

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ФОРМА УРАВНЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В МОЩНЫХ ШАХТНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

Оверко В.М., Овсянников В.П., к-ты техн. наук, доц.
Донецкий национальный технический университет

Получены уравнения гидравлического удара в критериальной форме для анализа динамических процессов в мощных шахтных насосных установках.

The equations of hydraulic impact in the form of criteria for the analysis of dynamic processes in powerful mine pump installations are received.

В работах /1/, /2/ рассматриваются вопросы обобщения результатов анализа динамических процессов в мощных шахтных насосных установках путем приведения уравнений, описывающих эти гидросистемы к безразмерному виду и получения в фактической области изменения параметров «универсальных» характеристик насосных агрегатов. При этом параметры напорных трубопроводов насосных установок рассматриваются сосредоточенными, что затрудняет получение характеристик гидравлических ударов в обобщенном виде.

Для решения этой задачи необходимо получить уравнения гидравлического удара, описывающие динамические процессы в мощных шахтных насосных установках, в безразмерном, критериальном виде. Как известно, /1, 2, 3 / неустановившееся состояние потока жидкости на каждом участке напорного трубопровода мощных шахтных насосных установок описывается системой двух дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа - "количества движения" и "неразрывности потока":

$$\frac{\partial H_i}{\partial X_i} + S_i^{-1} \cdot g^{-1} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial t} + F_i \cdot S_i^{-2} \cdot g^{-1} \cdot Q_i \cdot |Q_i| + S_i n_i = 0$$

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} + \frac{c_i^2}{g \cdot S_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i}, \quad (1)$$

где i - номер участка $1 \leq i \leq K_{\Xi}$, причем K_{Ξ} - общее количество конструктивных участков, на которое при моделировании необходимо разбить напорный трубопровод мощной шахтной насосной установки. Разбивка осуществляется таким образом, что в пределах уча-

стка характеристики трубопровода, такие как: D_i - диаметр трубопровода; S_i - площадь сечения; δ_i - толщина стенок; E_i - модуль упругости материала стенок; \sin_i - синус угла наклона i -го участка трубопровода к горизонту остаются постоянными. Переменные параметры: $H_i = H_i(X_i, t)$ - мгновенное распределение напора вдоль i -го участка трубопровода; $dX_i = \pm c_i \cdot dt$ - мгновенное распределение расхода жидкости вдоль i -го участка трубопровода; X_i - расстояние, измеряемое вдоль $H_i(X_i, t)$ участка трубопровода, причем $0 \leq X_i \leq L_i$; L_i - длина i -го участка трубопровода; t - независимая переменная - время; F_i - коэффициент, характеризующий трение на i^M участке трубопровода; c_i - скорость распространения ударной волны на i^M участке трубопровода

Система уравнений (1) вместе с начальными и граничными условиями позволяет определить состояние потока жидкости в любой точке напорного трубопровода в произвольный момент времени. Однако при этом возникают три проблемы: во-первых, очень часто, при анализе динамических процессов в напорных трубопроводах мощных шахтных насосных установок, интерес представляет только те режимы течения жидкости, которые сопровождаются гидравлическими ударами; во-вторых, так как система уравнений (1) и граничные условия на каждом участке являются нелинейными, то задача анализа динамических процессов требует построения имитационной модели, основанной на каком-либо численном методе решения этой системы; в третьих, для обобщения результатов анализа, а также для разработки универсальных методов прогнозирования и целенаправленного управления динамическими процессами с целью предотвращения гидравлических ударов, систему уравнений (1) необходимо рассматривать в безразмерном виде.

Как известно, первые две из указанных выше проблем решаются путем перехода от уравнений "количества движения" и "неразрывности потока" в виде уравнений в частных производных (1) к их характеристической форме [1,2,3] и построения на этой основе сеточных моделей, для определения $H_i(X_i, t)$ $Q_i(X_i, t)$. Используя этот подход, после соответствующих преобразований системы уравнений (1), получим:

$$dX_i = \pm c_i \cdot dt \quad (2)$$

- уравнения "прямой" c_+ и c_- "обратной" характеристических линий /2/.

$$\begin{aligned} \pm dH_i + m_i \cdot dQ_i \\ + (a_i^u \cdot Q_i \cdot |Q_i| + h_i^u) \cdot dx_i \end{aligned} \Bigg|_{c_{\pm}} \quad (3)$$

уравнения связывающие приращения давления и расхода на характеристиках, где $m_i = c_i \cdot (g \cdot S_i)^{-1}$ - коэффициент пропорциональности в формуле Жуковского /2/; $a_i^u = \lambda_i \cdot (2 \cdot S_i^2 \cdot D_i \cdot g)^{-1}$ - удельное гидравлическое сопротивление $i^{\text{го}}$ участка; $h_i^u = H_i^g / L_i^T$ - удельное приращение геометрической высоты $i^{\text{го}}$ участка; H_i^g - геометрическая высота $i^{\text{го}}$ участка.

Третья из перечисленных выше проблем решается путем перехода к безразмерному, критериальному виду уравнений "количества движения" и "неразрывности потока"/2/. Причем этот переход, с нашей точки зрения, целесообразно осуществлять, рассматривая не системы дифференциальных уравнений в частных производных (1), как это обычно делается в известных исследованиях /3/, а их характеристические формы (2) (3).

