

УДК 532.513

**Ф. Х. Нишонов**

Ташкентский архитектурно-строительный институт, Ташкент, Республика Узбекистан

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА ПРИ ВНЕЗАПНОЙ ОСТАНОВКЕ НАСОСА В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ**

*Выполнено моделирование гидравлического удара при внезапной остановке насоса в гидротехнических сооружениях. Рассматривается методика определения колебания давления воздуха в воздушно-гидравлическом колпаке при гидравлическом ударе. Анализируются перемещения центра уровня воды в воздушном колпаке. Приводятся аналитические формулы для расчета длительности и мощности удара.*

*Ключевые слова: воздушно-гидравлический колпак, центробежные насосы, напорная линия, абсолютное давление, изотермическое расширение, дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами.*

При остановке двигателя или обрыве приводного ремня у приводных насосов поршневые насосы быстро останавливаются и прекращают подачу воды из всасывающей в напорную линию. При этом за насосом в напорной линии возникает волна понижения давления, которая направляется к водонапорной башне, а там, отразившись от горизонта воды в баке, она возвращается обратно в виде волны повышения той же самой величины, что и первая, но с обратным знаком, и т. д. Такое же явление наблюдается и у центробежных насосов, но с малой инерцией. Поэтому расчет емкости воздушно-гидравлического колпака для предохранения напорной линии от вредных последствий гидравлического удара, возникающего при внезапной остановке поршневого насоса, производится по тем же правилам, что и для центробежных насосов с малой инерцией.

Вопрос о внезапной остановке центробежных насосов и применении гасителей удара в виде воздушно-гидравлического колпака является актуальным при широком распространении центробежных насосов.

Колпаки больших размеров уменьшают силу гидравлического удара, а колпаки недостаточных размеров усиливают колебания давления. При этом необходимо отметить, что в первый период, когда вода после остановки насоса направляется от него к башне, колпак играет всегда положительную роль; во второй период, при обратном движении воды, колпак недостаточных размеров может вызвать увеличение подъема давления по сравнению со случаем отсутствия колпака [1–3].

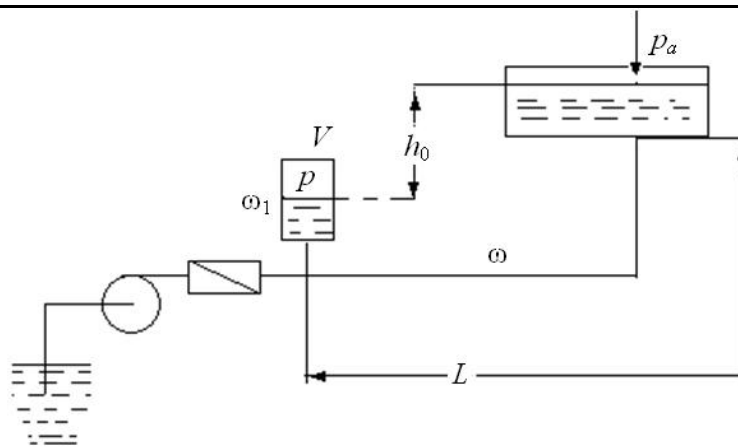
Рассмотрим методы расчета воздушно-гидравлических колпаков при центробежных насосах при следующих допущениях:

- материал труб и вода – неупругие;
- влияние гидравлического трения при движении воды в трубах не учитывается;
- колебания объема воздуха в колпаке незначительны.

Воздушно-гидравлический колпак устанавливается на напорной линии около насоса впереди обратного клапана (рисунок 1); при внезапной остановке мотора обратный клапан закрывается, так как давление от колпака впереди клапана становится больше давления со стороны насоса. Абсолютное давление в воздушном колпаке при нормальной работе насоса, если не учитывать потерь на трение в трубах, будет составлять:

$$p_0 = \gamma h_0 + p_a,$$

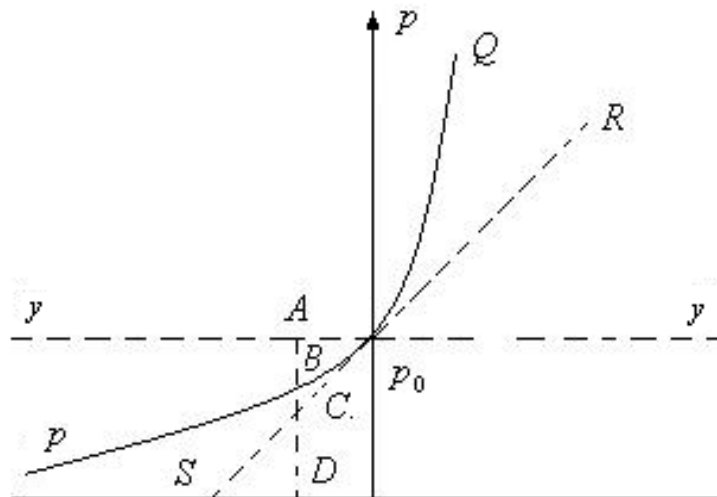
где  $p_a$  – атмосферное давление.



