

УДК 628.12:621.221.04

В.С. Киров, канд. техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т,
А.В. Герлига, инженер, Одес. нац. политехн. ун-т,
Н.А. Фридман, ген. директор, РАЭС.

О ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (СЦВ) ЭНЕРГБЛОКОВ

В.С. Киров, О.В. Герлига, Н.А. Фридман, В.М.
Про фізичне моделювання динаміки елементів систем циркуляційного водопостачання (СЦВ) енергоблоків. Представлена методика розрахунку геометричних розмірів фізичної моделі СЦВ, яка дозволяє провести моделювання динаміки процесів на зменшеній моделі.

V.S. Kirov, A.V. Gerliga, N.A. Fredman. **About physical simulation of the dynamics of the elements of the systems of circulating water-supply (SCWS) of power units.** Design procedure of geometric sizes of physical model of SCWS is presented in, which lets to carry out the simulation of dynamic of the processes onto reduced model.

На примере элемента системы водоснабжения энергоблоков состоящего из двух емкостей, соединенных трубопроводом дается выбор масштабных критериев, позволяющих на физической модели получить хорошо наблюдаемый процесс динамики уровня воды в емкостях.

Ключевые слова: емкость – трубопровод – моделирование.

При создании физической модели элементов крупномасштабных гидравлических систем в первую очередь выбирают масштабный критерий, который обычно назначается одинаковым на все линейные размеры [1...3]. Зачастую такое назначение масштабного критерия не позволяет качественно провести моделирование динамики процесса.

Покажем это на одном из элементов СЦВ, а именно на примере двух связанных емкостей, моделирующих водоприемную камеру блочной насосной станции (ВПК БНС) и бассейн градирен (см. рис. 1).

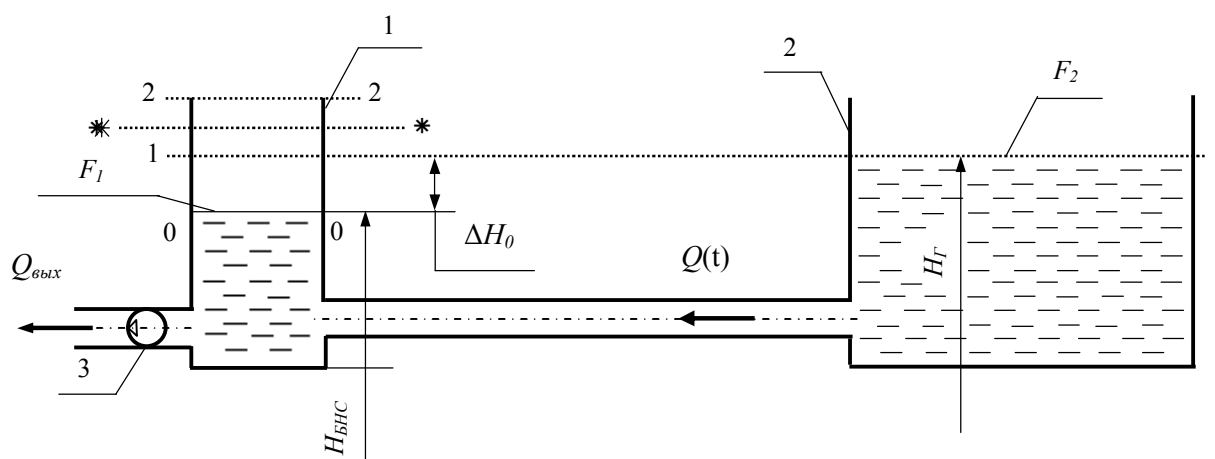


Рис. 1 Схема емкостей, моделирующих ВПК БНС и бассейн градирни
 1 – ВПК БНС; 2 – бассейн градирни; 3 – насос БНС; 1 – 1 – положение уровня в бассейне градирен перед пуском насоса; 0 – 0 – положение уровня в ВПК БНС перед отключением насосов; 2 – 2 – сечение, до которого поднимается вода в ВПК БНС во время первого всплеска после отключения насосов, т. е. при $Q_{\text{вых}} = 0$ при неограниченной высоте стенок камеры.

