

УДК 621.646.94 ГРНТИ 52.01.84

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

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

## **ПРОГРАММНОЕ ДРОССЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ЗАЩИТЫ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА**

*Рассмотрена возможность использования изменения гидравлического сопротивления трубопровода как средства защиты водоотливных установок от гидроударов. Предложен критерий выбора места установки устройства защиты.*

**Ключевые слова:** водоотливная установка, гидравлический удар, сопротивление трубопровода.

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** Исследования гидравлических ударов на шахтных водоотливных установках проводятся более пятидесяти лет [1], однако полная однозначная концепция защиты этих гидросистем от колебаний давления до сих пор не создана. В связи с этим по-прежнему остается актуальной задача поиска новых, возможно, не совсем очевидных на первый взгляд, средств и способов защиты, в особенности таких, которые бы требовали для своей реализации минимума капитальных затрат, были бы надежны и просты в эксплуатации. Таким способом может быть, например, включение дополнительного гидравлического сопротивления в определенном месте трубопровода в момент возникновения опасного гидравлического удара, то есть в момент внезапного отключение насосного агрегата водоотливной установки.

**Анализ исследований и публикаций.** На рис. 1 показаны схема трубопровода водоотливной установки и расчетная модель, в которой сделаны необходимые допущения, позволяющие провести графоаналитический расчет [2, 3] гидравлического удара, возникающего при внезапном мгновенном отключении электродвигателя насоса.

Как видно из графоаналитического анализа, приведенного на рисунке 2, если при  $Q < 0$  трубопровод имеет оптимальное гидравлическое сопротивление, то переходный процесс оканчивается за время, равное

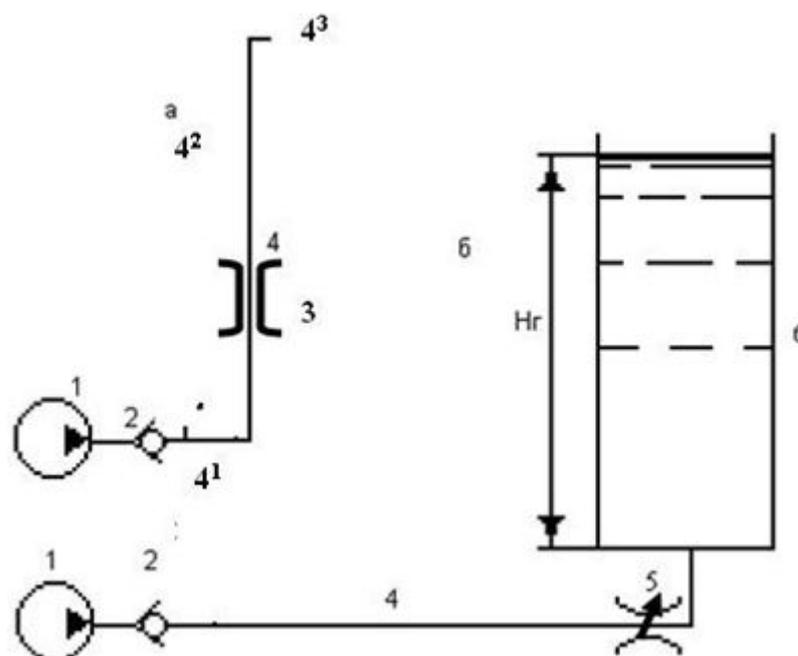


Рис. 1 – Водоотливная установка: а – схема; б – расчетная модель; 1 – насос, 2 – обратный клапан, 3 – функциональный дроссель, 4 – трубопровод (41 – горизонтальный участок, 42 – вертикальный участок 43 – участок на поверхности), 5 – переменное гидравлическое сопротивление трубопровода, 6 – резервуар глубиной, равной геометрической высоте трубопровода

