

**АЛИ МУНЗЕР СУЛЕЙМАН**, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>

E-mail: munzer@yandex.ru

**БЕГЛЯРОВ ДАВИД СУРЕНОВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

**БЕКИШЕВ БОРИС ТИМОФЕЕВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

**ГРЕКОВ ДМИТРИИ МИХАЙЛОВИЧ**, канд. техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

<sup>2</sup> ОАО «Институт Гидропроект», Волоколамское шоссе, 2, Москва, 125993, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕШТАТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

Провели анализ воздействия волновых процессов при переходных и аварийных режимах работы гидросистемы, которые неизбежно приводят к снижению прочностных пределов трубопроводов, накоплению усталости металла, особенно в местах, являющихся концентраторами усталостных напряжений металла, что увеличивает вероятность аварий с порывами трубопроводов. Дали обоснование необходимости моделирования вероятных аварийных ситуаций работы насосов в системе водоподачи с целью установления возможности применению современных методов расчетов переходных процессов в насосных станциях систем водоснабжения. По результатам моделирования установили, что на напорном трубопроводе системы водоснабжения при аварийном отключении насоса высока вероятность разрыва сплошности потока воды. Рассчитали, что установка на напорном трубопроводе стабилизатора давления СДТ 16-100 с одной демпфирующей камерой в непосредственной к насосу, обратным клапанам и запорным задвижкам водоводов (источникам возмущения), позволит снизить амплитуды колебаний давления в системе водоснабжения в 2,5...2,6 раза и привести к более быстрому затуханию волновых процессов за счет изменения знакопеременных ударных нагрузок на более плавные, растянутые во времени. Установили, что противоаварийная защита системы водоснабжения с использованием технологии волновой стабилизации давления позволит защитить трубопроводные магистрали от порывов при возникновении аварийных ситуаций; обеспечить экономию электроэнергии за счет снижения аварийности на трубопроводах и повысить бесперебойность оказания услуг населению и предприятиям по водоснабжению.

**Ключевые слова:** насосный агрегат, напорный трубопровод, стабилизатор давления, переходные процессы, скорость распространения ударной волны, гидроудар.

Согласно эксплуатационному опыту, причинами разрушения трубопроводов в 60% случаев являются: гидравлический удар, перепады давления и вибрации. По данным Минрегионразвития РФ уровень износа коммунальных сетей и оборудования в среднем составляет 65%, только на трубопроводных системах жилищно-коммунального комплекса России происходит 70 аварий на 100 км водопроводов и сетей канализации. Во время переходного процесса, т.е. неустановившегося движения жидкости из-за изменения сечения трубопровода, вызванного перекрытием сечения трубопровода или его открытием, остановкой и пуском насосного агрегата и других элементов трубопроводной системы, сбросом давления и т.д., изменяется скорость движения жидкости, в результате этих процессов возникают волны повышенного и пониженного давления.

**Цель исследований** – анализ воздействия волновых процессов при переходных и аварийных режимах работы гидросистемы; обоснование необходимости моделирования вероятных аварийных ситуаций работы насосов в системе водоподачи с целью установления возможности применению современных методов расчетов переходных процессов в насосных станциях систем водоснабжения.

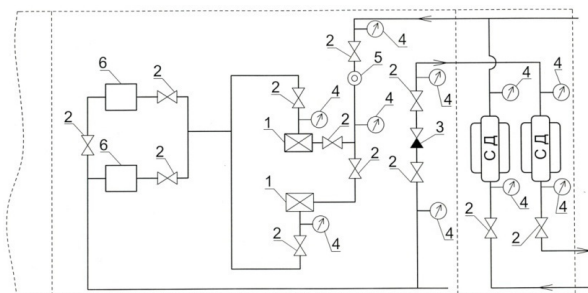
**Материалы и методы.** В процессе анализа конструктивно-технологических особенностей гидросистемы станции г. Москва Троице-Лыково «Сосновка-4» (рис. 1), а также консультаций с эксплуатирующим их персоналом специалистами ООО «ЭКОВЭЙВ Технологии» было установлено, что:

1. Повышение надёжности работы гидросистемы и обеспечение ее безаварийного функционирования во многом определяется гидравлическими

режимами работы, а также устойчивостью трубопроводов к возможным резким возмущениям волнового характера, возникающим при аварийной остановке насосов.