При установившемся режиме $Q_0 = Q_{\text{вых}}$. Предположим, что в момент отключения насосов расход $Q_{\text{вых}}$ мгновенно падает до нуля. В действительности расход $Q_{\text{вых}}$, проходящий через насос, не сразу падает до нуля. Это сейчас для нас не важно, т.к. наша главная цель – рассмотреть моделирование переходных процессов в системе «емкость-трубопровод» без учета динамики насоса.

Пусть в момент $t \leq 0$ $Q_{\text{вых}} = Q(0) = W(0)$, при $t \geq 0$ $Q_{\text{вых}} = 0$, при этом $Q(t)$ будет изменяться во времени в соответствии с ниже записанными уравнениями.

После того, как $Q_{\text{вых}}$ стало равным нулю, изменение уровня воды в емкости 1 (см. рис. 1) опишется уравнением баланса

$$\frac{dF_1 \cdot H_{\text{бнс}}}{dt} = Q(t), \quad (1)$$

где F_1 – площадь поверхности зеркала воды в емкости 1,
 $Q(t)$ – объемный расход воды.

Для определения изменения $Q(t)$ запишем нестационарное уравнение Бернулли для потока воды

$$H_{\Gamma} - H_{\text{бнс}} = \xi \frac{|w|w}{2 \cdot g} + \frac{L}{g} \frac{dw}{dt}, \quad (2)$$

где w – скорость воды в соединительной трубе;
 L – длина трубы;
 t – время;
 g – ускорение свободного падения;
 ξ – коэффициент гидравлических потерь.

Рассмотрим в начале простейший случай, когда $F_2 / F_1 \gg 1$, т.е. $H_2 = \text{const}$.

Исходной позицией моделирования динамики примем следующее: на переходных процессах в модельном гидравлическом стенде и в натурной установке относительные величины соответствующих режимных параметров в относительные моменты времени должны быть равны, т.е.

$$\bar{\pi}_m(\bar{t}) = \frac{\pi_m(\bar{t})}{\pi_{m0}} = \frac{\pi_n(\bar{t})}{\pi_{n0}} = \bar{\pi}_n(\bar{t}),$$

где π – параметр (H, Q);

π_0 – значение параметра на стационарном режиме, "м" – модель, "н" – натура.

$$\bar{t} = \frac{t}{T_0},$$

где T_0 – постоянная времени.

Запишем уравнения (1) и (2) в безразмерном виде и для этого введем следующие обозначения:

$$\Delta H_0 = H_{\Gamma 0} - H_{\text{бнс}0}, \quad \frac{H_{\Gamma} - H_{\text{бнс}}}{\Delta H_0} = \bar{H}, \quad Q_0 = w_0 \cdot F_{\text{тр}}, \quad \frac{Q(t)}{Q_0} = \bar{Q}, \quad \bar{t} = \frac{t}{T_0},$$

$$\Delta H_0 = \frac{Q_0 \cdot T_0}{F_1}, \quad T_0 = \frac{\Delta H_0 \cdot F_1}{Q_0}. \quad (3)$$

Здесь T_0 – время, за которое заполняется объем $F_1 \cdot \Delta H_0$ при постоянном входном расходе Q_0 ; подстрочный индекс "0" указывает на принадлежность параметра к моменту времени $t = 0$, т.е. к моменту отключения насоса. Учитывая, что F_2 и H_{Γ} постоянные и

$$\frac{dH_{\text{бнс}}}{dt} = \frac{d(H_{\Gamma} - H_{\text{бнс}})}{dt},$$

запишем (1), (2) с учетом (3) в безразмерном виде

$$\frac{d\bar{H}}{d\bar{t}} = -\bar{Q},$$

$$\bar{H} = \zeta \frac{Q_0^2}{2 \cdot g \cdot F_{\text{тр}}^2 \cdot \Delta H_0} |\bar{Q}| \bar{Q} + \frac{L \cdot Q_0}{g \cdot F_{\text{тр}} \cdot T_0 \cdot \Delta H_0} \frac{d\bar{Q}}{dt}. \quad (4)$$

