

УДК 621.646.94 ГРНТИ 52.01.84

Н.Г. Бойко, д-р техн. наук, проф.,**В.П. Овсянников**, канд. техн. наук, доц.,**М.В. Оверко**, инж.,

Донецкий национальный технический университет

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И БАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ

Рассмотрены общие принципы оптимизации параметров динамических процессов в напорных трубопроводах водоотливных установок.

Ключевые слова: водоотливная установка, динамические процессы, общие принципы оптимизации.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Проблема защиты водоотливных установок шахт от гидравлических ударов по-прежнему остается актуальной. Можно отметить, что её острота даже возрастает по мере закрытия шахт и необходимости откачивать воду на неработающих предприятиях при ограниченном финансировании. С другой стороны, длительность срока, в течение которого эта проблема не находит эффективного практического решения, показывает необходимость дальнейших теоретических исследований в этой области, и, в частности, обоснования критерия оптимальности выбора способов и параметров средств защиты трубопроводов шахтных водоотливных установок от гидравлических ударов.

Анализ исследований и публикаций. Как известно, в процессе анализа и упрощений уравнений Навье-Стокса и при выводе уравнения неразрывности делаются следующие допущения [1]:

- анализ ведется в рамках одномерной модели;
- пренебрегают всеми видами диссипации энергии в потоке;
- пренебрегают конвективными производными скорости, плотности и давления;
- жидкость считается упругой и при сжатии подчиняется закону Гука;
- деформация материала стенок так же подчиняется закону Гука;
- деформация элемента трубопровода между двумя сечениями, отстоящими друг от друга на расстояние dx , рассматривается независимо от деформации соседних участков трубопровода.

С учетом этих, обычных для теории гидравлического удара допущений, система уравнений, описывающая процесс гидравлического удара в цилиндрическом трубопроводе с постоянным поперечным сечением имеет вид [1]:

$$\text{- уравнение движения:} \quad \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - k; \quad (1)$$

$$\text{- уравнение неразрывности:} \quad \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{-c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

где $H \equiv H(x, t)$ – распределённый вдоль длины трубопровода пьезометрический напор, x – координата в пределах трубопровода, $0 \leq x \leq L_t$, L_t – длина трубопровода; ρ – плотность жидкости; $v \equiv v(x, t)$ – распределённая вдоль длины трубопровода скорость потока жидкости; g – ускорение свободного падения; $k \equiv k(x)$ – тангенс угла наклона трубопровода к горизонту; c – скорость распространения ударной волны в трубопроводе.

Система уравнений (1), (2) содержат независимые функции $H(x, t)$ и $v(x, t)$, определение которых и составляет основную задачу теории гидравлического удара. А задача создания средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов, по сути, сводится к изменению этих функций при помощи технических устройств.

Общие интегралы уравнений (1), (2), приведятся к виду:

$$v - v_0 = \frac{g}{c} \left(F \left(t - \frac{x}{c} \right) - f \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \quad (3)$$

$$H - H_0 = F \left(t - \frac{x}{c} \right) + f \left(t + \frac{x}{c} \right), \quad (4)$$

где $H_0(x)$, $v_0(x)$ – соответственно, пьезометрический напор и скорость в установившемся режиме до возникновения гидравлического удара; F, f – некоторые функции, определяемые из граничных условий.

Оптимальное управление гиперболическими системами, то есть, в конечном счете, определение функций F и f в зависимости от требований к качеству переходного процесса рассматривается, например, в [2, 3]. Но этот анализ носит абстрактный характер и не позволяет найти инженерного решения задачи, то есть ответить на вопрос, каким устройством должно обеспечиваться это качество, и какие должны быть параметры этого устройства?