2. Аварийные отключения электропитания и работающих перекачивающих насосов приводят к возникновению гидроударов в трубопроводах.

3. При эксплуатации насосных станций воздействие волновых процессов на переходных и аварийных режимах работы гидросистемы неизбежно приводит к снижению прочностных пределов трубопроводов, накоплению усталости металла, особенно в местах, являющихся концентраторами усталостных напряжений (сварные швы, задиры и т.д.) металла, что увеличивает вероятность аварий с порывами трубопроводов.



**Рис. 1. Схема основных элементов станции с установленными стабилизаторами давления:**  
 1 – насос циркуляционный; 2 – вентиль запорный проходной; 3 – клапан обратный проходной;  
 4 – манометр; 5 – фильтр-грязевик;  
 6 – теплообменник

Исследование моделирования вероятных аварийных ситуаций работы насосов в системе водоподачи проводилось с целью установления возможности применения современных методов расчетов переходных процессов с данной насосной станцией.

Для нахождения максимальных амплитуд колебаний давления и расхода в гидросистеме на нештатных режимах воспользуемся известными классическими волновыми уравнениями, которые без учета затухания, вследствие трения и наличия местных сопротивлений, принимают вид системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial G}{\partial t} \cdot \frac{1}{F} \\ \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial t} \cdot \frac{c^2}{F} \end{cases} \quad (1)$$

где  $P$  – давление, н/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $G = \rho \cdot v \cdot F$  – массовый расход жидкости, кг/сек.;  $\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – скорость движения жидкости в трубопроводе;  $x, t$  – соответственно координата оси трубопровода и время;  $c$  – скорость распространения волны (скорость звука) в трубопроводе, м/сек.

Скорость распространения волн давления рассчитывается по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{E} = \frac{1-\beta}{K} + \frac{\beta}{P} + \frac{D}{\delta \cdot E_0}} \quad (2)$$

где  $\beta$  – доля (объемная) нерастворенного воздуха в воде (в данном случае было принято равным  $\beta = 0$ );  $\rho$  – плотность смеси вода-воздух ( $\rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ );  $E$  – модуль Юнга для смеси вода-воздух с поправкой на упругость труб;  $K$  – модуль объемного сжатия воды при отсутствии нерастворенного воздуха ( $K = 2,13 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ );  $D$  – диаметр трубы;  $\delta$  – толщина стенки трубы;  $E_0$  – модуль Юнга упругости материалов трубы ( $E_0 = E_{\text{стали}} = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ).

**Результаты и обсуждение.** Решение системы (1) представлено в форме интеграла Даламбера, справедливого для движения без затухания. Начало координат поместим у открытого конца, а ось  $x$  направим против потока к источнику возмущения. При этом в системе изменяется знак [2]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot v) \\ \frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v) \end{cases} \quad (3)$$

Формулы для  $\rho \cdot v$  и  $P$  примут вид:

$$(\rho \cdot v) = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (4)$$

$$P = c \left[ -f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \right] \quad (5)$$

При  $x = 0$  и  $P = 0$ :  $f_1(t) = f_2(t)$ . Пусть в сечении  $x = l$ , где расположен источник возмущения, известен закон изменения массовой скорости:

$$x = l, \rho \cdot v = \varphi(t), \varphi(t) = 0 \text{ при } t \leq 0.$$

$$\text{Обозначим } f_2\left(t + \frac{l}{c}\right) = \varphi(t),$$

тогда в сечении  $x = l$ :  $\rho \cdot v = \varphi(t) = \varphi(t) + \varphi(t - T_0)$ ,

где  $T_0 = \frac{2l}{c}$  – фаза гидравлического удара.

Давление в сечении  $x = l$  есть разность тех же волн  $\varphi(t)$  и  $\varphi(t - T_0)$ :

$$P = c [\varphi(t) - \varphi(t - T_0)], \quad (6)$$

где  $\varphi(t - T_0) = 0$  при  $0 < t < T_0$ .