Коэффициенты во втором уравнении системы (4) с помощью (3) преобразуем так:

$$\frac{Q_0^2}{2 \cdot g \cdot F_{\text{тр}}^2 \cdot \Delta H_0} = \zeta_0^{-1}, \quad \frac{L \cdot Q_0}{g \cdot F_{\text{тр}} \cdot T_0 \cdot \Delta H_0} = \frac{2}{\zeta_0} \frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1}$$

При этом (4) перепишем в виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \frac{\zeta_0}{2} \frac{\Delta H_0 \cdot F_1}{L \cdot F_{\text{тр}}} \bar{H} + \frac{\zeta_0}{2} \frac{\Delta H_0 \cdot F_1}{L \cdot F_{\text{тр}}} |\bar{Q}| \bar{Q}. \quad (5)$$

Прежде чем подойти к обсуждению моделирования системы, изображенной на рис. 1, получим и обсудим решения уравнений (5).

При $\xi = 0$ (трение отсутствует) запишем

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = -\bar{Q}, \quad \frac{d\bar{Q}}{dt} = \psi \bar{H}, \quad \text{или} \quad \frac{d^2 \bar{H}}{dt^2} + \psi \bar{H} = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } \psi = \frac{\Delta H_0^2 \cdot F_1 \cdot F_{\text{тр}} \cdot g}{L \cdot Q_0^2}.$$

Здесь учтено, что в начальных условиях $\zeta_0 = \frac{2 \cdot g \cdot F_{\text{тр}}^2 \cdot \Delta H_0}{Q_0^2}$.

Уравнение (6) – это уравнение колебательной системы. Его решение имеет вид:

$$\bar{H} = C \cdot \cos(\bar{\omega} \cdot \bar{t} + \varphi),$$

$$\text{где } \bar{\omega} = \sqrt{\psi} = \omega \cdot T_0.$$

Подставив параметры, ближайшие к параметрам натурной циркуляционной системы, получим следующее значение для ожидаемого периода колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{F_1 \cdot L}{g \cdot F_{\text{тр}}}} \approx 14 \sqrt{L} \text{ (с)}.$$

Решение полной системы уравнений (5) изображено на рис. 2. Значение параметров взяты близкими к натурным. Расчет проведен при следующих начальных условиях:

$$\Delta \bar{H}(0) = \frac{H_{\text{т}} - H_{\text{бнс}}}{\Delta H_0} = 1, \quad \bar{Q}(0) = \frac{Q(0)}{Q_0} = 1, \quad F_1 = 1000 \text{ м}^2, \quad F_{\text{тр}} = 20 \text{ м}^2, \quad Q_0 = 57 \text{ м}^3/\text{с}, \quad L = 450 \text{ м}.$$

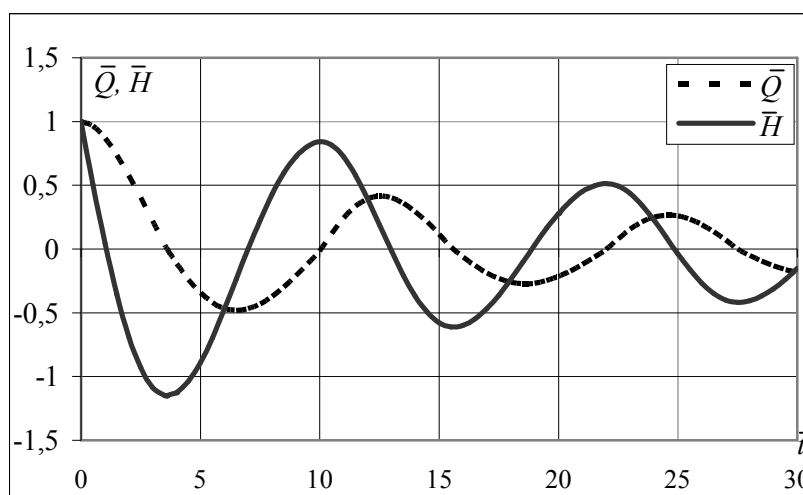


Рис. 2. Изменение уровня и расхода воды в водоприемной камере БНС после отключения насосов СЦВ без учета перелива

Из рис. 2 следует, что переходный процесс получается колебательный, затухающий. Первый всплеск уровня является наибольшим. Период колебаний с учетом трения уменьшается и достигает ≈ 300 с. Без учета трения значение периода колебаний практически такое же.