**Рисунок 1 – Воздушно-гидравлический колпак**

При изометрическом расширении воздуха [3–5] (рисунок 2):

$$pV = p_0V_0, V = V_0 + \omega_1 y. \quad (1)$$



**Рисунок 2 – Зависимость уровня воды в колпаке от изотермического закона**

Кроме того, по закону неразрывности массы воды можем записать:

$$\omega_1 y = \omega x. \quad (2)$$

Сила давления воды в трубе  $(p - p_0)\omega$  удовлетворяет второму закону Ньютона, отсюда имеем:

$$(p - p_0)\omega = m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\gamma L \omega}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Из приведенных соотношений получим дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{\gamma L}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + p_0 - \frac{p_0}{1 + \omega \frac{x}{V_0}} = 0. \quad (3)$$

Так как в третьем члене  $x$  встречается в знаменателе, то данное уравнение затруднительно для точного решения; поэтому, принимая допущение о малом изменении объема воздуха в колпаке, т. е. величин  $\omega_1 y$  и  $\omega x$ , можно подставить в уравнение (3)

вместо  $1 / (1 + \frac{\omega x}{V_0})$  выражение  $1 - \frac{\omega x}{V_0}$ , тогда уравнение (3) примет вид:

$$\frac{\gamma L}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + p_0 \frac{\omega x}{V_0} = 0.$$

Общее решение этого дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами будет следующим:

$$x = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{fp_0 g}{\gamma L U_0}} t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{fp_0 g}{\gamma L U_0}} t\right),$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные величины, численное значение которых определяется из начальных условий  $t=0$ ,  $x=0$  и  $\frac{dx}{dt} = \vartheta$ . Отсюда  $C_1 = 0$ , поэтому:

$$\frac{dx}{dt} = \vartheta_0 = C_2 \sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma L V_0}} \cos\sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma V_0}} t. \quad (4)$$

Для начальных условий при  $t=0$  из последнего уравнения находим:

$$C_2 = \vartheta_0 \sqrt{\frac{\gamma L V_0}{\omega p_0 g}}.$$

И, следовательно:

$$\frac{dx}{dt} = \vartheta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma L V_0}} t\right).$$

Таким образом,

$$p - p_0 = \frac{m}{\omega} \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{m}{\omega} \vartheta_0 \sin\left(\sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma L V_0}} t\right) \sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma L V_0}} = -\vartheta_0 \sqrt{\frac{\gamma L \omega p_0}{g V_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{\omega p_0 g}{\gamma L V_0}} t\right). \quad (5)$$

Согласно формуле (5) колебания давления можно представить в виде синусоиды, период которой будет  $T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma L V_0}{\omega p_0 g}}$ , соответственно:

$$p_{\min} = p_0 - \vartheta_0 = \sqrt{\frac{\gamma L \omega p_0}{V_0 g}}, \quad p_{\max} = p_0 + \vartheta_0 = \sqrt{\frac{\gamma L \omega p_0}{V_0 g}}.$$

Из последних формул следует, что колебания давления воздуха в колпаке тем больше, чем:

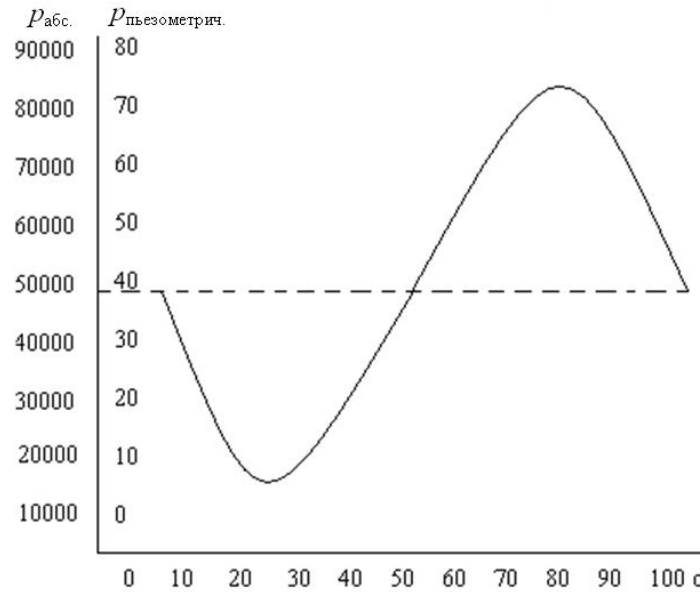
- больше начальная скорость  $\vartheta_0$ ;
- больше начальное давление воздуха в колпаке  $p_0$ ;
- больше объем воды в трубе  $L \cdot \omega$ ;
- чем меньше объем воздуха в колпаке.