То есть в качестве исходных выражений для преобразования будем использовать уравнения (2) (3), учитывая то, что именно на основании решения этой системы удастся построить устойчивые алгоритмы расчета динамических процессов в мощных шахтных насосных установках и получить параметры течения жидкости при гидравлических ударах с достаточной для инженерных расчетов точностью /1,2/.

Предположим, что

$$x_i = X_i \cdot L_b^{-1}, \tau = V_b^{-1} \cdot g \cdot t \text{ и } h_i = H_i \cdot L_b^{-1}, q_i = Q_i \cdot (V_b \cdot S_i)^{-1}, \quad (4)$$

где L_b, V_b - соответственно, базовое расстояние и базовая скорость.

Как правило /1,2/ принимают $L_b = L_T$, где L_T - суммарная длина трубопровода насосной установки и $\tau = c \cdot L_i^{-1} \cdot t$ или $\tau = \nu \cdot D_i^{-2} \cdot t$,

где ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости. Это значит что при переходе к системе безразмерных параметров используют величины связанные либо с вязкостью жидкости, либо с распространением ударной волны. Однако в случае применения безразмерных уравнений гидравлического удара для анализа динамических процессов в мощных шахтных насосных установках такой выбор ба-

зовых величин нельзя считать наилучшим: во-первых, L_T не является "представительной" величиной, так как часто встречаются шахтные насосные установки, у которых L_T не оказывает определяющего влияния на параметры переходного процесса, например шахтные водоотливные установки с длинным участком трубопровода на поверхности; во-вторых, поток жидкости в трубопроводах шахтных насосных установок является турбулентным и, следовательно, вязкость среды не является определяющей величиной; в третьих, при переходе к системе безразмерных параметров, как правило [1,2], линеаризуется выражение $a_i^u \cdot Q_i \cdot |Q_i|$, что не всегда оправдано и может приводить к существенным ошибкам при анализе динамических процессов.

Используя (4) после соответствующих алгебраических преобразований выражений (3), (2) получим:

$$dx_i = \pm St_i \cdot d\tau \tag{5}$$

$$\pm dh_i + (dQ_i + \xi_i^u \cdot q_i \cdot |q_i| + h_i^u) \cdot St_i \cdot d\tau \Big|_{C_-}^{C_+}$$

где St - число Струхалия, являющиеся критерием подобия при неустановившемся движении потока жидкости [1].

Как известно, $St = v_o \cdot \Delta t_o \cdot l_o^{-1}$, где $v_o, l_o, \Delta t_o$ соответственно характерные скорость, интервал времени и размер. В нашем случае, $v_o = V_b = c$, $l_o = L_b = H_b$, $\Delta t_o = Q_b \cdot S_b^{-1} \cdot g^{-1}$. Причем в соответствии с результатами анализа, проведенного в [3] в качестве H_b, Q_b можно использовать параметры, связанные не с трубопроводом, а с насосным агрегатом, например, подачу и напор насоса в режиме работы с максимальным коэффициентом полезного действия. В качестве базовой площади можно использовать, S_i поскольку при создании абсолютного большинства трубопроводов мощных шахтных насосных установок применяются трубы одинакового диаметра.

Таким образом, $St = c \cdot \Delta t_o \cdot H_u^{-1}$. С учетом того, что для гидросистем рассматриваемого класса $c \cong 1300$ [м/с] и $\Delta t_o \cong 0,305$ [с] величина $Lt = c \cdot \Delta t_o = 397$ [м] практически совпадает с $Ht = 400$ [м] - геометрической высотой насосных установок, которые, согласно правилам эксплуатации, должны быть защищена от гидравлических ударов. Следовательно, введенный в систему уравнений (1) (2) безразмерный критериальный параметр St в этом случае численно равен отношению Ht к характерной подаче насоса.

Кроме числа Струхаля в систему (4) входит безразмерный коэффициент демпфирования потока ξ_i'' , который определяется как произведение коэффициента демпфирования потока $\zeta_i = 0.5 \cdot \lambda_i \cdot Q_b \cdot S_i^{-1} \cdot D_i^{-1}$, с размерностью $[c^{-1}] / 2$, на характерный для потока жидкости в трубопроводе интервал времени Δt_0 .

Анализ областей определения коэффициентов St и ξ_i'' во всем диапазоне изменения параметров гидросистем рассматриваемого класса показывает, что они практически совпадают. Это дает основание считать доказанным, то что вклад в определение особенностей динамических процессов в напорных трубопроводах мощных шахтных установок сил трения и инерции примерно одинаков. Следовательно, при построении имитационных моделей они должны учитываться в равной степени. Если сравнить абсолютные значения области определения коэффициентов ξ_i'' и h_i'' , то становится очевидным определяющий вклад наличия геометрической высоты на характер и параметры динамических процессов в этих гидросистемах.

Список источников

1. Гейер В. Г., Тимошенко Г. М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1987. - 270с
2. Системы и расчет насосно-струйных установок для откачки воды из затопленных горизонтов. Антонов Э.И., Галанин А.Н- Уголь Украины, 1996, №4, стр. 44-46.
3. К вопросу о новых методах анализа динамических процессов в мощных шахтных насосных установках. Овсянников В.П., Оверко В.М. - Материалы конференции "Гидроаэромеханика в инженерной практике", Киев, НТУ КПИ