Если предположить, что высоты стенок емкостей 1 ограничены (сечение *-----* на рис. 1), то картина переходных процессов изменяется, этот вариант представлена на рис. 3. Амплитуда колебаний уменьшилась из-за перелива.

Величину перелива можно представить так

$$\tilde{Q} = \int_{t_n}^{t_k} Q(t) dt,$$

где t_n – время начала перелива,
 t_k – время конца перелива.

В безразмерном виде интегральную величину перелива запишем в виде

$$\frac{\tilde{Q}}{T_0 \cdot Q_0} = \int_{\bar{t}_n}^{\bar{t}_k} \bar{Q}(\bar{t}) d\bar{t}.$$

Здесь правая часть одинакова для модели и природы, тогда запишем

$$\left(\frac{\tilde{Q}}{T_0 \cdot Q_0} \right)_m = \left(\frac{\tilde{Q}}{T_0 \cdot Q_0} \right)_n.$$

Если известна относительная величина перелива для модели, то величина перелива на натурном устройстве представится так

$$\tilde{Q} = (T_0 \cdot Q_0)_n \left(\frac{\tilde{Q}}{T_0 \cdot Q_0} \right)_m \quad \text{или} \quad \tilde{Q}_n = T_{0n} \cdot Q_{n0} \int_{\bar{t}_n}^{\bar{t}_k} \bar{Q}(\bar{t}) d\bar{t}.$$

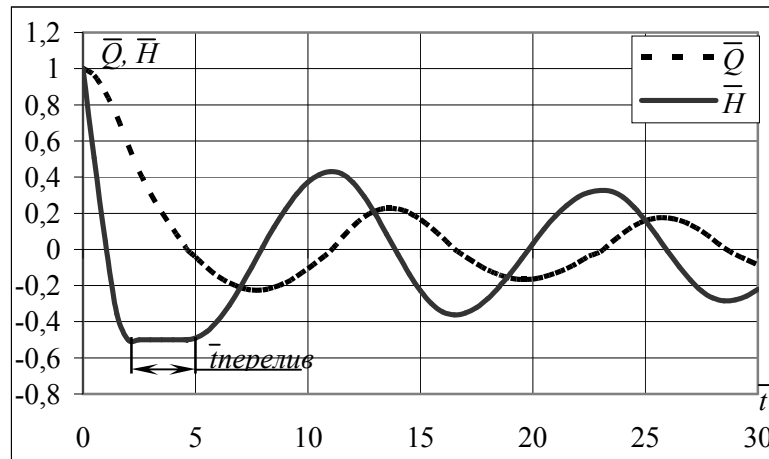


Рис. 3. Изменение уровня и расхода воды в водоприемной камере БНС после отключения насосов СЦВ с учетом перелива

Из (5) следует, что если при создании физической модели рассматриваемого элемента СЦВ, задаться целью, чтоб результаты, полученные при изучении переходных процессов на физмодели, в относительных величинах совпадали с натурными результатами, т.е. чтобы $\bar{H}_M(\bar{t}) = \bar{H}_H(\bar{t})$, $\bar{Q}_M(\bar{t}) = \bar{Q}_H(\bar{t})$ то нужно соблюсти следующие равенства:

$$\left(\zeta \frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1} \right)_m = \left(\zeta \frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1} \right)_n \quad (7)$$

$$\text{или, } \zeta_m = \zeta_n, \left(\frac{L}{\Delta H_0} \right)_m = \left(\frac{L}{\Delta H_0} \right)_n, \left(\frac{F_{\text{тр}}}{F_1} \right)_m = \left(\frac{F_{\text{тр}}}{F_1} \right)_n. \quad (8)$$