Это обстоятельство позволяет аналитически или графически построить функцию  $\varphi(t)$  и  $\varphi(t - T_0)$  по известной величине  $\rho \cdot v$  источника возмущения для последующих моментов времени по схеме, указанной в таблице.

## Определение давления у источника возмущения

№ интервалов	Интервалы времени с начала пуска	Значения функций $\varphi(t)$ и $\varphi(t - T_0)$	Давление у источника возмущения
1	$0 < t < T_0$	$\varphi_1(t) = (\rho \cdot v)_1$ $\varphi_1(t - T_0) = 0$	$P_1 = c (\rho \cdot v)_1$
2	$T_0 < t < 2T_0$	$\varphi_2(t - T_0) = \varphi_1(t) = (\rho \cdot v)_1$ $\varphi_2(t) = (\rho \cdot v)_2 - (\rho \cdot v)_1$	$P_2 = c [(\rho \cdot v)_2 - 2(\rho \cdot v)_1]$
3	$2T_0 < t < 3T_0$	$\varphi_3(t - T_0) = \varphi_2(t) = (\rho \cdot v)_2 - (\rho \cdot v)_1$ $\varphi_3(t) = (\rho \cdot v)_2 - (\rho \cdot v)_1$ $\varphi_3(t) = (\rho \cdot v)_3 - (\rho \cdot v)_2 + (\rho \cdot v)_1$	$P_3 = c [(\rho \cdot v)_3 - 2(\rho \cdot v)_2 + 2(\rho \cdot v)_1]$
4	$(n - 1)T_0 < t < nT_0$	$\varphi_n(t - T_0) = \varphi_{n-1}(t) = (\rho \cdot v)_{n-1} - (\rho \cdot v)_{n-2} + (\rho \cdot v)_{n-3} \dots$ $\varphi_n(t) = (\rho \cdot v)_n - (\rho \cdot v)_{n-1} + (\rho \cdot v)_{n-2} - (\rho \cdot v)_{n-3} \dots$	$P_n = c [(\rho \cdot v)_n - 2(\rho \cdot v)_{n-1} + 2(\rho \cdot v)_{n-2} \dots]$

Здесь обозначены:  $(\rho \cdot v)_1, (\rho \cdot v)_2, \dots, (\rho \cdot v)_n$  – значения массовой скорости у насоса в моменте времени  $t, t + T_0, t + 2T_0, \dots, t + (n - 1)T_0$ ;  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  – значения волн в то же моменты;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – значения давления в то же моменты [3]. Например, пусть расход изменяется по линейному закону за время  $t_{\text{вых}}$ , тогда:

$$n = \text{enter} \frac{t_{\text{вых}}}{T_0}, \quad (7)$$

$$P_n = \begin{cases} c\Delta(\rho \cdot v) & \text{при } n = 2, 4, 6, \dots, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Delta(\rho \cdot v) = \frac{\rho \cdot v}{n} \approx \frac{\rho \cdot v \cdot T_0}{t_{\text{вых}}}$  (при большом  $n$ ).

Таким образом:  $P_{\text{max}} \approx \frac{c\rho v 2l}{ct_{\text{вых}}} = \frac{c\rho v T_0}{t_{\text{вых}}}$  (т.е. совпадает с формулой Мишо).

Если  $t_{\text{вых}} \leq T_0$ , то  $P_{\text{max}} = c\rho v$ . При аварийной остановке насосов в напорном трубопроводе возникает волна пониженного давления, которая распространяется по гидросистеме к потребителям. При наличии водоразбора она отражается от узлов разбора воды с обратным знаком, т.е. давление в отраженной волне равно статическому. Если, дойдя до насосной станции, она встречает закрытый обратный клапан, то отражается от него, и давление в гидросистеме увеличивается на величину провала, возникшего после остановки насосного агрегата, т.е. происходит гидроудар. Возникшие колебания давления затем в течение определенного времени постепенно затухают.

В качестве вероятной нештатной (аварийной) ситуации рассматривалось аварийное отключение работающих насосов и нештатная работа задвижки при запуске насоса [4].

