УДК 502/504 : 532.5

Д. С. БЕГЛЯРОВ, Д. М. ГРЕКОВ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СТАБИЛИЗАТОРЕ ДАВЛЕНИЯ С ВЫНОСНЫМИ КАМЕРАМИ

Рассмотрены математические модели стабилизаторов давления: линейная и нелинейная. В линейной модели стабилизатора давления рассмотрены свободные колебания жидкости и апериодическое движение жидкости.

Переходные процессы, стабилизаторы давления, пневмостабилизаторы, гидравлический удар, математическая модель.

Various mathematical models of pressure stabilizers are considered: linear and non-linear. In the linear model of pressure stabilizer there are considered free liquid fluctuations and an aperiodic liquid motion.

Transient processes, pressure stabilizers, pneumatic stabilizers, hydraulic impact, mathematical model.

Опыт эксплуатации современных систем централизованного водоснабжения показал, что вследствие изменения работы насосных станций в отдельные периоды в трубопроводах возникают резкие колебания давления, которые приводят к разрушениям сети, выходу из строя трубопроводной арматуры и насосов.

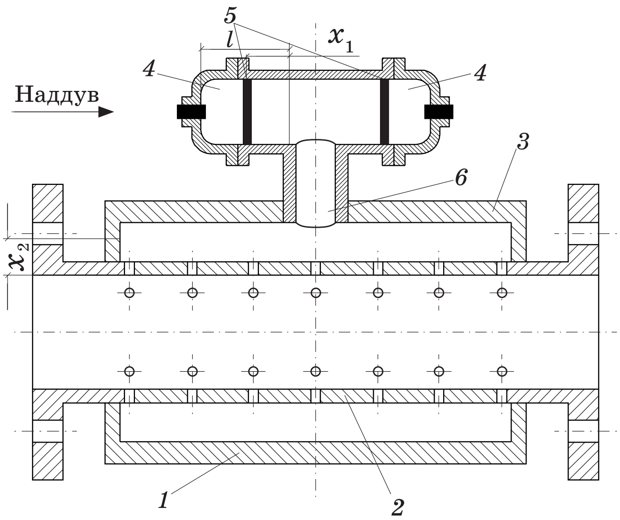
В настоящей статье представлена разработка основ расчетного обоснования напорных систем водоподачи, позволяющая применять стабилизаторы давления для защиты напорных коммуникаций станций от недопустимого повышения давления при переходных процессах.

Для повышения качества конструкции стабилизаторов давления необходимо разработать модель движения жидкости в них. Она служит для определения конечных параметров стабилизатора давления.

Пневмостабилизаторы предназначены для гашения пульсаций давления в трубопроводах, вызванных изменением режима работы насосного агрегата или трубопроводной арматуры.

Пневмостабилизатор состоит из жидкостной и газовой полостей, разделенных упругой мембраной или иным упругим элементом.

Элементарная схема стабилизатора представлена на рисунке.



Стабилизатор с выносными камерами: *1* – корпус стабилизатора; *2* – перфорированный трубопровод; *3* – жидкостная полость; *4* – газовые полости; *5* – разделительные элементы; *6* – патрубок; l – длина воздушной камеры в начальный момент времени; x_1– смещение разделительного элемента; x_2– смещение жидкости в жидкостной камере

Примем приведенную схему стабилизатора в качестве расчетной схемы и на ее основе рассмотрим движение жидкости в жидкостной камере.

В исходном состоянии в газовой камере создается давление p_0, уравновешивающее давление в трубопроводе, а разделительные элементы находятся в положении, принятом в качестве начального: $x_1 = 0$.

Процессы сжатия–расширения воздуха в газовой полости считаются изотермическими, следовательно, состояние воздуха определяется уравнением

$$p_0 V_0 = \mathrm{const} = C', \tag{1}$$

где p_0 – давление в начальный момент.

Объем газовой полости:

$$V_0 = \ell S_{\text{р}}, \tag{2}$$

где $S_{\text{р}}$ – площадь поверхности разделительного элемента, равная площади поперечного сечения газовой полости; ℓ – длина газовой камеры.

Подставив (2) в (1), получим:

$$C' = p_0 \ell S_{\text{р}}. \tag{3}$$

Как только давление в трубопроводе повышается, в жидкостную камеру поступает количество воды, смещающее уже имеющийся объем воды на x_2, а разделительные элементы на величину x_1 (см. рисунок). Объем газовой камеры уменьшится, давление воздуха повысится и возникнет сила, противодействующая дальнейшему смещению разделительных элементов.

После сжатия объем газовой полости станет равным

$$V = \left(\ell - x_1\right) S_{\text{р}},$$

где V – объем газовой полости после сжатия.