Изложение материала и результаты. Рассмотрим защиту трубопроводов от гидравлических ударов за счет изменения гранич-

ных условий в начале трубопровода [2]. При этом следует иметь в виду, что минимально возможное время перехода потока жидкости из одного состояния в другое равно времени, в течение которого волна давления преодолевает расстояние от начала трубопровода до конечной точки и обратно, то есть длительности периода гидравлического удара - $4L_t/c$. Следовательно, устройство защиты, способное осуществить такой переход, является оптимальным по быстродействию. Кроме того, оно обеспечивает аperiодический характер переходного процесса. Такая защита априори удовлетворяет одному из основных требований к средствам защиты от гидравлических ударов, поскольку в этом случае исключаются периодические динамические нагрузки на трубопровод. Если при этом в течение переходного процесса в защищенном трубопроводе выдерживаются ограничения на величину давления, то такой способ защиты и устройство его реализующее можно считать оптимальными.

В качестве важного шага в решении задачи оптимизации параметров средств защиты трубопроводов от гидравлического удара рассмотрим критерий оптимальности работы устройства защиты трубопровода от гидравлического удара, возникающего при отключении насосного агрегата шахтной водоотливной установки.

В этом случае конечное состояние потока жидкости в трубопроводе - это состояние покоя, $v = 0$. Из уравнения (3) следует:

$$\frac{v_0 c}{g} = F\left(\frac{4L_t}{c} - \frac{x}{c}\right) - f\left(\frac{4L_t}{c} + \frac{x}{c}\right). \quad (5)$$

Конкретный вид функций F и f зависит от граничных условий, а в случае управления динамическими процессами в трубопроводах - от принципов функционирования и параметров средств защиты от гидравлических ударов, от вида функции $u(x,t)$, описывающей граничные условия, формируемые соответствующими устройствами. В частном случае, если средства защиты водоотливных установок располагаются в начале трубопровода, можно считать, что функция $u(x,t) \equiv u(t)$.

Как отмечалось выше, следует стремиться к тому, чтобы переходный процесс в трубопроводе водоотливной установки завершился в конце второй фазы гидравлического удара, в момент времени $4L_t/c$. Следовательно, критерий оптимальности работы средств защиты от гидравлических ударов в этом случае можно представить в виде

$$\frac{v_0 c}{g} = F'_{u(t)}\left(\frac{4L_t}{c} - \frac{x}{c}\right) - f'_{u(t)}\left(\frac{4L_t}{c} + \frac{x}{c}\right) \quad (6)$$

с ограничениями

$$F'_{u(t)}(t, x), f'_{u(t)}(t, x) \leq H_D, 0 \leq t \leq \frac{4L_t}{c}, 0 \leq x \leq L_t \quad (7)$$

где H_D – допустимый уровень напора в трубопроводе; функции $F'_{u(t)}(t, x)$ и $f'_{u(t)}(t, x)$ – частные решения системы уравнений (3), (4) с граничным условием в начале трубопровода $u(t)$.

Определение функции $u(t)$ в общем случае является сложной, если вообще разрешимой задачей. Однако, если приближенное решение системы уравнений (3), (4) искать графоаналитическим способом [4, 5] то в этом случае, функцию $u(t)$ можно найти из соответствующих построений, рис. 1.

Графоаналитический расчет, приведенный на рис. 1, представляет собой приближенное, в рамках допущений [4, 5], решение задачи оптимизации параметров средств защиты трубопровода водоотливной установки от гидравлического удара. Кривая 9 (характеристика сбросного клапана с оптимальными параметрами) соответствует искомому граничному условию $u(t)$ в уравнениях (6), (7) и выбирается таким образом, что отраженная от конца трубопровода волна, параметры которой определяются обратной характеристикой 8, формирует в трубопроводе новое установившееся состояние потока, близкое к состоянию потока в точке 2, рис. 1. При этом переходный процесс заканчивается в течение времени, равного длительности периода колебаний гидравлического удара $4L_t/c$, носит апериодический характер и удовлетворяет тем самым требованиям критерия оптимальности (6) и ограничению (7).

