

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ВЫСОКОНАПОРНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ**

Оголобченко А.С. канд. тех. наук., доц., Никулин Э.К.  
канд. тех. наук., доц., Гавриленко Б.В. канд. тех. наук., доц.,  
Донецкий государственный технический университет

*Предложен способ автоматического управления пуском высоконапорной насосной станции с использованием математического моделирования для вычисления минимально необходимого времени пуска при условии отсутствия опасных гидравлических ударов в трубопроводной сети.*

*The way of automatic control of start-up high-pressure of pump station with use of mathematical modeling for calculation minimally of necessary time of start-up under condition of absence of dangerous hydraulic impacts in the pipeline is offered.*

Пуск насосной станции, оборудованной высоконапорными центробежными насосами с разветвленной трубопроводной сетью, длительный, требует значительного расхода воды и электроэнергии, и может вызвать опасный гидравлический удар в системе водоснабжения. Как правило, время пуска станции определяется экспериментально и устанавливается по его максимальной величине с определенным запасом для гарантированного безопасного включения высоконапорных насосов, что приводит к значительным экономическим потерям [1]. Поэтому для повышения эффективности работы насосной станции требуется оптимизация пускового режима, что может быть достигнуто путем автоматического управления.

включение высоконапорного насоса; открытие запорной арматуры. Время включения насосов и открытия задвижек, как правило, не превышает 60с, является величиной постоянной, регулирования не требует и определяется пусковой аппаратурой электропривода, которая принимается при проектировании системы водоснабжения.

Целью заполнения водой трубопроводной сети является удаление воздуха из трубопроводов, который является основной причиной возникновения опасных гидравлических ударов в гидросистеме после включения высоконапорного насоса. Время заполнения  $t_3$  является величиной переменной, её значение практически полностью определяет длительность пускового режима станции и не может быть задана при проектировании системы водоснабжения, так как зависит от: объема трубопроводной сети, который изменяется по мере наращивания или сокращения трубопроводов; конфигурации трубопроводной сети - наличие вертикальных участков с различной геометрической высотой нагнетания вызывает неопределенность удаления воздуха, а следовательно, увеличение времени заполнения  $\Delta t$ ; количества  $n_{\text{п}}$  потребителей, подготовленных к работе; гидравлических параметров насоса – подачи  $Q_3$  (скорости  $V_3$  потока воды) и напора  $p_3$  которые изменяются по мере заполнения; наличия воды в сети перед пуском.

Таким образом, критерий управления насосной станцией в режиме пуска можно сформулировать как обеспечение минимально необходимого времени заполнения водой трубопроводной сети при условии отсутствия опасных гидравлических ударов в гидросистеме:

$$t_3(V_3, p_3, L_c, D_c, n_{\text{п}}, \Delta t) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при условии  $p_3(x,t) \leq k_p \cdot p_p, \quad 0 \leq x \leq L_c \cdot t > 0+; \quad V_3 > V_{\text{кр}}$

где  $k_p$ -коэффициент запаса прочности трубопровода по давлению,  $k_p=1,25$  ;  $p_p$  – рабочее давление воды, на которое рассчитывается трубопровод при проектировании;  $V_{\text{кр}}$ - критическая скорость потока воды ниже которой не

Применение датчиков для определения окончания процесса заполнения, например, по наличию истечения воды у потребителей вызывает значительную погрешность контроля из-за неопределенности удаления воздуха из трубопроводов вертикальных участков сети. Предлагается при управлении использовать математическую модель процесса заполнения водой трубопроводов сети для вычисления минимально необходимого времени заполнения  $t_3$ .

Для построения модели трубопроводная сеть условно разбивается на характерные участки АВ, BD и DE (см. рисунок), заполнение водой которых носит специфический характер и описывается различными уравнениями.