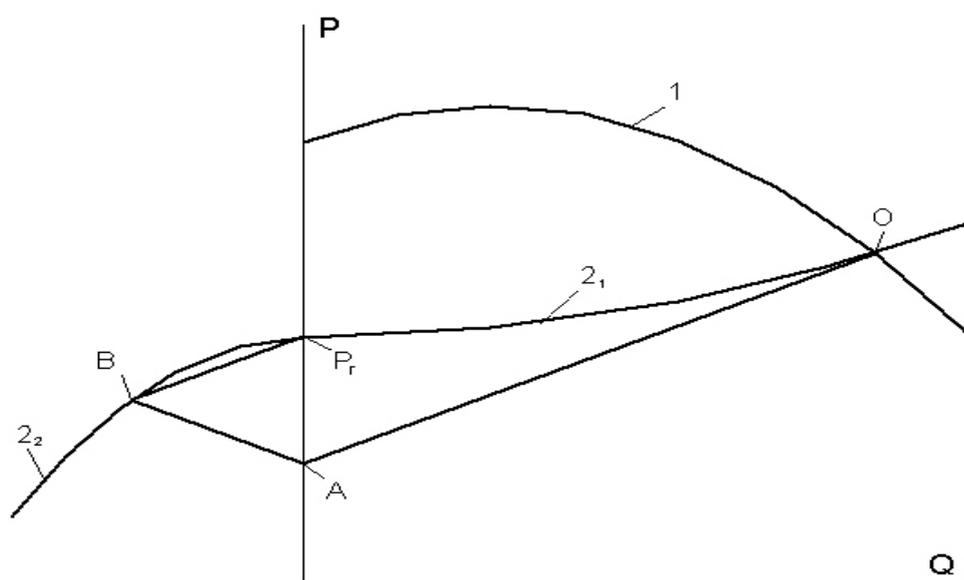


Рис. 2 – Графоаналитический анализ гидравлического удара в трубопроводе водоотливной установки с изменяющимся гидравлическим сопротивлением трубопровода: 1 – напорная характеристика насоса; 2<sub>1</sub> – характеристика трубопровода при  $Q \geq 0$  ( $Q$  – расход); 2<sub>2</sub> – характеристика трубопровода при  $Q < 0$

$$\frac{2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3)}{c}, \quad (1)$$

где  $L_1, L_2, L_3$ , соответственно, длины участков  $4^1, 4^2, 4^3$  (рис. 1а),  $c$  – средняя скорость распространения ударной волны в трубопроводе [2] без повышения давления.

Этот результат нужно считать предварительным, поскольку при графоаналитическом расчете делается ряд существенных допущений [2], однако он наглядно показывает целесообразность увеличения гидравлического сопротивления трубопровода при отрицательном расходе как средства защиты водоотливных установок от гидроударов.

**Изложение материала и результаты.** На рисунке 3 показан график изменения давления в начале трубопровода водоотливной установки при внезапном отключении электродвигателя. Этот график получен с использованием имитационной модели, рассмотренной в статье [4]. Для примера была рассмотрена водоотливная установка с насосом ЦНС 300..1040,  $L_1 = 40$  м,  $L_2 = 800$  м и  $L_3 = 400$  м. Диаметр трубопровода  $D_f$  принимался равным 0,315 м.

