

УДК 621.646.94

**А.П. Кононенко** (д-р техн. наук, проф.), **В.П. Овсянников**,  
(канд. техн. наук, доц.), **М.В. Оверко** (аспирант)  
Донецкий национальный технический университет

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ**

*Проведен анализ динамических процессов в параллельно включенном основном и резервном трубопроводах водоотливной установки, рассмотрены возможные средства защиты такой гидросистемы от гидравлических ударов.*

**Ключевые слова:** водоотливная установка динамические процессы

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** При анализе динамических процессов в трубопроводах водоотливных установок, с целью решения проблемы борьбы с гидравлическими ударами в этих гидросистемах, как правило, рассматривается ситуация при которой насос подключается к одному трубопроводу [1]. В шахтной водоотливной установке имеется два трубопровода - основной и резервный и, следовательно, не исключена возможность работы насоса или группы насосов одновременно на оба эти трубопровода. [2].

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ работы насосов на параллельно подключенные трубопроводы посвящено много работ [3]. Как правило, стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах рассчитывают на ЭВМ [4], но при этом основное внимание уделяется не особенностям протекания этих процессов, а динамике систем управления насосными агрегатами, работающими в этих условиях [5] или, же технико-экономическим показателям и особенностям стационарных режимов работы [1].

**Изложение материала и результаты.** С целью анализа особенностей динамических процессов в трубопроводах водоотливных установок в случае работы насоса или группы насосов одновременно на основной и резервный трубопроводы предложена расчетная схема процесса транспортирования шахтной воды (рис. 1), разработана математическая модель и соответствующая программа компьютерного расчета.

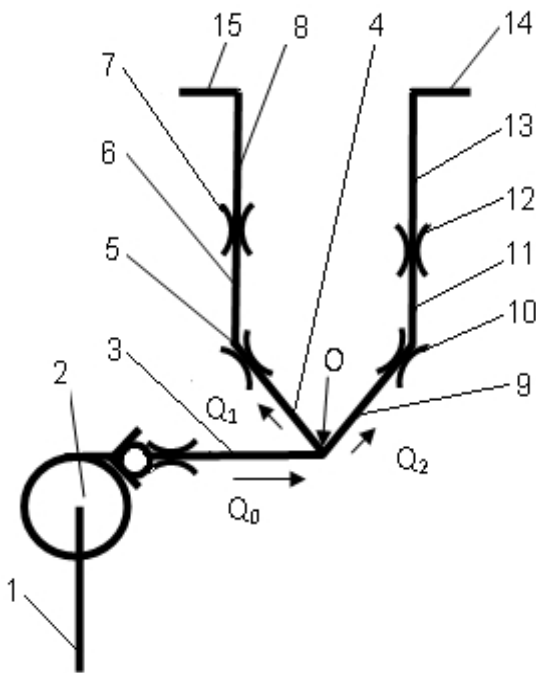


Рис. 1 – Расчетная схема системы водоотливных трубопроводов

7, 12 – местные сопротивления в стволе.

При получении математической модели и составлении соответствующей программы, кроме общепринятых, делаются следующие допущения:

– во-первых, все соответствующие характеристики участков 4-9, 6-11, 8-13, 14-15 считаются одинаковыми,

– во-вторых, местные сопротивления 5, 10 считаются различными, но постоянными и равными, соответственно,  $a_{m5}$  и  $a_{m10}$ ;

– в-третьих, местные сопротивления 7, 12 считаются различными, управляемыми и равными, соответственно,  $a_{m7}(t)$  и  $a_{m12}(t)$ ;

–  $t$  – независимая переменная, время.

Для определения состояния потока жидкости в трубопроводах в момент времени  $t = 0$  при внезапном отключении насосного агрегата – а именно этот случай является предметом рассмотрения настоящей работы, поскольку именно в этом случае возникает угроза гидравлических ударов [1] – необходимо найти суммарное гидравлическое сопротивление двух параллельно включенных трубопроводов (см. рис. 1). Очевидно, что первый трубопровод состоит из 4, 6, 8, 15 участков, а второй из 9, 11, 13, 14 участков.

Таким образом:

$$a_{s1} = \sum_{i=4,6,8,15} a_{ui} + a_{m5} + a_{m7}(0), \quad a_{s2} = \sum_{i=9,11,13,14} a_{ui} + a_{m10} + a_{m12}(0),$$

В расчетной схеме, показанной на рисунке 1, введены следующие обозначения:

1 – всасывающий трубопровод;

2 – насосный агрегат с обратным клапаном и задвижкой в линии нагнетания;

3 – участок трубопровода в камере водоотливной установки;

4, 9 – участки трубопровода в трубном ходе;

6, 8, 11, 13 – участки трубопровода в стволе;

14, 15 – участки трубопровода на поверхности;

5, 10 – местные сопротивления в трубном ходе;

7, 12 – местные сопротивления в стволе.