Из описанного следует, что для подобия переходных процессов необходимо выполнять условия (7) или (8). В принципе из условия (7) можно записать не (8), а другие варианты сочетаний из входящих параметров, например:

$$\zeta_M = \zeta_H = c_1 \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}, \left(\frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1} \right)_M = \left(\frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1} \right)_H = c_2, \quad (9)$$

где $L \cdot F_{\text{тр}} = V_{\text{тр}}$, $\Delta H_0 \cdot F_1 = V_0$.

Проанализируем эти условия.

Нас будет интересовать в первую очередь, область квадратичного гидросопротивления, так как перелив можно ожидать при еще сохранившихся больших расходах $Q(t)$. При этом запишем

$$\zeta = \sum_j \zeta_j + \lambda \frac{L}{d}, \quad (10)$$

где λ – коэффициент путевых гидротерь.

Если λ зависит от Re , то выполнение уравнения (8) будет затруднительным.

Далее рассмотрим, позволяет ли простое масштабное моделирование, например, задавшись $m_L = 50$, выполнить условие (7) или (9) и обеспечить наблюдаемость процесса в виде $\Delta H(t)$.

Из (9) запишем

$$\Delta H_{0M} = c_2^{-1} \frac{V_{\text{тр}M}}{F_{1M}}. \quad (11)$$

Если выразить $D_{1M} = \frac{D_{1H}}{50}$, то $F_{1M} = \frac{F_{1H}}{2500}$. В этом случае с учетом данных натурной системы ($c_2 \approx 18$) получим $H_{0M} = 0,01 \text{ м} = 1 \text{ см}$.

При такой малой высоте начального отклонения уровня трудно проследить количественные изменения $H_M(t)$ во времени.

Этот пример подчеркивает, что простое уменьшение размеров СЦВ при ее физическом моделировании не решит задачу.

Далее несколько усложним задачу: примем, что площади F_1 и F_2 сравнимы по величине. При этом рассматриваемая система несколько изменится: до отключения насосов в емкость №2 поступает сверху расход $\bar{Q} = Q_0$, при $t \geq 0$ $\bar{Q} = 0$.

В этом случае высота уровня в емкости (2) (см. рис.) не будет постоянной, и система опишется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} F_1 \frac{dH_{\text{бнс}}}{dt} &= Q, \\ F_2 \frac{dH_2}{dt} &= -Q, \\ H - H &= \zeta \frac{|w|w}{2 \cdot g} + \frac{L}{g} \frac{dw}{dt}. \end{aligned} \quad (12)$$

При безразмерной записи уравнений будем использовать, как и ранее, соотношения (12). Дополнительно запишем

$$\frac{dH_{\text{бнс}}}{dt} = -(H_{r0} - H_{\text{бнс}0}) \frac{d \frac{H_{r0} - H_{\text{бнс}}}{H_{r0} - H_{\text{бнс}0}}}{dt} = \Delta H_0 \frac{d\bar{H}_{\text{бнс}}}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dH_r}{dt} = -(H_{r0} - H_{\text{бнс}0}) \frac{d \frac{H_{r0} - H_r}{H_{r0} - H_{\text{бнс}0}}}{dt} = -\Delta H_0 \frac{d\bar{H}_r}{dt} \quad (14)$$

$$H_r - H_{\text{бнс}} = F_r - H_{\text{бнс}} \pm H_{r0} = (H_{r0} - H_r) - (H_{r0} - H_{\text{бнс}}) = \Delta H_0 \cdot (\bar{H}_r - \bar{H}_{\text{бнс}}) \quad (15)$$