Газ сжимается изотермически, поэтому с учетом (3) имеем:

$$pV = p\left(\ell - x_1\right) S_{\text{р}} = p_0 \ell S_{\text{р}},$$

где p – давление сжатия газовой полости.

Отсюда

$$p = \frac{p_0 \ell}{\ell - x_1}. \tag{4}$$

Тогда упругая сила, с которой газ в полости стремится вернуть разделительный элемент в положение равновесия, равна

$$F_{\text{упр}} = (p - p_0) S_{\text{р}} = \left(\frac{p_0 \ell}{\ell - x_1} - p_0\right) S_{\text{р}} =$$

$$= \left(\frac{\ell}{\ell - x_1} - 1\right) p_0 S_{\text{р}} = \frac{C_1}{\ell - x_1} x_1.$$

Здесь

$$C_1 = p_0 S_{\text{р}}$$

является константой состояния воздуха в газовой полости.

Для $n_{\text{гп}}$ газовых полостей

$$F_{\text{упр}} = \frac{n_{\text{гп}} C_1 x_1}{\ell - x_1}. \tag{5}$$

Если разделительный элемент с жесткостью C_2 связан упруго с корпусом газовой полости, то выражение для упругой силы примет следующий вид:

$$F_{\text{упр}} = n_{\text{гп}} \left(p - p_0\right) S_{\text{р}} = n_{\text{гп}} C_2 x_1 + \frac{n_{\text{гп}} C_1 x_1}{\ell - x_1} = n_{\text{гп}} \left(C_2 + \frac{C_1}{\ell - x_1}\right) x_1. \tag{6}$$

В рассматриваемом случае $n = 2$. Таким образом, газовая камера в совокупности с разделительным элементом играет в стабилизаторе роль упругого элемента. Движение жидкости через перфорационные отверстия сопровождается диссипацией кинетической энергии, и жидкость будет испытывать сопротивление своему движению.

Если отверстие одно, то сила сопротивления перфорации $F_{\text{пер}}$ вычисляется по формуле

$$F_{\text{пер}} = s_{\text{пер}} Q_{\text{пер}}^2 = s_{\text{пер}} \omega_{\text{пер}}^2 \nu_{\text{пер}}^2, \tag{7}$$

где $s_{\text{пер}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $Q_{\text{пер}}$ – расход жидкости через перфорационное отверстие; $\omega_{\text{пер}}$ – площадь одного отверстия; $\nu_{\text{пер}}$ – средняя по сечению отверстия скорость течения.

Положим, что число перфорационных отверстий равно $n_{\text{пер}} > 1$, они одинаковы, расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга, и вытекающие из них струйки жидкости не взаимодействуют друг с другом.

В этом случае формула для $F_{\text{пер}}$ примет следующий вид:

$$F_{\text{пер}} = n_{\text{пер}} s_{\text{пер}} \omega_{\text{пер}}^2 \nu_{\text{пер}}^2. \tag{8}$$

Кроме того, роль диссипативного элемента играет также и патрубок, который соединяет две части жидкостной полости. Сила гидравлического сопротивления патрубка

$$F_{\text{пат}} = s_{\text{пат}} \omega_{\text{пат}}^2 \nu_{\text{пат}}^2,$$

где $s_{\text{пат}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\omega_{\text{пат}}$ – площадь патрубка; $\nu_{\text{пат}}$ – средняя по сечению патрубка скорость течения.

При числе патрубков $n_{\text{пат}}$

$$F_{\text{пат}} = n_{\text{пат}} s_{\text{пат}} \omega_{\text{пат}}^2 \nu_{\text{пат}}^2, \tag{9}$$

где $n_{\text{пат}}$ – число патрубков.

В общем случае масса (и объем) жидкости, движущейся в стабилизаторе, будет величиной переменной. Для вывода уравнения движения нельзя применить напрямую закон изменения импульса или принцип Даламбера.

В качестве допущения примем, что в результате оттока и притока жидкости через перфорационные отверстия положения разделительных элементов относительно начального равновесного положения будут незначительными. Следовательно, можно пренебречь изменением массы жидкости в жидкостной полости и допустить, что масса жидкости является величиной постоянной.

Тогда, в соответствии с принципом Даламбера, уравнение движения жидкости в жидкостной полости примет следующий вид:

$$F_{\text{упр}} + F_{\text{пер}} + F_{\text{пат}} = -m\frac{d^2x_2}{dt^2}, \tag{10}$$

где x_2 – смещение массы жидкости от положения равновесия; m – масса жидкости в жидкостной полости.

