xi_\ell = \lambda_0 \ell / D$; $V_1 = \frac{A_1}{A_k} V$; V - средняя скорость течения жидкости в нагнетательном водоводе; g - ускорение силы тяжести; t - время.

Заменяя в (4) переменную t на S , получим дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dy}{dS} + py = a - bS, \quad (5)$$

где $y = V^2$; $P = [1 - \left(\frac{A_1}{A_k}\right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_k}\right)^2 \xi_d + \xi_\ell] / \ell$; $a = 2gh_T / \ell$; $b = 2g \frac{A_1}{A_k} / \ell$.

Интегрируя уравнение (5) при начальном условии $S=0$, $V=V_0$, получим зависимость, определяющую изменение скорости течения колонны жидкости при ее замедленном движении в зависимости от переменной S :

$$V = \sqrt{V_0^2 e^{-PS} + \frac{a}{p}(1 - e^{-PS}) - \frac{b}{p^2}(e^{-PS} + PS - 1)}. \quad (6)$$

При $P \rightarrow 0$ зависимость (6) принимает вид

$$V = \sqrt{V_0^2 - \frac{g}{\ell} S^2}. \quad (7)$$

Приравнявая выражение (7) нулю, определяем максимальное расстояние - S_{\max} , пройденное колонной жидкости в нагнетательном водоводе:

$$S_{\max} = V_0 \sqrt{\ell A_k / g A_1}. \quad (8)$$

Исходя из условия неразрывности течения $A_1 S_{\max} = A_k Z_{\max}$, где Z_{\max} - максимальная величина понижения горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне, получим

$$Z_{\max} = V_0 \sqrt{\ell A_1 / g A_k}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что для уменьшения амплитуды колебаний уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне необходимо, чтобы $A_k > A_1$.

Зависимости (7)-(9) представляют в основном теоретический интерес. В действительности, из-за наличия влияния гидравлических сопротивлений, как это видно из (6), понижение уровня воды в водонапорной колонне будет значительно меньше.

После остановки колонны жидкости она начинает двигаться в обратном направлении благодаря возникшему перепаду горизонтов свободной поверхности воды $-\Delta Z$ на конце нагнетательного водовода и в водонапорной колонне:

$$\Delta Z = Z_{\max} - h_T. \quad (10)$$

Если $\Delta Z \leq h_T$, то дальнейшее определение величины повышения горизонта воды в водонапорной колонне не представляет практического интереса, так как это превышение над статическим уровнем не будет больше величины h_T .

При обратном течении жидкости в нагнетательном водоводе возникший ранее перепад ΔZ будет уменьшаться в зависимости от расстояния S , пройденного колонной жидкости. При расчетной схеме водовода, представленной на рисунке, изменение перепада уровней в зависимости от расстояния S можно представить в виде

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_k} + \sin \alpha \right) S, \quad (11)$$

где α - угол наклона нагнетательного водовода к горизонту.

Под действием указанного перепада давления обеспечивается образование обратной скорости течения, преодоление гидравлических сопротивлений в нагнетательном водоводе и водонапорной колонне и возникновение инерционного напора. Таким образом, уравнение Бернулли для переходного процесса будет иметь вид

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_k} + \sin \alpha \right) S + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} + \xi_a \frac{V_1^2}{2g} + \xi_\ell \frac{V^2}{2g} + \frac{\ell_1}{2g} \frac{dV}{dt}, \quad (12)$$

где $\ell_1 = \ell_T + \ell_K$; ℓ_T - длина нагнетательного водовода; ℓ_K - длина колонны жидкости в водонапорной колонне, принимаемая равной $\ell_K = H_0 - \Delta Z$.

Так как $V_1 = \frac{A_1}{A_K} V$, то выражение (12) можно представить в виде

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_K} + \sin \alpha \right) S = \frac{V^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_{\text{д}} \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_{\text{т}} \right] + \frac{\ell_1}{2g} \frac{d(V^2)}{dS}. \quad (13)$$

Так же, как и ранее, интегрируя уравнение (13) при начальном условии $S=0, V=0$, получим

$$V_{\text{об}} = \sqrt{\frac{a_1}{P_1} (1 - e^{-P_1 S}) - \frac{b_1}{P_1} (e^{-P_1 S} + P_1 S - 1)}, \quad (14)$$

где $P_1 = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_{\text{д}} \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_{\text{т}} \right] / \ell$; $a = 2g\Delta Z / \ell$; $b_1 = 2g \left(\frac{A_1}{A_K} + \sin \alpha \right) / \ell$.