При получении математической модели и составлении соответствующей программы, кроме общепринятых, делаются следующие допущения:

– во-первых, все соответствующие характеристики участков 4-9, 6-11, 8-13, 14-15 считаются одинаковыми,

– во-вторых, местные сопротивления 5, 10 считаются различными, но постоянными и равными, соответственно,  $a_{m5}$  и  $a_{m10}$ ;

– в-третьих, местные сопротивления 7, 12 считаются различными, управляемыми и равными, соответственно,  $a_{m7}(t)$  и  $a_{m12}(t)$ ;

–  $t$  – независимая переменная, время.

Для определения состояния потока жидкости в трубопроводах в момент времени  $t = 0$  при внезапном отключении насосного агрегата – а именно этот случай является предметом рассмотрения настоящей работы, поскольку именно в этом случае возникает угроза гидравлических ударов [1] – необходимо найти суммарное гидравлическое сопротивление двух параллельно включенных трубопроводов (см. рис. 1). Очевидно, что первый трубопровод состоит из 4, 6, 8, 15 участков, а второй из 9, 11, 13, 14 участков.

Таким образом:

$$a_{s1} = \sum_{i=4,6,8,15} a_{ui} + a_{m5} + a_{m7}(0), \quad a_{s2} = \sum_{i=9,11,13,14} a_{ui} + a_{m10} + a_{m12}(0),$$

где  $a_{sj}$ ,  $j = 1, 2$  – суммарное гидравлическое сопротивление каждого из параллельно включенных трубопроводов;

$a_{ui}$ ,  $i = 4, 6, 8, 9, 11, 13, 14, 15$  – гидравлическое сопротивление участков трубопроводов;

$a_{mi}$ ,  $i = 5, 10$  – гидравлическое сопротивление постоянных местных сопротивлений;

$a_{mi}(0)$ ,  $i = 7, 12$  – гидравлическое сопротивление переменных местных сопротивлений.

Суммарное гидравлическое сопротивление трубопроводов водоотливной установки показанной на рисунке 1  $a_s$  может быть определено по формуле:

$$a_s = a_{m3} + \frac{1}{\left(1/\sqrt{a_{s1}} + 1/\sqrt{a_{s2}}\right)^2} [3],$$

где  $a_{m3}$  - гидравлическое сопротивление третьего участка трубопровода.

С учетом сделанных выше допущений геометрическая высота водоотливной установки равна  $H_g = \sum_{i=4,6,8,15} L_{ui}$ , и она будет одинаковой

для обоих трубопроводов, где  $L_{ui}$ - длина по вертикали соответствующего участка. Таким образом, зная  $a_s$ ,  $H_g$  и располагая напорной характеристикой насоса, можно определить величину расхода воды у насосного агрегата в стационарном режиме работы  $Q_0$  [1]. Для расчета распределения давления и расходов в трубопроводах в момент времени  $t = 0$  [3] требуется найти величины  $Q_1$ ,  $Q_2$  (см. рис.1).

Очевидно:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$P_0 = \rho g H_g + a_{s1} Q_1^2 \quad (2)$$

$$P_0 = \rho g H_g + a_{s2} Q_2^2, \quad (3)$$

где  $\rho$ ,  $g$  – соответственно, плотность жидкости и ускорение свободного падения.

Система нелинейных уравнений (1)-(3) имеет аналитическое решение:

$$Q_1 = \frac{-2a_{s2}Q_0 + \sqrt{(2a_{s2}Q_0)^2 + 4(a_{s1} - a_{s2})a_{s2}Q_0^2}}{2(a_{s1} - a_{s2})}. \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_0 - Q_1$$

Давление  $P_0$  можно найти из (3), а давление в начале трубопровода, то есть давление в точке подключения насосного агрегата соответственно равно  $P_0 + a_{m3} Q_0^2$ . Имея все эти величины, можно определить распределение расходов и давления в трубопроводах рассматриваемой водоотливной установки в установившемся режиме работы.

Как правило, динамические процессы в трубопроводах, которые могут сопровождаться гидравлическими ударами рассчитываются, используя метод характеристик [3]. В работе [6] рассмотрены все граничные условия в трубопроводе водоотливной установки, которые формируются при внезапном отключении насосного агрегата, однако этот набор в данном случае необходимо дополнить описанием состояния потока жидкости в точке разветвления потока, то есть сформировать систему уравнений, определяющих состояние жидкости в точке О (см. рис. 1).