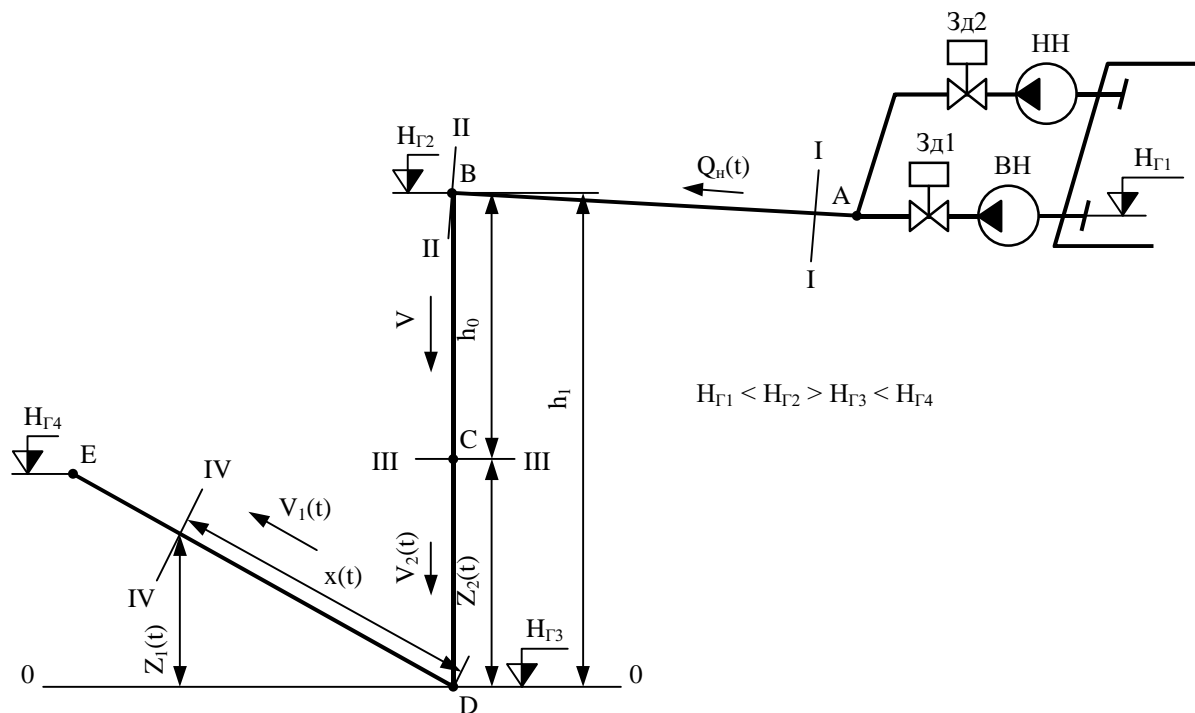


Рисунок 1- Технологическая схема насосной станции

Заполнение трубопровода участка АВ происходит напорным потоком воды, создаваемым вспомогательным насосом НН. При этом рабочий режим насоса определяется напорными характеристиками насоса  $p(Q(t), \psi(t))$  и сети  $p_c(Q(t), a_c(t))$  соответственно вида:

$$\begin{cases} p(Q(t), \omega(t)) = pgz \left[ a \left( \frac{\omega(t)}{\omega_s} \right)^2 + b \frac{\omega(t)}{\omega_s} \cdot Q(t) - c \cdot Q^2(t) \right] \\ p_c(Q(t), \omega(t)) = pg \left[ \Delta H_T(t) + a_c(t) \cdot Q^2(t) \right] \end{cases} \quad (2)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики насоса;  $z$  – число рабочих колес насоса;  $a_c(t)$  – текущее гидравлическое сопротивление сети;  $\Delta H_T(t)$  – текущая геометрическая высота нагнетания насоса;  $Q(t)$  – текущая подача насоса;  $\omega(t), \omega_s$  – соответственно текущая и номинальная частота вращения рабочего колеса насоса;  $t$  – текущее время.

Преобразуя (2) относительно  $Q(t) = Q_{\kappa}(t)$  и учитывая, что, как правило,  $z = 1$  и  $\omega(t) = \omega_s$  получено уравнение, описывающее процесс заполнения водой трубопровода участка АВ:

$$Q_{\kappa}(t) = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot (W_{AB}(t) \cdot \kappa_2 + \sum \xi(t) \cdot \kappa_3 + c) \cdot (W_{AB}(t) \cdot \kappa_1 - a)}}{2 \cdot (W_{AB}(t) \cdot \kappa_2 + \sum \xi(t) \cdot \kappa_3 + c)}, \quad (3)$$

при следующих граничных условиях: начальные -  $W_{AB}(0) = 0$  и  $\xi(0) = \xi_{\max}$  для принятого типа задвижки; конечные -  $W_{AB}(t_3^{AB}) = W_{AB}$  и  $\xi(t_3^{AB}) = \xi_{\min}$  для трубопровода участка АВ.

В формуле (3) обозначено:  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – постоянные коэффициенты, определяемые как:

$$\kappa_1 = \frac{\sin \alpha}{S_{AB}}, \quad \kappa_2 = \frac{\lambda}{2 \cdot g \cdot d_{AB} \cdot S_{AB}^2}, \quad \kappa_3 = \frac{1}{2 \cdot g \cdot S_{AB}^2};$$

$\sin \alpha = \frac{H_{r2} - H_{r1}}{L_{AB}}$ ;  $\lambda$  – коэффициент Дарси;  $L_{AB}, d_{AB}, S_{AB}, W_{AB}$  – длина,

диаметр, площадь поперечного сечения и объем трубопровода участка АВ;  $\sum \xi(t)$  – суммарные местные гидравлические сопротивления трубопровода;

$W_{AB}(t) = \int_0^t Q_{\kappa}(t) dt$  – текущий объем трубопровода участка АВ,

заполненного водой.