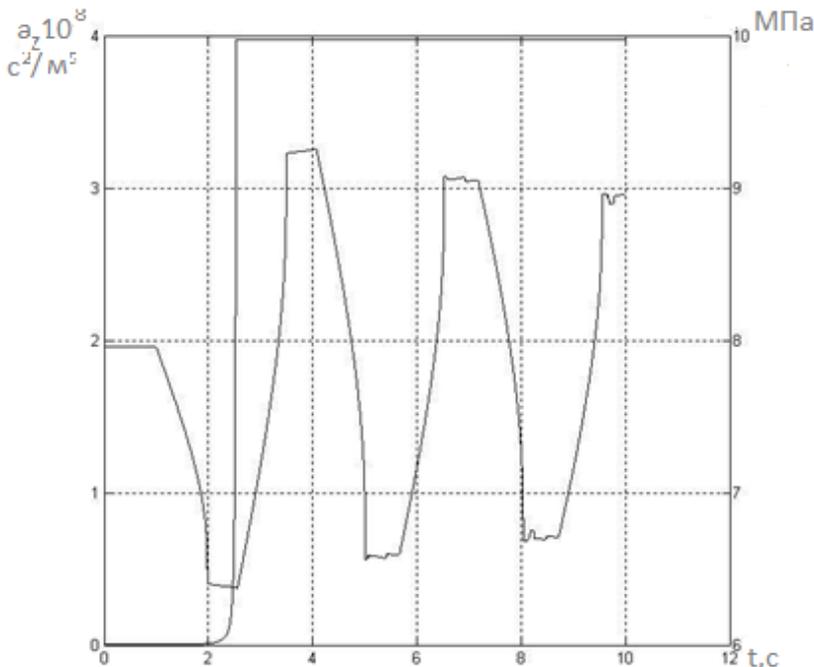


Рис. 3 – Расчет гидравлического удара в трубопроводе водоотливной установки

В качестве средства изменения сопротивления трубопровода для предотвращения гидравлических ударов, в принципе, можно использовать задвижку с системой управления, обеспечивающее время закрытия равное  $T_f$  – фазе гидравлического удара, которое определяется из выражения 1. Техническая реализация системы управления такой задвижкой в данной работе не рассматривается, поскольку это не является предметом настоящего исследования. Вместе с тем будем считать, что шток задвижки движется равномерно, и за время, равное  $T_z$ , гидравлическое сопротивление

рассматривается, поскольку это не является предметом настоящего исследования. Вместе с тем будем считать, что шток задвижки движется равномерно, и за время, равное  $T_z$ , гидравлическое сопротивление

$a_z$  изменяется от  $\frac{\rho}{2(\mu \cdot S_2(0))^2}$ , где  $\rho$  – плотность жидкости,  $S_2(t)$  – текущая площадь открытого сечения задвижки (см. рис. 4),  $S_2(0) = \frac{\pi D_t^2}{4}$ , до  $a_{z \max} = \frac{P_\Gamma - P_B}{Q_B^2} - a_T$ , где  $p_\Gamma = \rho g H_z$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $H_z$  – геометрическая высота водоотливной установки,  $P_B = \frac{p_o - mQ_o + p_2}{2}$ ,  $Q_B = \frac{p_o - mQ_o + p_2}{2m}$ ,  $p_o$ ,  $Q_o$  – давление и расход в начале трубопровода в установившемся режиме работы,  $a_T$  – гидравлическое сопротивление трубопровода.

В первом приближении будем считать диаметр подвижной и неподвижной частей задвижки равными диаметру трубопровода  $D_t$ . Уравнение, описывающее окружность, в системе координат  $0x$ , которая показана на рисунке 4, имеет вид:

$$y(x) = (2xD_t - x^2)^{-0,5} \quad (2)$$

Система координат на рисунке 4 выбрана таким образом, что

$$S_2(t) = \frac{\pi D_t^2}{4} - 4 \cdot \int_0^{\text{hod}(t)} y(x) dx. \quad (3)$$

Хотя интеграл в (3) может быть найден аналитически, но как показали предварительные расчеты, высокая точность достигается при использовании численных методов [5]. Зная величину  $S_2(t)$  можно определить текущее сопротивление задвижки  $a_z(t) = \frac{\rho}{2(\mu \cdot S_2(t))^2}$ .