Система уравнений (12) с учетом (13)...(15) и (3) примет вид

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{H}_{\text{бнс}}}{d\bar{t}} &= -\bar{Q}, \\ \frac{d\bar{H}_{\Gamma}}{d\bar{t}} &= -\frac{F_1}{F_2}\bar{Q},\end{aligned}\quad (16)$$

$$\bar{H}_{\Gamma} - \bar{H}_{\text{бнс}} = \frac{\zeta}{\zeta_0}|\bar{Q}|\bar{Q} + 2 \cdot \zeta^{-1} \frac{L \cdot F_{\text{тр}}}{\Delta H_0 \cdot F_1} \frac{d\bar{Q}}{d\bar{t}}.$$

Итак, из системы уравнений следуют условия подобия

$$\xi_m = \xi_n, \quad (17)$$

$$\left(\frac{F_1}{F_2}\right)_M = \left(\frac{F_1}{F_2}\right)_H = c_1, \quad (18)$$

$$\left(\frac{V_0}{V_{mp}}\right)_M = \left(\frac{V_0}{V_{mp}}\right)_H = c_2, \quad (19)$$

где $V_0 = \Delta H_0 \cdot F_1$, $V_{\text{тр}} = L \cdot F_{\text{тр}}$,

т.е. к условиям (9) добавилось условие (18).

Далее поступим по-другому. Геометрические масштабы запишем так:

$$\begin{aligned}F_{1m} &= \frac{F_{1н}}{m_1^2}; & F_{2m} &= \frac{F_{2н}}{m_2^2}; \\ D_{\text{тр}m} &= \frac{D_{\text{тр}н}}{m_3}; & F_{\text{тр}m} &= \frac{F_{\text{тр}н}}{m_3^2}; \\ L_{\text{тр}m} &= \frac{L_{\text{тр}н}}{m_4}; & \Delta H_{0m} &= \frac{\Delta H_{0н}}{m_0}.\end{aligned}\quad (20)$$

Далее подберем значения m_1 , m_2 , m_3 и m_4 так, чтобы обеспечить нормальные изменения ΔH_{0m} , выбрав заранее значение m_0 , например, равным 10, и обеспечить выполнение равенств (9)...(19).

Из (19) запишем

$$\Delta H_{0m} = c_2 \frac{m_1^2 \cdot L_{\text{тр}н} \cdot F_{\text{тр}н}}{F_{1н} \cdot m_4 \cdot m_3^3}, \quad \text{или} \quad \Delta H_{0m} = \Delta H_{0н} \frac{m_1^2}{m_4 \cdot m_3^3} = \Delta H_{0н} \frac{1}{m_0}.$$

Откуда имеем

$$m_0 = \frac{m_4 \cdot m_3^3}{m_1^2}. \quad (21)$$

Уравнение (21) будет удовлетворять значению $m_0 = 10$, например, при $m_1 = 112$, $m_3 = 50$ и $m_4 = 50$.

При заданных масштабных коэффициентах $\Delta H_{0m} = \Delta H_{0н} / 10 = 5$ см высота ΔH_{0m} будет удобна для измерений и наблюдений. Полученные результаты справедливы при

$$\sum \zeta_{mi} \gg \lambda \frac{L}{D_{mp}}. \quad (22)$$

В случае невыполнения неравенства (22) и автомодельном гидравлическом режиме в трубе следует всегда принимать $m_2 = m_3$.

В случае невыполнения неравенства (22) и наличия зависимости λ от Re полное моделирование динамики гидравлических магистралей в широком диапазоне изменения скоростей потока воды невозможно и можно говорить только о приближенном моделировании [3].

Выводы

1. Показано, что основной причиной возникновения перелива в гидравлической системе “насос–емкость” – “трубопровод–емкость” при отключении насоса является инерционность потока воды.
2. Предложена методика расчета геометрических размеров физической модели помноженной гидравлической системы, с целью получения наблюдаемых колебаний в водоприемной камере насоса.

Литература

1. М.Д. Чертоусов Гидравлика / Специальный курс: ГЭИ, М., Л., 1962, 630 с.
 2. Р.Р. Чугаев Гидравлика (техника механика жидкости) / Энергоиздат: Ленинградское отделение, Л., 1982, 672 с.
 3. В.М. Ляхтер, А.М. Прудовский Гидродинамическое моделирование / М.: Энергоатомиздат, 1984, 392 с.
-