Используя эффективное в данном случае представление уравнений гидравлического удара в характеристической форме и прямоугольную сетку характеристик [4], получим:

$$P_3(L_3, t) - P_3(L_3 - \Delta x, t - \Delta t) + m_3(Q_3(L_3, t) - Q_3(L_3 - \Delta x, t - \Delta t)) + n_3 Q_3^{cr} \left| Q_3^{cr} \right| + \rho g k_3 = 0, \quad (5)$$

$$P_4(0, t) - P_4(\Delta x, t - \Delta t) - m_4(Q_4(0, t) - Q_4(\Delta x, t - \Delta t)) - n_4 Q_4^{cr} \left| Q_4^{cr} \right| - \rho g k_4 = 0, \quad (6)$$

$$P_9(0, t) - P_9(\Delta x, t - \Delta t) - m_9(Q_9(0, t) - Q_9(\Delta x, t - \Delta t)) - n_9 Q_9^{cr} \left| Q_9^{cr} \right| - \rho g k_9 = 0, \quad (7)$$

$$P_3(L_3, t) = P_4(0, t), \quad (8)$$

$$P_3(L_3, t) = P_9(0, t), \quad (9)$$

$$Q_3(L_3, t) = Q_4(0, t) + Q_9(0, t). \quad (10)$$

Систему уравнений (5)...(10) можно представить в матричной форме:

$$Ax = b, \quad (11)$$

где  $x$  – вектор неизвестных

$$x = \begin{bmatrix} P_3(L_3, t), P_4(0, t), P_9(0, t), \\ Q_3(L_3, t), Q_4(0, t), Q_9(0, t) \end{bmatrix}^T$$

$P_3(L_3, t), Q_3(L_3, t)$  - соответственно давление и расход в конце третьего участка трубопровода в момент времени  $t$ ,

$P_4(0, t), Q_4(0, t), P_9(0, t), Q_9(0, t)$  - соответственно давление и расход в начале четвертого и девятого участка трубопровода в момент времени  $t$ .

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & m_9 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix},$$

где  $m_i = \frac{\rho c}{S_i}$  – коэффициент, связывающий приращение давления и

расхода в формуле Жуковского [1],

$c$  – скорость распространения ударной волны [4],

$S_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го участка трубопровода.

Элементы вектора  $\mathbf{b}$  известны либо из начальных условий, либо по результатам расчета для момента времени  $t - \Delta t$ .

Итак:

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} P_3(L_3 - \Delta x, t - \Delta t) + m_3 Q_3(L_3 - \Delta x, t - \Delta t) - n_3 Q_3^{cr} |Q_3^{cr}| - \rho g k_3 \\ P_4(\Delta x, t - \Delta t) - m_4 Q_4(\Delta x, t - \Delta t) + n_4 Q_4^{cr} |Q_4^{cr}| + \rho g k_4 \\ P_9(\Delta x, t - \Delta t) - m_9 Q_9(\Delta x, t - \Delta t) + n_9 Q_9^{cr} |Q_9^{cr}| + \rho g k_9 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $n_i$  – удельное гидравлическое сопротивление  $i$ -го участка трубопровода,  $k_i$  – синус угла наклона  $i$ -го участка трубопровода к горизонту,  $n_i Q_i^{cr} |Q_i^{cr}|$  – средние потери давления на участках трубопровода длиной  $\Delta x$ , соединенных в точке  $O$  (см. рис. 1), которые могут быть найдены по алгоритму, предложенному в [4].

Остается отметить, что построение прямоугольной сетки характеристик соответствует условию  $\Delta x = c \Delta t$  [4].

Система линейных уравнений (11) может быть решена численно, используя правило Крамера, причем предложенный подход легко обобщается на случай параллельной работы более чем двух трубопроводов.

Таким образом, рассмотренная в [6] система уравнений, описывающая граничные условия в трубопроводе водоотливной установки дополнена граничным условием в точке разветвления трубопроводов, что позволяет проанализировать динамические процессы в параллельно включенных основном и резервном трубопроводах водоотливной установки и рассмотреть возможные средства защиты таких гидросистем от гидравлических ударов.

В качестве примера, рассмотрим гидравлический удар, возникающий в конкретной водоотливной установке при внезапном отключении насосного агрегата. На рис. 2 показаны результаты соответствующих расчетов, выполненных с использованием приведенных выше формул.