Величину оптимального хода штока так же можно найти численно, из уравнения с одним неизвестным [5]

$$a_{z \max} = \frac{\rho}{2 \left( \mu \cdot \frac{\pi D_t^2}{4} - 4 \cdot \int_0^{\text{hodmax}} y(x) dx \right)^2}. \quad \text{Справедливость такого подхода}$$

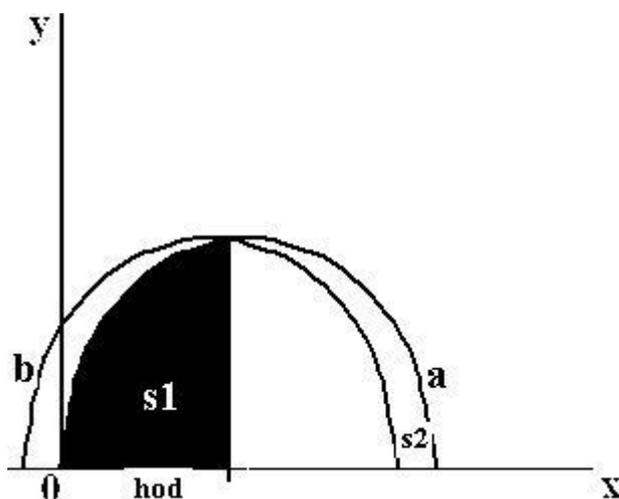
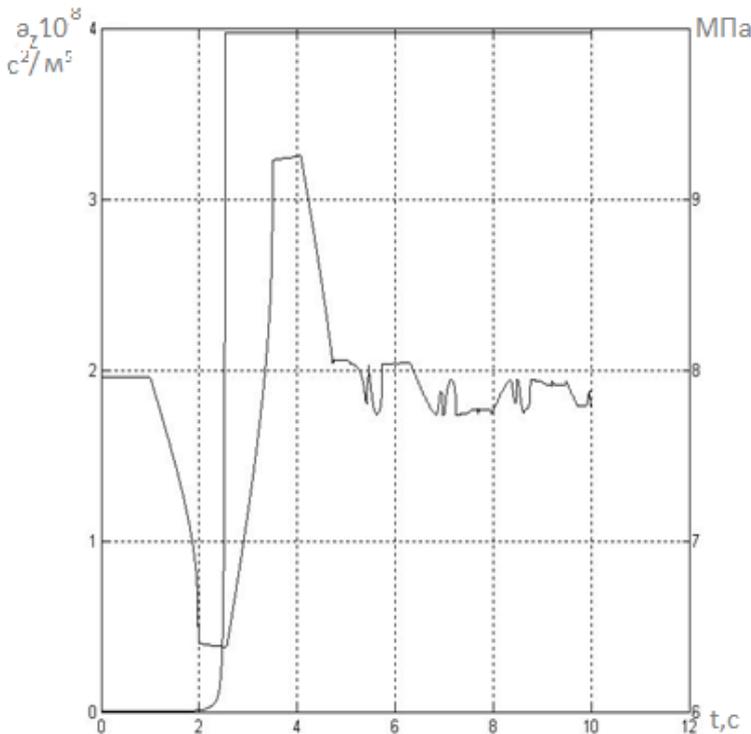


Рис. 4 – Расчетная схема задвижки в процессе закрытия: а – корпус; б – затвор

подтверждается характером графика изменения расчетного сопротивления задвижки, приведенного в [3].

На рисунке 5 показан график переходного процесса в трубопроводе водоотливной установки, в случае если задвижка находится в



конце трубопровода и прикрывается за время равное фазе гидравлического удара.

Следует обратить внимание на то, что, хотя характер переходного процесса изменился (через время равное двум фазам удара график изменения давления стал носить аperiодический низкоамплитудный характер), величина максимального давления  $p_{\max}$  не уменьшилась, и, следовательно, не может служить критерием оптимизации при выборе места установки задвижки.

Рис. 5 – График переходного процесса в трубопроводе водоотливной установки (задвижка в конце трубопровода)

изменение гидравлического сопротивления которой служит для предотвращения гидравлических ударов.

Хотя в статье [6] достаточно подробно рассмотрен выбор оптимальных способов функционирования и базовых параметров средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов, однако предложенные там критерии необходимо уточнить.