При этом длительности синусоидального колебания  $T$  значительно больше, чем длительность полного периода упругого колебания  $\frac{4L}{a}$  (рисунок 3), так как при практических соотношениях обычно  $T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma L V_0}{\omega p_0 g}} > 2t_\phi = \frac{4L}{a}$ . После возведения обеих частей неравенства в квадрат получим:

$$\frac{V_0}{\omega L} > \frac{4 p_0 g}{\pi^2 a^2 \gamma},$$

что при измерении в метрах даст обычное практическое соотношение:

$$\frac{V_0}{\omega L} > \frac{4}{10^9} p_0.$$



**Рисунок 3 – Длительность синусоидального колебания в воздушно-гидравлическом колпаке**

В приведенных выше формулах приняты обозначения:

$\omega_1$  – площадь горизонтального сечения колпака (колпак представляется в виде прямого цилиндра),  $\text{м}^2$ ;

$\omega$  – площадь поперечного сечения напорной линии,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – длина напорной линии, м;

$V$  – переменный объем воздуха в колпаке,  $\text{м}^3$ ;

$V_0$  – начальный объем воздуха в колпаке,  $\text{м}^3$ ;

$p$  – переменное давление воздуха в колпаке, Па ( $\text{кН}/\text{м}^2$ );

$p_0$  – начальное давление воздуха в колпаке, Па ( $\text{кН}/\text{м}^2$ );

$\gamma$  – вес единицы объема воды,  $\text{кН}/\text{м}^3$ ;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$m$  – масса воды в напорной линии, кг;

$x$  – перемещение центра тяжести массы воды в напорной линии (величина переменная), м;

$\vartheta$  – переменная скорость центра тяжести массы воды в напорной линии,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\vartheta_0$  – начальная скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$h_0$  – начальное давление воздуха в колпаке, м;

$y$  – вертикальное перемещение поверхности воды в воздушном колпаке, м.

Относительно степени соответствия рассмотренного метода фактическим условиям работы водовода с колпаком необходимо заметить, что замена уравнения (3) уравнением (4) ставит работу движущейся массы воды при остановке последней в линейную зависимость от перемещения центра тяжести массы  $x$  или от перемещения уровня воды в воздушном колпаке  $y$ , в то время как эта зависимость следует изотермическому закону; это обстоятельство изображено на рисунке 2.

Согласно закону изотермического расширения перемещение уровня воды в колпаке  $y$  должно идти по кривой  $PQ$ ; принятое же приближение предполагает это перемещение по прямой  $RS$ , касательной  $PQ$  в точке  $p_0$ . Допустим, что в некоторой точке  $A$  ордината  $y$ , которая должна иметь значение  $AB$ , при приближенном решении по-

---

лучила значение ДС; погрешность выразится отрезком  $BC$  и будет тем меньше, чем меньше колебание уровня воды в колпаке. При большой величине  $V_0$  кривая  $PQ$  будет иметь тенденцию к выпрямлению, и погрешность будет также уменьшаться.

#### **Список использованных источников**

1 Schnyder, O. Uber Druerkstosse in verzweigten Leitungen mit besonderer Berucksichtigung von Wasserschlossanlagen / O. Schnyder // *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*. – № 12. – S. 1035.

2 Bergeron, L. Etude de variations de regime dans les conduits d'eau (solution graphique general) / L. Bergeron // *Revue General de Hydraulique*. – 1976. – Vol. 1. – P. 12 et 69.

3 Кригер, В. Гидроэлектрический справочник / В. Кригер, Дж. Джестин; под ред. П. А. Ефимовича, Б. М. Любченко. – М. – Л.: Энергоиздат, 1937. – Т. 1. – 392 с.

4 Сурин, А. А. Гидравлический удар в водопроводах и борьба с ним / А. А. Сурин. – М.: Трансжелдориздат, 1946. – 372 с.

5 Хамидов, А. А. Гидромеханика / А. А. Хамидов, С. И. Худайкулов, И. Э. Махмудов. – Ташкент: ФАН, 2008. – 340 с.