Время заполнения водой трубопровода участка АВ  $t_3^{AB}$  вычисляется по зависимости (3), при достижении расчетной величины  $W_{AB}(t)$  заданного значения  $W_{AB}$ .

Заполнение водой трубопровода участка DE происходит под воздействием столба воды  $Z_2(t)$  в вертикальном трубопроводе BD, образующегося при сбросе потока воды из трубопровода участка АВ. При этом текущая длина  $x(t)$  трубопровода участка DE, заполненного водой за время  $t$ , определяется как:

$$x(t) = \int_0^t V_1(t) dt, \quad (4)$$

где  $V_1(t)$  - скорость потока воды в трубопроводе участка DE, значение которой вычисляется из уравнения Бернулли для сечений (III-III) и (IV-IV) относительно плоскости сравнения 0-0:

$$Z_1(t) + \frac{p_a}{2 \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2(t)}{2 \cdot g} = Z_2(t) + \frac{p_b(t)}{2 \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2(t)}{2 \cdot g} + H_{\pi}^{BD}(t) + H_{\pi}^{DE}(t), \quad (5)$$

где  $Z_1(t) = \frac{H_{r4} - H_{r3}}{L_{DE}} \int_0^t V_1(t) dt$ ,  $Z_2(t) = \int_0^t \frac{V_2(t) \cdot S_{BD} - V_1(t) \cdot S_{DE}}{S_{BD}} dt$ ;  $p_a$  -

атмосферное давление;  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты Корнолиса;  $p_b(t)$  - текущее давление воздуха в незаполненном трубопроводе участка BD, определяется считая, что процесс изотермический как:

$$p_b(t) = \frac{p_a \cdot W_{BD}}{W_{BD} - Z_2(t) \cdot S_{BD}};$$

$V_2(t)$  - скорость воды в трубопроводе участка BD, вычисляется из уравнения (2) с учетом текущей величины давления воздуха  $p_b(t)$  и при условии, что величина  $a_c(t)$  определяется значением гидравлического сопротивления трубопровода участка АВ;  $H_{\pi}^{DE}(t)$ ,  $H_{\pi}^{BD}(t)$  - текущие гидравлические потери

энергии в трубопроводе на участке DE и BD, которые вычисляются по соответствующим зависимостям:

$$H_{\pi}^{DE}(t) = \lambda_1 \cdot \frac{x(t)}{d_{DE}} \cdot \frac{V_1^2(t)}{2 \cdot g}, \quad H_{\pi}^{BD}(t) = \lambda_2 \cdot \frac{Z_2(t)}{d_{BD}} \cdot \frac{V_2^2(t)}{2 \cdot g};$$

параметры  $V_1(t)$  и  $V_2(t)$  связаны уравнением неразрывности потока:

$$V_1(t) \cdot S_{DE} = V_2(t) \cdot S_{BD};$$

$L_{DE}$ ,  $d_{DE}$ ,  $S_{DE}$ ,  $L_{BD}$ ,  $d_{BD}$ ,  $S_{BD}$  - длина, диаметр и площадь поперечного сечения трубопровода участков DE и BD соответственно;  $g$  - ускорение свободного падения.

Время заполнения водой трубопровода участка DE  $t_3^{DE}$  вычисляется по зависимости (4), при достижении расчетной величины  $x(t)$  заданного значения  $L_{DE}$ . При этом величина  $Z_2(t)$  соответствует длине трубопровода участка BD, заполненного водой за время  $t_3^{DE}$ .

Процесс заполнения водой вертикального участка BD трубопроводной сети характеризуется образованием газожидкостной смеси и неопределенностью удаления воздуха из нее. Исследования этого процесса осуществлено путем физического моделирования на лабораторной установке [2]. Экспериментально установлено, что длительность заполнения водой вертикального трубопровода определяется временем образование газожидкостной смеси ( $t_{НП}$ ) и временем «вымыва» воздуха из трубопровода ( $t_{ВМ}$ ):

$$t_{НП} = \frac{H_0^{НП} \cdot h_0}{V}, \quad t_{ВМ} = \frac{H_0^{ВМ} \cdot h_1}{V}, \quad (6)$$

где  $H_0^{НП} = 25,2 \cdot \tilde{F}_r^{-0,34} \cdot \beta^{2,56} \cdot E_u \cdot \bar{H}^{-1}$ ,

$$H_0^{ВМ} = 16,8 \cdot \tilde{F}_r^{-0,54} \cdot \beta^{0,86} \cdot E_u \cdot \bar{H}^{-1}$$

- критериальные уравнения,

описывающие соответственно процесс образование газожидкостной смеси и «вымыва» воздуха из неё, которые получены в результате обработки

экспериментальных данных на ЭВМ;  $H_0^{HP}$ ,  $H_0^{BM}$  - критерий гомохронности;  $\tilde{F}_r$  - критерий Фруда с учетом Архимедовой силы;  $E_u$  - критерий Эйлера;  $v$  - расходное газосодержание;  $\bar{N}$  - линейный параметрический комплекс, характеризующий соотношение длины трубопровода и его диаметра;  $V$  – скорость потока воды на входе в трубопровод, вычисляется по зависимости (3);  $h_0$  - начальная длина трубопровода, наполняемого водой, определяется как  $h_0 = h_1 - Z_2(t)$  при  $t = t_3^{DE}$ ;  $h_1$  - длина трубопровода участка BD.

