

К ТЕОРИИ ВОДОПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА ЧЕРЕПНОВА

Г. В. АРОНОВИЧ, Э. Я. ШТАЕРМАН

(Горький)

Излагается приближенный расчет водоподъемного устройства Л. С. Черепнова, рассматриваемого как автоколебательная система, совершающая релаксационные колебания за счет энергии падающей воды. Отмечается, что в противоположность гидравлическому тарану инерция воды для работы водоподъемника не существенна.

За последнее время для снабжения водой животноводческих ферм в некоторых колхозах используется безмоторная водоподъемная установка Л. С. Черепнова [1-3]. Последняя состоит в основном из двух цилиндрических герметически закрытых баков — нижнего 1 и верхнего 2 и четырех труб — напорной 5, питающей 8, соединительной 6 и нагнетательной 7 (фигура). При входе трубы 8 в бак 2 установлен обратный клапан 9; другой обратный клапан ограничивает уровень воды в нагнетательной трубе 7.

В баке 1 имеется сливной клапан, открытие и закрытие которого осуществляется специальным поплавковым устройством 4. Последнее автоматически открывает отверстие В, когда уровень воды достигает верха 1 бака 1, и оставляет отверстие В открытым до тех пор, пока вода из бака 1 не сольется, после чего сливной клапан закрывается [2]. Водоподъемник устанавливается около родника, воду которого следует поднять на нужную высоту, причем дебит Q источника может быть весьма мал.

Принцип действия водоподъемника следующий. Вода из родника стекает в колодец 3, откуда поступает в бак 2 (верх последнего располагается несколько ниже минимального уровня воды в колодце). Когда бак 2 наполнится водой, то, поскольку конец трубы 5 в колодце устанавливается несколько выше конца трубы 8, уровень воды в колодце начнет подниматься до тех пор, пока не достигнет отверстия трубы 5, после чего вода заполняет нижний бак 1. Воздух в нижнем баке под действием энергии падающей воды сжимается, его давление растет, и обратный клапан 9 закрывается. Затем

в течение некоторого промежутка времени происходит дальнейшее сжатие воздуха в нижнем баке до тех пор, пока его давление не превысит противодействие столба жидкости H_3 в нагнетательной трубе 7. Тогда откроется клапан 10 и вода из бака 2 начнет выжиматься воздухом через трубу 7 потребителю. Для работы водоподъемника необходимо, чтобы высота H_1 напора превышала высоту подъема H_3 не меньше чем на величину потерь из-за сопротивлений в трубах. Подъем и подача воды происходят до тех пор, пока нижний бак не наполнится водой. Тогда срабатывает специальное поплавковое устройство 4, установленное в баке 1, открывается сливное отверстие В, вода из нижнего бака 1 сливается, а верхний бак 2 снова начнет наполняться водой. Далее процесс повторяется.

Из сказанного видно, что водоподъемное устройство Черепнова — это автоколебательная система, совершающая релаксационные колебания за счет энергии падающей воды [3]. В отличие от гидравлического тарана, инерция воды для работы установки Черепнова существенного значения не имеет.

Весь цикл работы водоподъемника можно разбить на несколько этапов.

Первый этап — наполнение бака 2; уровень воды в колодце 3 несколько понижается.

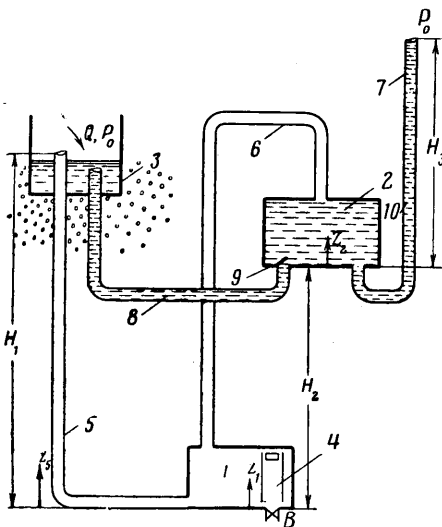
Второй этап. Бак 2 наполнен, происходит подъем воды в колодце до уровня трубы 5.

Третий этап. Вода, переливаясь через край трубы 5, наполняет бак 1, но подачи воды потребителю не происходит (давление воздуха p_1 в баке 1, меньше противодействия в трубе 7). Клапаны 9 и 10 закрыты.