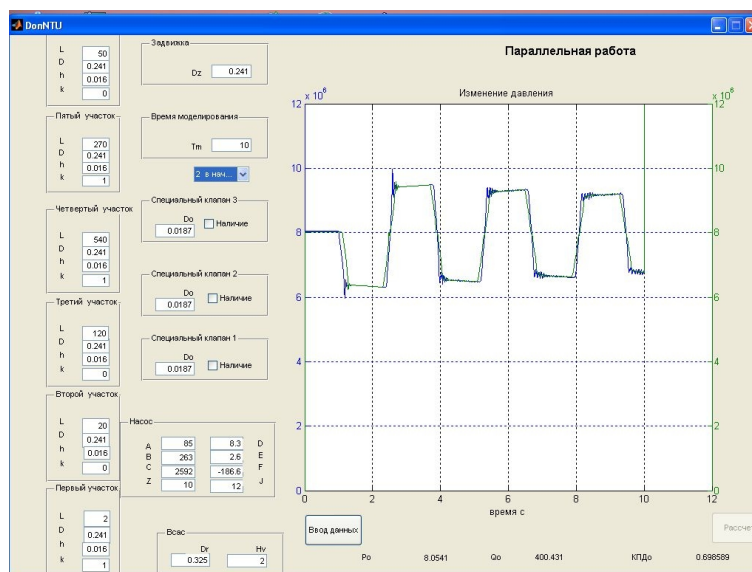


Рис. 2. Гидравлический удар в водоотливной установке (насос подключен к двум параллельно включенным трубопроводам)

Для сравнения на рис. 3 показан гидравлический удар в той же водоотливной установке при подключении насоса к одному трубопроводу. На этих рисунках показаны графики изменения давления в начале третьего и в конце девятого участков трубопровода (см. рис. 1).

Была рассмотрена возможность защиты водоотливной установки в рассматриваемом варианте работы при помощи специальных обратных клапанов [7], так называемых гидравлических диодов.

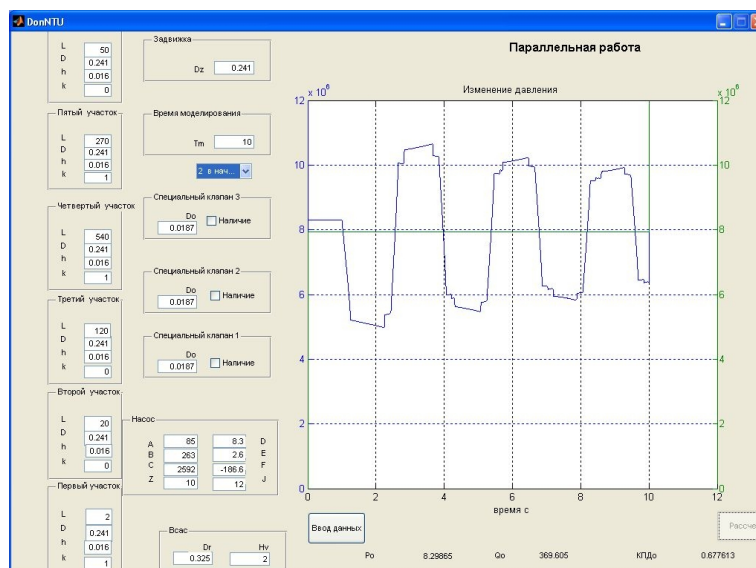


Рис. 3. Гидравлический удар в водоотливной установке (насос подключен к одному трубопроводу)

При моделировании рассматривался случай, когда эти устройства были расположены в стволе шахты, соответственно в конце участков 6, 11 (см. рис. 1). При этом считается, что величина их обратного сопротивления эквивалентна гидравлическому сопротивлению отверстия диаметром 18 мм. Результаты соответствующих расчетов приведены на рис. 4. Из показанных графиков видно, что в данном случае возможно полное гашение гидравлического удара, процесс носит аperiодический характер, без повышения давления в трубопроводах.