В связи с тем, что в данном случае переходный процессе сопровождается разрывами сплошности потока и возникающие при этом всплески давления, хотя и не представляют опасности для защищаемого трубопровода, формально вносят значительные возмущения в предложенные в [6] критерии, что, в свою очередь, приводит к неправильному выбору параметра оптимизации. Таким образом, будем считать, что качество переходного процесса определяется выражением:

$$I_k(x_z) = \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{T_M} \left[ \int_0^{L_M} \left| \frac{p_{x_z}(\xi, x) - p_o(x)}{p_o(x)} dx \right| d\xi, \text{ если } p_o(x) \neq 0 \\ 0, \text{ если } p_o(x) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Причем

$$L_M = \int_0^{L_T} \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ если } p_o(x) \neq 0 \\ 0, \text{ если } p_o(x) = 0 \end{array} \right. \cdot dx, \quad (5)$$

$$I(x_z) = 1 - \frac{I_k(x_z)}{I_k(0)},$$

где  $I(x_z)$  – обобщенный критерий качества переходного режима,

$I_k(x_z)$  – критерий качества переходного процесса, зависящий от положения задвижки  $x_z$ ,  $0 \leq x_z \leq L_T = L_1 + L_2 + L_3$ ,

$T_M$  – время моделирования,

$p_{x_z}(\xi, x)$  – функция, описывающая изменение давления в напорном трубопроводе водоотливной установки с учетом распределенных параметров, момента инерции насосного агрегата, положения задвижки  $x_z$ , предназначенной для изменения сопротивления этого трубопровода, которое находится путем численных расчетов, с использованием алгоритмов, рассмотренных в [3, 4],

$p_o(x)$  – функция, описывающая распределение давления в напорном трубопроводе водоотливной установки в установившемся режиме после отключения насоса.

На рисунке 6 показаны зависимости критериев качества переходного процесса от места расположения задвижки из которых вид-

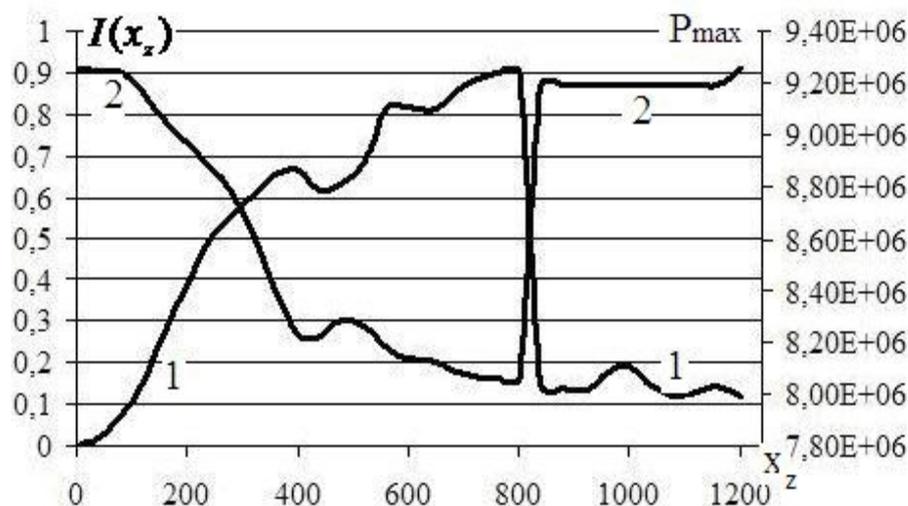


Рис. 6 – Зависимости критериев качества переходного процесса от места расположения задвижки, 1 –  $I(x_z)$ , 2 –  $p_{\max}$

но, что эффективность способа защиты трубопровода от гидравлического удара путем изменения сопротивления трубопровода увеличивается по мере отодвигания задвижки от насоса. Этот тренд сохраняется до точки соединения вертикального и горизонтального участков