Аналогичные расчеты можно выполнить и для случая применения в качестве средства защиты гасителя со сбросом части транспортируемой жидкости, реагирующего на повышение давления. То же самое можно сделать, если для защиты применять гидропневмоаккумулятор [4, 5]. К решениям этого класса относится определение параметров специального обратного клапана для защиты трубопроводов от гидравлических ударов [6, 7]. Все эти примеры показывают универсальность предложенного способа выбора принципов функционирования и оптимизации характеристик средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов.

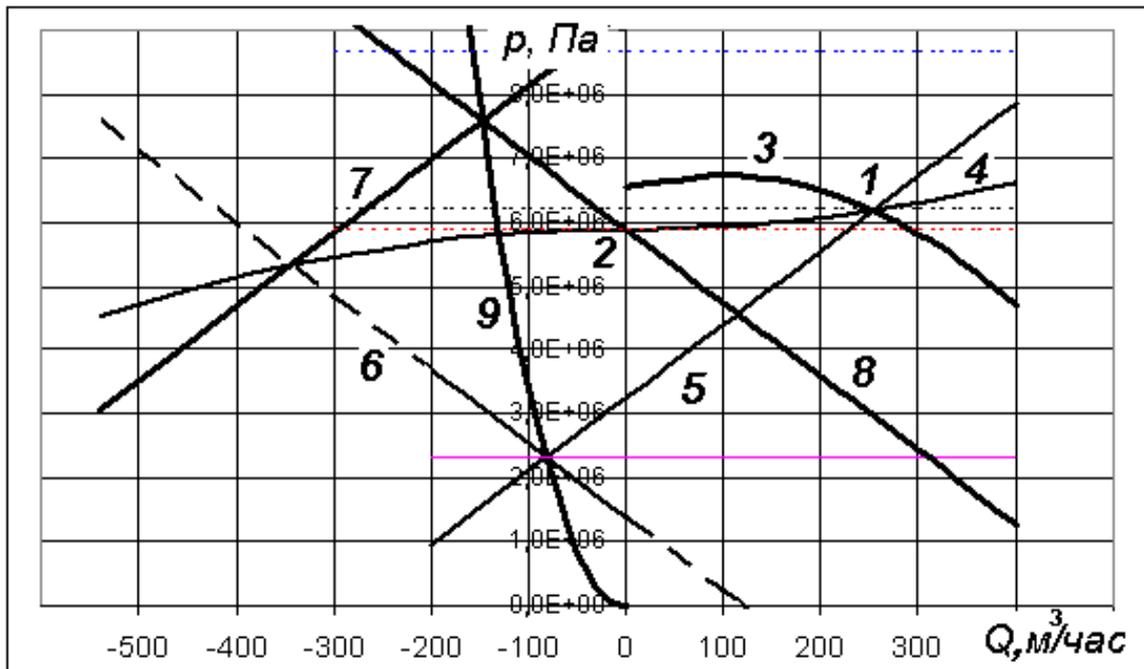


Рис. 1. – К графоаналитическому расчету переходного процесса в трубопроводе шахтной водоотливной установке, защищенной гасителем гидравлических ударов с оптимальным сопротивлением сбросного клапана (гаситель, реагирующий на понижение давления): 1 – точка, характеризующая параметры стационарного режима работы при включенном насосном агрегате; 2 – параметры стационарного режима при выключенном насосном агрегате; 3 – напорная характеристика насоса; 4 – характеристика трубопровода; 5, 7 – прямые волновые характеристики трубопровода; 6, 8 – обратные характеристики; 9 – расходная характеристика сбросного клапана с оптимальными параметрами