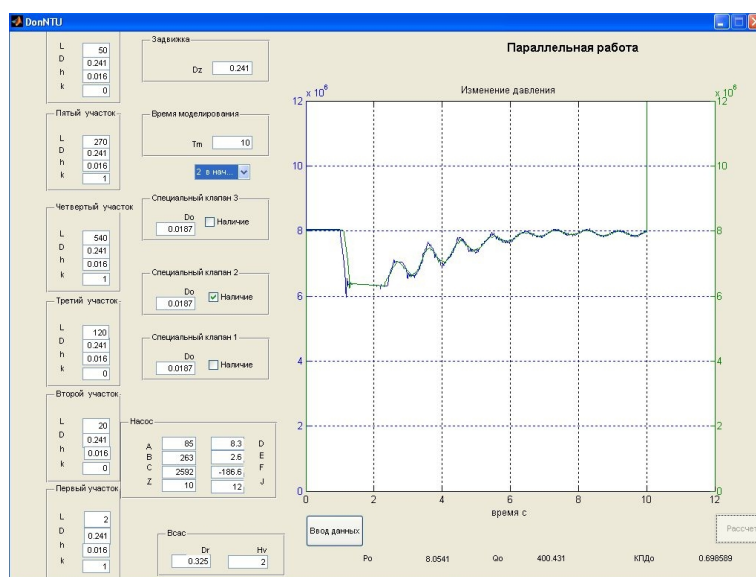


Рис. 4. Переходный процесс в водоотливной установке, защищенной специальными обратными клапанами (насос подключен к двум параллельно включенным трубопроводам)

**Выводы и направления дальнейших исследований.** В результате проведенных исследований были рассмотрены гидравлические удары в сложных трубопроводах водоотливных установок и рассмотрена возможность защиты таких гидросистем.

Показано, что, хотя величина максимального давления при гидравлическом ударе в водоотливной установке с параллельно включенными трубопроводами уменьшается, но увеличивается крутизна фронтов волн давления (см. рис. 2, 3), что должно приводить к расширению спектра частот периодических воздействий на конструкции трубопровода в момент такого удара [8]. Конечно, этот вывод нуждается в дополнительных подтверждениях, которые могут быть получены в ходе дальнейших исследований при помощи анализа напряженного состояния конструкции трубопровода, например, методом конечных элементов с последующей экспериментальной проверкой.

Кроме того, заслуживает внимания задача поиска простых, доступных и в то же время эффективных средств защиты, поскольку устройства должны монтироваться в стволе шахты, а эта задача не всегда является выполнимой.

Для проведения анализа использованы классические, проверенные методы расчета и максимально надежные тесты программного обеспечения. Тем не менее, только серия соответствующих экспериментов может подтвердить адекватность предложенной модели и при этом выявить другие факторы, существенно влияющие на параметры и характеристики гидравлических ударов и, следовательно, дать толчок к созданию новых средств их предотвращения.

#### Список литературы

1. Гейер В.Г. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: учебник для вузов / В.Г. Гейер, Г.М. Тимошенко. – М.: Недра, 1987. – 270 с.
2. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки / В.М. Попов. – М.: Недра, 1972. – 340 с.
3. Лямаев Б.Ф. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах / Б.Ф. Лямаев // Методы расчета на ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
4. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / Д.А. Фокс. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
5. Алексеева Ю.А. Динамические режимы экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом / Ю.А.Алексеева, Т.В.Коренькова // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – 2011. – № 11(186). – 465 с.
6. Оверко В.М. Защита от гидравлических ударов водоотливных установок с погружными насосами / В.М.Оверко, В.П.Овсянников, А.Ф. Папаяни // Разработка рудных месторождений. Научно технический сборник. Кривой Рог. – 2006. – Вип. 1(90). – С. 158-162.
7. Оверко В.М. Оптимизация параметров гидродинамических процессов в напорных трубопроводах водоотливных установок, защищенных гидравлическими диодами / В.М.Оверко, В.П. Овсянников // Наукові праці ДонДТУ. Серія: гірничо-електромеханічна. – 2010. – Вип. 18(172). – С. 226-233.



8. Оверко В.М. Анализ частотных свойств трубопроводов с погружными насосами / В.М. Оверко, В.П. Овсянников // Наукові праці ДонДТУ. – 2006. – Вип.104. – С. 156-159.

*Стаття надійшла до редакції 15.10.2012*

***А.П. Кононенко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко. Донецький національний технічний університет***

**Аналіз динамічних процесів у паралельно включених трубопроводах водовідливної установки**

*Проведений аналіз динамічних процесів у паралельно включеному основному й резервному трубопроводах водовідливної установки, розглянуті можливі засоби захисту такої гідросистеми від гідравлічних ударів.*

**Ключові слова:** водовідливна установка, динамічні процеси.

***A. Kononenko, V. Ovsyannikov, M. Overko. Donetsk National Technical University***  
**Analysis of Dynamic Processes in Parallel-Connected Pipelines of a Dewatering Plant.**

*The paper provides an analysis of dynamic processes in parallel-connected main and auxiliary pipelines of a dewatering plant. Possible methods of protecting such hydraulic system from water hammers are discussed.*

**Keywords:** pumping setting, dynamic processes.