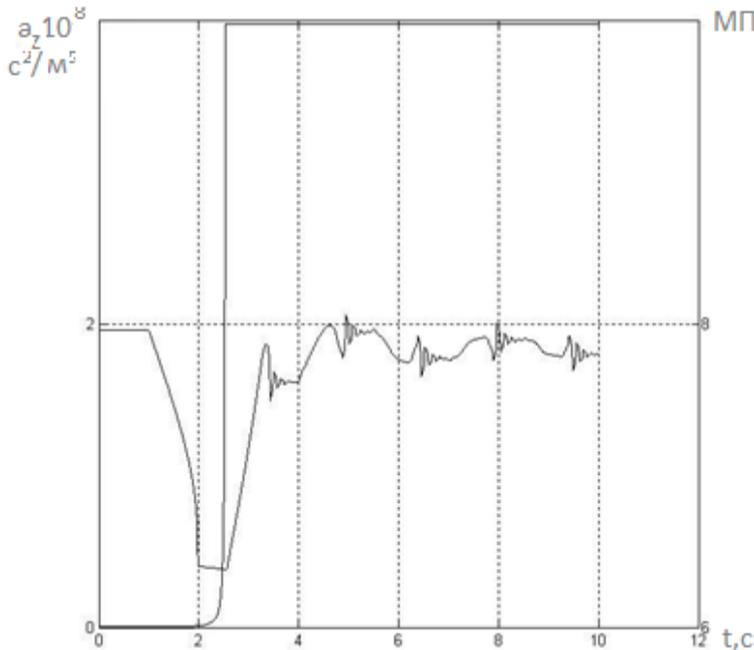


Рис. 7 – График переходного процесса в трубопроводе водоотливной установки (задвижка в точке соединения вертикального и горизонтального участков)

трубопровода. В этой точке эффективность данного способа защиты и устройства для его реализации максимальна. График изменения давления в начале трубопровода для этого случая на рисунке 7 показывает отсутствие повышения давления и аperiodический характер этого процесса.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Таким образом, проведен анализ и доказана эффективность способа защиты трубо-

провода от гидравлического удара путем программного ввода дополнительного сопротивления, предложен новый критерий оптимизации для определения точки установки устройства защиты. Основные направления дальнейших исследований заключаются в синтезе и моделировании системы управления задвижкой, которая используется для изменения сопротивления трубопровода в момент внезапного отключения насосного агрегата. Самостоятельная задача, возникшая в ходе данного исследования, заключается в необходимости совершенствования модели разрывов сплошности потока жидкости [3]. Кроме того, все выводы и результаты требуют экспериментальной проверки.

#### Список литературы

1. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки / В.М.Попов. – М.: Недра, 1972. – 340 с.
2. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. / Луи Бержерон; пер с фр. С.Г.Батюшкова. – М.: Машгиз, 1962. – 348 с.
3. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. / Д.А.Фокс. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
4. Оверко В.М. Повышение надежности водоотливных установок, защищенных гидравлическими диодами / В.М.Оверко, В.П.Овсянников // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2010. – Вип. (18)172. – С. 226-233.

5. Лазарев Ю.Ф. MatLAB 6.5. Математическое моделирование физических процессов и технических систем: Учебный курс / Ю.Ф.Лазарев. – К., 2004. – 474 с.
6. Бойко Н.Г. Выбор оптимальных способов функционирования и базовых параметров средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов / Н.Г.Бойко, М.В.Оверко, В.П.Овсянников // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2012. – Вип. (23)196. – С. 30-36.

*Стаття надійшла до редакції 07.04.2013*

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

**Програмне дроселювання як метод захисту водовідливної установки від гідравлічного удару.**

*Розглянута можливість використання зміни гідравлічного опору трубопроводу як засобу захисту водовідливних установок від гідроударів. Запропонований критерій вибору місця установки пристрою захисту.*

**Ключові слова:** водовідливна установка, гідравлічний удар, опір трубопроводу.

***A.P. Kononenko, V.P. Ovsyannikov, M.V.Overko. Donetsk National Technical University***

**Programmatic Throttling as a Method of Pumping Plant Protection from Water-Hammers**

*The paper considers the possibility of using the change of pipeline hydraulic resistance as a means of pumping plant protection from water hammers. We propose a criterion of choosing the location of the protection device.*

**Keywords:** dewatering plant, water hammer, pipeline resistance.