Приравнявая выражение (14) нулю, определяем расстояние, пройденное колонной жидкости при обратном движении, и соответственно повышение уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне над статическим уровнем.

Пример. Определим максимальную амплитуду колебания горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне, установленной в начале нагнетательного водовода (рис.), при внезапном обесточивании электродвигателя насоса. Основные расчетные данные следующие: длина нагнетательного водовода $\ell = 500$ м; высота подъема воды $H_0 = 9$ м; диаметр нагнетательного водовода $D = 0,4$ м; скорость течения воды в нагнетательном водоводе при стационарном режиме работы насосной установки $V_0 = 1,5$ м/с; коэффициент гидравлического сопротивления по длине водовода $\lambda_0 = 0,021$; потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений в начале водовода $h_T = 3$ м.

Диаметр водонапорной колонны принимается равным диаметру нагнетательного водовода, т.е. $D_1 = D_K$ и $A_1 = A_K$.

Для решения задачи вначале из равенства (3) определяем диаметр отверстия диафрагмы, принимая значение коэффициента сжатия равным $\varepsilon = 0,65$:

$$\left(\frac{0,4}{0,65 d_{\text{д}}} - 1 \right) = \left(\frac{d_{\text{д}}^2}{0,4^2} \right) \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 9}{1,5^2}.$$

Равенство удовлетворяется при $d_{\text{д}} = 0,24$ м.

Имея значение $d_{\text{д}}$, по формуле (2) определяем значение коэффициента сопротивления диафрагмы $\xi_{\text{д}}$:

$$\xi_d = \left(\frac{0,4^2}{0,65 \cdot 0,245^2} - 1 \right)^2 = 9,6.$$

Далее определяем значения параметров p , a и b , входящих в зависимость (6):

$$P = \left[1 - \left(\frac{0,4}{0,4} \right)^2 + \left(\frac{0,4}{0,4} \right)^2 \cdot 9,6 + \frac{0,021 \cdot 500}{0,4} \right] / 500 = 0,072 \text{ 1/м.}$$

$$a = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 3}{500} = 0,118 \text{ м/с}^2; \quad \dot{a} = \frac{2 \cdot 9,81}{500} = 0,393 \text{ 1/с}^2.$$

Подставляя значения указанных параметров в (6) и приравнявая нулю, получим

$$1,5^2 \cdot e^{-0,0729} + \frac{0,118}{0,072} (1 - e^{-0,0725}) - \frac{0,393}{(0,072)^2} (e^{-0,00729} + 0,0729 - 1) = 0.$$

Равенство удовлетворяется при $S=3,75 \text{ м.}$

Так как $A_1=A_k$, то максимальная амплитуда колебания горизонта воды в водонапорной колонне будет равна $3,75 \text{ м.}$ В дальнейшем эта амплитуда будет существенно уменьшаться.

Таким образом, как показывают расчеты, гидравлические сопротивления существенно уменьшают амплитуду колебаний горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование водной энергии / Под ред. Д. С. Щавелева -Л.: Энергия,1976.-656 с.
2. Аронович Г.В., Картвелишвили Н. А., Любимцев Я. К. Гидравлический удар и уравнивательные резервуары. - М.: Наука, 1968. - 248 с.
3. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика - М.: Стройиздат, 1987. - 414 с.

Инт-т водных проблем и гидротехники. Материал поступил в редакцию 02.02.2004.

Է.Պ. ԱՇՉԻՅԱՆՑ

ՋՐԱՃՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ՍՅՈՒՆՈՒՄ ՋՐԻ ԱՁԱՏ ՄԱԿԵՐԿՈՒՅԹԻ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՏՍՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Մշակված է ջրաճնշումային սյունում ջրի ազատ մակերևույթի հորիզոնի տատանման ամպլիտուդի հաշվարկային մեթոդիկան, սյունի հիմքում դիաֆրագմայի տեղադրման դեպքում:

E.P. ASCHYANTS

DETERMINATION OF FREE WATER SURFACE LEVEL OSCILLATION AMPLITUDE IN WATER HEAD COLUMN

Free water surface horison oscillation amplitude calculation technique in a water head column while setting up the diaphragm at its base is developed.