Параметрические характеристики средств гашения волновых и вибрационных процессов – стабилизаторов давления (СД) (рис. 2), их конфигурации и места монтажа определяются на основании расчетно-экспериментальных исследований гидравлических режимов гидросистемы и ее параметрических особенностей, с учетом особенностей компоновки оборудования и трубной обвязкой гидросистемы.

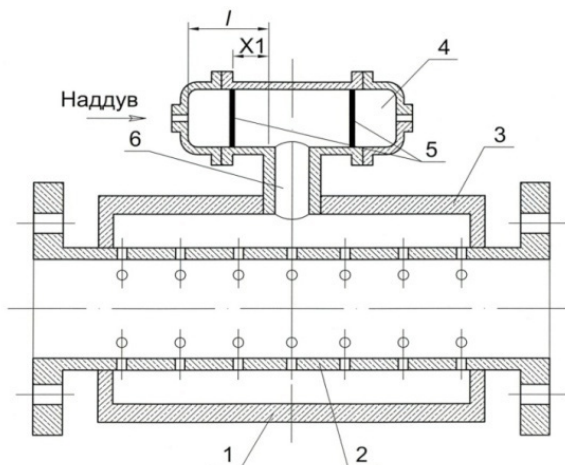


Рис. 2. Расчетная схема стабилизатор с выносными камерами: 1 – корпус стабилизатор; 2 – перфорированный трубопровод; 3 – жидкостная полость; 4 – газовая полость; 5 – разделительные элементы; 6 – патрубок

Результаты моделирования гидроудара со стабилизатором и без него показаны на рисунке 3.

По результатом моделирования было установлено, что на напорном трубопроводе системы водоснабжения при аварийном отключении насоса высока вероятность разрыва сплошности потока

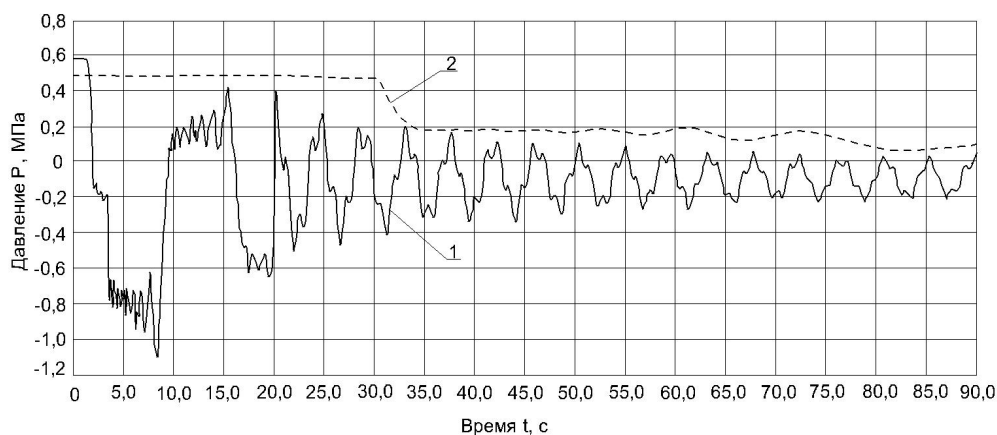


Рис. 3. Моделирование гидроудара на напорном трубопроводе системы водоснабжения аварийном отключении насоса: 1 – при установленных СД; 2 – без СД

воды. При «схлопывании» возможны гидроудары с амплитудой 16...17 бар.

Расчеты показывают, что установка на напорном трубопроводе стабилизатора давления «ЭКО-ВЭЙВ» СДТ 16-100 с одной демпфирующей камерой в непосредственной к насосу, обратным клапанам и запорным задвижкам водоводов (источникам возмущения) позволит снизить амплитуды колебаний давления в системе водоснабжения в 2,5...2,6 раза и привести к более быстрому затуханию волновых процессов за счет изменения знакопеременных ударных нагрузок на более плавные, растянутые во времени.

**Выводы.** Противоаварийная защита системы водоснабжения г. Троице-Лыково «Сосновка-4» с использованием технологии волновой стабилизации давления «ЭКОВЭЙВ» позволит:

1. Защитить трубопроводные магистрали от порывов при возникновении аварийных ситуаций
2. Обеспечить экономию электроэнергии за счет снижения аварийности на трубопроводах
3. Повысить бесперебойность оказания услуг населению и предприятиям по водоснабжению.