Таким образом, искомое минимально необходимое время заполнения водой трубопроводной сети определяется как:

$$t_3 = t_3^{AB} + t_3^{DE} + t_{HP} + t_{BM} \quad (7)$$

С целью использования модели (2)-(7) при автоматическом управлении пуском насосной станции разработаны алгоритм моделирования, на основе метода численного решения систем уравнений Рунге-Кутты, и соответствующая программа для ЭВМ. Результатом моделирования является вычисление времени  $t_3$ , которое является уставкой в системе управления.

Для проверки адекватности разработанной математической модели были проведены промышленные исследования процесса пуска высоконапорной насосной станции гидрошахты «Красноармейская» ГХК «Добропольеуголь». В результате экспериментов установлено, что погрешность определение времени заполнения водой трубопроводной сети математическим моделированием не превышает 15,3%, что вполне приемлемо для промышленных условий.

Кроме того, как и при моделировании на ЭВМ, исследованиями установлено, что при завершении заполнения давление воды на нагнетании насоса увеличивается на 20-25%, а подача уменьшается на 70-80% по сравнению с начальным их значениями после выхода насоса на рабочий



На основании вышеизложенного, разработан алгоритм автоматического управления пуском высоконапорной насосной станции, который заключается в следующем. На первом этапе управления определяется начальное состояние объекта управления (см. рисунок): положение запорных органов задвижек Зд1 и Зд2 (должны быть закрыты) и наличие воды в трубопроводах участков АВ, ВD и DE (начальное заполнение водой трубопроводной сети). Далее включается вспомогательный насос НН и при достижении частоты вращения рабочего колеса номинального значения открывается задвижка Зд2. Начинается заполнения водой трубопроводной сети. При этом фиксируются начальные значения подачи  $Q(0)$  и напора  $p(0)$  насоса, моделируется процесс заполнения и рассчитывается время заполнения  $t_3$ . В течение времени  $t_3$  управляющие воздействия на гидросистему не осуществляются. По истечении времени  $t_3$  фиксируются текущие значения подачи  $Q(t_3)$  и напора  $p(t_3)$  насоса, определяется количество открытых водопотребителей  $n_{\text{п}}$  (например, по изменению электрических параметров электродвигателя насоса: силы тока или потребляемой активной мощности). Далее сравнением значений  $Q(t_3)$ ,  $p(t_3)$  с соответствующими  $Q(0)$ ,  $p(0)$  контролируется окончание процесса заполнения. При этом должно соблюдаться условия:

$$p(t_3) > k_p \cdot p(0) \text{ и } Q(t_3) < k_q \cdot Q(0), \quad (8)$$

где  $k_p$ ,  $k_q$  - коэффициенты, учитывающие количество открытых водопотребителей.

Для исключения опасных гидравлических ударов в гидросистеме при подключении высоконапорного насоса к сети также необходимо, чтобы

$$n_{\text{п}} > 3 \quad (9)$$

При соблюдении условий (8) и (9) формируется команда на включение высоконапорного насоса ВН. После включения насоса ВН и при достижении частоты вращения рабочего колеса номинального значения отрывается задвижка Зд1, задвижка Зд2 закрывается, насос НН выключается. Пуск насосной станции окончен.



На основании описанного алгоритма управления разработано устройство автоматического управления типа УУЗ на базе микроконтроллера «Электроника МС2721», которое в составе АСУ ТП «Гидротехнолог» внедрено на гидрошахте «Красноармейская» ГХК «Добропольеуголь» для автоматического пуска высоконапорной насосной станции. В результате автоматизации, время пуска станции сократилось с 40 до 15-20 минут, что вызвало уменьшение годового расхода электроэнергии на 21% и сокращение потерь добычи угля на 12% .

#### **Список источников.**

1. Основы управления гидроэнерготранспортными системами угольных шахт/ Груба В.И., Никулин Э.К., Оголобченко А.С., Папаяни Ф.А. - Донецк: Донбасс, 1993.-225с.

2. Никулин Э.К., Оголобченко А.С. Математическая модель двухфазных потоков жидкости в вертикальных трубопроводах: Известия Донецкого горного института. - Донецк: ДонГТУ, 1998.-115с. (с.100-104).