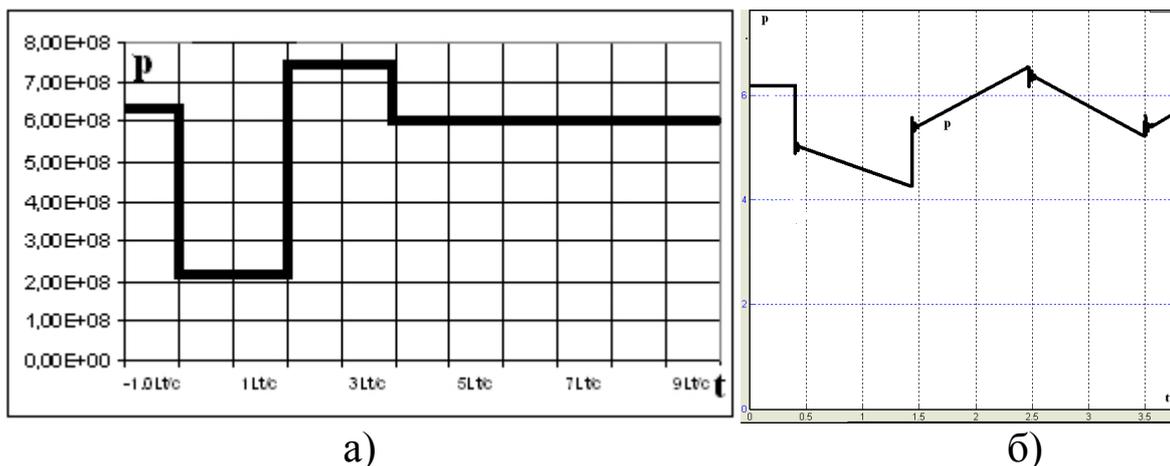


Рис. 2. – Результаты расчета переходного процесса в трубопроводе водоотливной установки, защищенной гасителем гидроударов с оптимальными параметрами: результаты графоаналитического расчета – а), результаты расчета с использованием имитационной модели – б)

Конечно, полученные таким методом решения требуют уточнения путём численных экспериментов с использованием полной адекватной модели динамических процессов, построенной на основе ме-

тода характеристик [5]. Объединение графоаналитических расчетов с имитационным моделированием даёт возможность найти оптимальные параметры и определить принципы функционирования средств защиты, удовлетворяющие требованиям (6), (7).

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, предложен критерий оптимизации параметров и выбора принципов функционирования средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов и показана эффективность предлагаемого подхода к решению этой задачи. В дальнейшем требуются экспериментальные исследования для подтверждения адекватности предложенной методики оптимизации.

Список литературы

1. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. – изд. 2. – М.: Недра, 1975. – 295 с.
2. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределёнными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
3. Аргучинцев, А.В. Оптимальное управление гиперболическими системами / А.В. Аргучинцев. – М.: ФИЗМАТЛТИТ, 2007. – 168 с.
4. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети / Л. Бержерон. – М.: Машгиз, 1962. – 348 с.
5. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / Д.А. Фокс. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с, ил.
6. Оверко В.М. Повышение надежности водоотливных установок, защищенных гидравлическими диодами / В.М. Оверко, В.П. Овсянников // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2010. – Вип. 18(172). – С. 226-233.
7. Оверко В.М. Влияние количества гидравлических диодов на эффективность защиты водоотливных установок от гидравлического удара / В.М. Оверко, В.П. Овсянников // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2008. – Вип. 16(142). – С. 210-215.

Стаття надійшла до редколегії 07.11.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кононенко А.П.

Н.Г. Бойко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко. Вибір оптимальних способів функціонування і базових параметрів засобів захисту трубопроводів від гідравлічних ударів. Розглянуті загальні принципи оптимізації параметрів динамічних процесів в трубопроводах високого тиску водовідливних установок.

Ключові слова: водовідливна установка, динамічні процеси, загальні принципи оптимізації.

N. Boyko, V. Ovsyannikov, M. Overko. A Choice of Optimal Methods of Functioning and Basic Parameters of Facilities of Protection of Pipelines from Hydraulic Shots. General principles of optimization of parameters of dynamic processes are considered in the pressure pipelines of pumping units.

Keywords: pumping setting dynamic processes general principles of optimization.

© Бойко Н.Г., Овсянников В.П., Оверко М.В., 2012