#### Библиографический список

1. Бегляров Д.С., Али М.С. Исследования переходных процессов в напорных коммуникациях насосных станций с осевыми насосами при пуске агрегатов // Журнал «Природообустройство». М., 2015. № 3. С. 74–78.
2. Бегляров Д.С., Концевич И.А., Козлова М.С., Лентяева Е.А. Методика расчетов переходных процессов в напорных системах водоподачи с насосными станциями // Сборник научных трудов «Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России». М., 2005. С. 47–53.
3. Ганчев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах. М.: МГТУ имени Баумана, 1996. 260 с.
4. Карамбирев С.Н. Новые подходы в моделировании и оптимизации трубопроводных систем. Основы, концепции, методы. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 355 с.

Статья поступила 12.02.2016

## ANALYZING NON-STATIONARY PROCESSES IN ABNORMAL OPERATION MODE OF PUMP STATIONS

**MUNZER S. ALI**, PhD (Eng), Associate Professor<sup>1</sup>  
E-mail: munzer@yandex.ru

**DAVID S. BEGLYAROV**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

**BORIS T. BEKISHEV**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

**DMITRY M. GREKOV**, PhD (Eng)<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC "Hydroproject Institute", Volokolamskoye sh., 2, Moscow, 125993, Russian Federation

The paper analyzes the impact of wave processes in transitional and emergency operation modes of hydraulic systems, which will inevitably result in lowered strength limits of pipelines, the accumulation of metal fatigue, especially in concentrating points of metal fatigue stresses resulting in increased probability of accidents with pipeline breaks. The paper justifies the necessity of simulating possible emergency situations of pumps applied in a water supply system in order to establish a possibility of using modern calculating methods of transient processes in pumping stations of water supply systems. The simulation results have demonstrated that the discharge line of a water supply system is highly probable to feature discontinuity of water flow in case of the pump emergency shutdown. The calculations show that the installation of a discharge line pressure stabilizer under the brand SDT 16-100 with one dampening camera directly on the pump, the check valve and the water line gate valves (the sources of disturbances), will reduce the amplitude of pressure fluctuations in the water supply system at 2.5-2.6 times and lead to a more rapid attenuation of the wave processes by changing alternating shock loads into smoother time-expanded ones. The authors have stated that water supply system emergency protection based on wave stabilization technology will protect the pipelines from breaks in case of emergencies; provide energy savings by reducing accidents in pipelines and enhance the continuity of supplying population and enterprises with water.

**Key words:** pump aggregate, pressure pipeline, pressure stabilizer, transient processes, shock wave propagation velocity, hydraulic impact.

### References

1. Beglyarov D.S., Ali M.S. Issledovaniya perekhodnykh protsessov v napornykh kommunikatsiyakh nasosnykh stantsiy s osevmi nasosami pri puske agregatov [Studying transitional processes in pressure communications of pumping plants with axial flow pumps during the starting up of the units] // Prirodoobustroistvo [Environment Engineering] Journal, 2015. № 3. Pp. 74–78.

2. Beglyarov D.S., Kontsevich I.A., Kozlov M.S., Lentayeva E.A. Metodika raschetov perekhodnykh protsessov v napornykh sistemakh vodopodachi s nasosnymi stantsiyami [Methods of calculating transient processes in pressured water delivery systems

based on pumping stations] // Collection of scientific papers. Environmental engineering and environmental management as necessary conditions of social-and-economic development of Russia. M., 2005. Pp. 47–53.

3. Ganchev R.F., Nizamov Kh.N., Derbukov Ye.I. Volnovaya stabilizatsiya i preduprezhdenie avariyn na truboprovodakh [Wave stabilization and accident prevention on pipelines]. M.: Bauman MSTU, 1996. 260 p.

4. Karambirov S.N. Novye podkhody v modelirovanii i optimizatsii truboprovodnykh sistem. Osnovy, kontseptsii, metody [New approaches to modeling and optimization of pipeline systems. Fundamentals, concepts, methodology]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 355 p.

*Received on February 12, 2016*