Четвертый этап. Вода наполняет бак 1. Клапан 10 открыт, происходит подъем воды из бака 2 потребителю на высоту $H_3 < p_1 / \gamma$.

Пятый этап. Открывается отверстие В. Вода из бака 1 сливается. Пусть V_1 и V_2 — объемы баков 1 и соответственно 2 V_2' — объем воды, подаваемой за один цикл из

¹ Вместо поплавкового устройства 4 можно использовать сифон



бака (2) потребителю ($V_2' \leq V_2$). Тогда суммарная продолжительность первого и второго этапов в стационарном режиме будет равна

$$T_1 + T_2 = V_2' / Q \quad (1)$$

подобно тому, как это имеет место в случае автоколебаний в некоторых гидравлических системах (например, в так называемой вазе Тантала ([8], стр. 5).

Аналогично суммарная продолжительность третьего и четвертого этапов (если пренебречь объемом воды в трубе 5) равна

$$T_3 + T_4 = V_1 / Q \quad (2)$$

общая продолжительность всего цикла в целом в стационарном режиме, т. е. период автоколебаний, будет равен

$$T = \sum_{i=1}^5 T_i = \frac{V_1 + V_2'}{Q} + T_5 \quad (3)$$

Если T_5 (продолжительность пятого этапа) относительно мала, то величина T при заданных V_1 и V_2' фактически определяется дебитом источника Q . Следует отметить, что в действующей конструкции водоподъемника поплавковое устройство временно открывает как отверстие B для слива, так и специальное отверстие для выхода воздуха из верхнего бака. Поэтому на практике начало слива фактически почти совпадает с началом следующего периода автоколебания, и, следовательно, при подсчете периода автоколебания T_5 можно не учитывать.

Для определения полезного объема V_2' можно поступить следующим образом. В течение третьего этапа давление воздуха в баке 1 подчиняется уравнению

$$p_0 (\sigma_1 h_1 + V_6) = [(h_1 - z_1) \sigma_1 + V_6] p_1 = \text{const} \quad \left(\frac{p_1}{\gamma} \leq \frac{p_0}{\gamma} + H_3 - h_2 \right) \quad (4)$$

Здесь h_1 и σ_1 — соответственно высота и площадь поперечного сечения бака 1, V_6 — объем воздуха в соединительной трубе 6. Возможный подсос воздуха из колодца 3 не учитывается.

С другой стороны, так как влияние инерции воды на работу водоподъемника несущественно, то гидравлические процессы в системе можно рассматривать как квазистационарные. Пренебрегая скоростным напором, получим

$$\frac{p_0}{\gamma} + z_5 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \quad (5)$$

Кроме того, будем иметь уравнение неразрывности

$$Qt = \sigma_5 z_5 + \sigma_1 z_1, \quad \text{или} \quad Qt = \left(z_1 + \frac{p_1 - p_0}{\gamma} \right) \sigma_5 + \sigma_1 z_1 \quad (6)$$

При $\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_0}{\gamma} + H_3 - h_2$, $z_1 = z_1'$, $t = T_3$. Из предыдущего имеем

$$V_1' = \sigma_1 z_1' = \sigma_1 h_1 + V_6 - \frac{\text{const}}{p_1} = (V_1 + V_6) \frac{H_3 - h_2}{p_0 / \gamma + H_3 - h_2} \quad (7)$$

$$T_3 = \frac{(z_1' + H_3 - h_2) \sigma_5 + V_1'}{Q} \quad (8)$$

Если по-прежнему пренебречь объемом воды V_6 , то

$$T_3 = \frac{V_1'}{Q} = \frac{(V_1 + V_6)(H_3 - h_2)}{Q(p_0 / \gamma + H_3 - h_2)} \quad (9)$$

В общем случае

$$V_2' \neq V_1 - V_1'$$

Поэтому далее рассмотрим процессы во время четвертого этапа (нагнетания). Для этого этапа будем иметь соотношения ($V_5 \approx 0$, $z_1' < z_1 < h_1$)

$$Q(t - T_3) = \sigma_1 (z_1 - z_1') \quad (10)$$

$$\frac{p_0}{\gamma} + H_1 - z_1 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} + (1 + \alpha) \frac{v_7^2}{2g} + H_3 - z_2 \quad (v_2 \sigma_2 = v_7 \sigma_7) \quad (11)$$

Здесь α — коэффициент напора. При этом сделано допущение, что z_5 , равное к концу третьего этапа $H_3 - h_1 + z_1'$, во время четвертого этапа равно H_1 , и, таким образом, пренебрегаем временем ΔT подъема воды в трубке 5 на высоту $H_1 - H_3 + h_2 - z_1'$. В то же время принимается, что за время ΔT уровень воды z_1' в баке 1 не успевает измениться. Эти допущения есть следствие принятой выше гипотезы квазистационарности.

Так как $v_2 = -dz_2/dt$, то (11) можно записать в виде

$$H_1 - H_3 - z_1 + z_2 = Ez_2^2, \quad E = \left[(1 + \alpha) \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_7} \right)^2 - 1 \right] \frac{1}{2g} \approx \frac{1 + \alpha}{2g} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_7} \right)^2 \quad (12)$$

Тогда

$$V_2' = \sigma_2 \int_0^{T_4} v_2 dt = -\sigma_2 \int_0^{T_4} z_2' dt = -\sigma_2 \int_{T_3}^{T_3+T_4} z_2' dt = \sigma_2 [h_2 - z_2 (T_3 + T_4)] \left(T_4 = \frac{v_1 - v_1'}{Q} \right) \quad (13)$$

Здесь $z_2(t)$ — решение уравнения (12). Уравнение (12) с учетом (10) может быть представлено в виде

$$A - Bt + Cz_2 = z_2^2$$

$$A \equiv \frac{1}{E} (H_1 - H_3), \quad B \equiv \frac{1}{E} \frac{Q}{\sigma_1}, \quad C \equiv \frac{1}{E} \quad (14)$$

Уравнение (14) при помощи подстановки $q = dt/dz_2 = 1/z_2'$ легко интегрируется, и его общее решение записывается в форме табличного интеграла

$$z_2 = -2 \int \frac{dq}{q^3(C - Bq)} + \text{const} \quad (15)$$

Постоянную интегрирования в (15) найдем из условия, что $z_2 = h_2$ при $t = T_3$ и, следовательно, из (14)

$$\frac{1}{q_0^3} = A - BT_3 + Ch_2$$

Из (15) найдем $z_2 = z_2(q)$, и, следовательно, $q = q(z_2)$, после чего из (14) найдем $t = t(q_1 z_2) = t(z_2)$; отсюда $z_2 = z_2(t)$, что и позволит определить V_2 .

К. п. д. установки приближенно можно определить выражением

$$\eta \approx V_2' H_3 / V_1 H_1 \quad (16)$$

В заключение отметим, что водоподъемник подобного типа уже четыре года безотказно (без всякого ремонта) работает в колхозе «Заветы Ильича» Спасского района Горьковской области. Его параметры [2]: используемый перепад воды родника 8.2 м, подъем воды выше уровня источника 7 м, дебит источника $Q = 70 \text{ м}^3$ в сутки, период автоколебаний 15 мин., за один период потребителю подается $V_2' \approx 220 \text{ л}$ воды, на сброс уходит 510 л.

Как отмечается в [2,4], водоподъемник может работать от двух источников, расположенных на значительном расстоянии один от другого (один источник питает бак 1, другой — бак 2); в случае недостаточного перепада для подъема воды на нужную высоту предлагается использовать двухступенчатый водоподъемник.

Поступило 15 II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Безмоторная автоматическая водоподъемная установка. Краткое описание, состав. Л. С. Черепнов, В. И. Кривоногов, Горьк. книжное изд., 1962.
2. Кривоногов В. И. Бескомпрессорный пневмоподъемник. Водоснабж. и сан. техн., 1962, № 12.
3. Черепнов Л. С. Безмоторная автоматическая водоподъемная установка, Техн. в сельском хоз-ве, 1964, № 6, стр. 38—42.
4. Андронов Л. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний, изд. 2, Физматгиз, 1959.
5. Ле-Корбейе Ф. Нелинейные системы. Сб. статей под ред. М. В. Шулейкина. Связьиздат, 1939.