Подставив в (8) выражения для $F_{\text{упр}}$ и $F_{\text{пер}}$ из (4) и (5) и (6), приведем уравнение движения жидкости к следующему виду:

$$m\frac{d^2x_2}{dt^2} + n_{\text{пер}}s_{\text{пер}}\omega_{\text{пер}}^2\nu_{\text{пер}}^2 + n_{\text{пат}}s_{\text{пат}}\omega_{\text{пат}}^2\nu_{\text{пат}}^2 +$$
$$+ n_{\text{гп}}\left(C_2 + \frac{C_1}{\ell - x_1}\right)x_1 = 0.$$

За время Δt через $n_{\text{пер}}$ перфорационных отверстий протечет объем жидкости, равный

$$\Delta W = n_{\text{пер}}\omega_{\text{пер}}\nu_{\text{пер}}\Delta t = 2\pi RL\Delta x_2, \tag{11}$$

где R – радиус трубопровода; L – длина стабилизатора.

Отсюда

$$\nu_{\text{пер}} = \frac{2\pi RL}{n_{\text{пер}}\omega_{\text{пер}}}\frac{\Delta x_2}{\Delta t} = \frac{2\pi RL}{n_{\text{пер}}\omega_{\text{пер}}}\frac{dx_2}{dt}.$$

Применительно к патрубку равенство (9) примет следующий вид:

$$n_{\text{пат}}\omega_{\text{пат}}\nu_{\text{пат}}\Delta t = 2\pi RL\Delta x_2.$$

Отсюда

$$\nu_{\text{пат}} = \frac{2\pi RL}{n_{\text{пат}}\omega_{\text{пат}}}\frac{\Delta x_2}{\Delta t} = \frac{2\pi RL}{n_{\text{пат}}\omega_{\text{пат}}}\frac{dx_2}{dt},$$

где $\omega_{\text{пат}}$ и $\nu_{\text{пат}}$ – площадь поперечного сечения патрубка и средняя по сечению скорость движения жидкости по патрубку соответственно.

Подставив (10) и (11) в (7), получим:

$$m\frac{d^2x_2}{dt^2} + 4(\pi RL)^2\left(\frac{s_{\text{пер}}}{n_{\text{пер}}} + \frac{s_{\text{пат}}}{n_{\text{пат}}}\right)\left(\frac{dx_2}{dt}\right)^2 +$$
$$+ n_{\text{гп}}\left(C_2 + \frac{C_1}{\ell - x_1}\right)x_1 = 0.$$

Для учета знака первой производной (скорости движения) во втором члене перепишем полученное:

$$m\frac{d^2x_2}{dt^2} + 4(\pi RL)^2\left(\frac{s_{\text{пер}}}{n_{\text{пер}}} + \frac{s_{\text{пат}}}{n_{\text{пат}}}\right)\left|\frac{dx_2}{dt}\right|\frac{dx_2}{dt} +$$
$$+ n_{\text{гп}}\left(C_2 + \frac{C_1}{\ell - x_1}\right)x_1 = 0. \tag{12}$$

Объем жидкости, перетекший из трубопровода в стабилизатор, далее перетекает через патрубок в ту часть жидкостной полости, которая примыкает к разделительным элементам и смещает их. Из условия сохранения массы имеем:

$$2\pi RL\Delta x_2 = n_{\text{гп}}S_{\text{р}}\Delta x_1. \tag{13}$$

Так как коэффициенты при Δx_2 и Δx_1 величины постоянные, то вместо (13) имеем:

$$2\pi RLx_2 = n_{\text{гп}}S_{\text{р}}x_1.$$

Отсюда

$$x_1 = \frac{2\pi RL}{n_{\text{гп}}S_{\text{р}}}x_2. \tag{14}$$

Подставив (14) в (12) и поделив (12) на m, получим уравнение движения жидкости в стабилизаторе:

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} + \frac{4(\pi RL)^2}{m}\left(\frac{s_{\text{пер}}}{n_{\text{пер}}} + \frac{s_{\text{пат}}}{n_{\text{пат}}}\right)\left|\frac{dx_2}{dt}\right|\left(\frac{dx_2}{dt}\right) +$$
$$+ \frac{2\pi RL}{S_{\text{р}}m}\left(C_2 + \frac{C_1}{\ell - \frac{2\pi RL}{n_{\text{гп}}S_{\text{р}}}x_2}\right)x_2 = 0. \tag{15}$$

Получено уравнение движения жидкости в стабилизаторе давления с выносными камерами.

Выводы

При выводе формулы (15) были сделаны следующие допущения:

изменение положения разделительных элементов относительно начального равновесного положения незначительно;

масса жидкости в жидкостной полости является постоянной величиной;

процесс сжатия и расширения в газовой полости принят изотермическим.

1. **Аршеневский Н. Н., Поспелов Б. Б.** Переходные процессы в крупных насосных станциях. – М.: Энергия, 1980. – 111 с.

2. **Роскин А. Б.** Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 02 (42).

3. **Ганиев Р. Ф., Низамов Х. Н., Дербуков Е. И.** Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – 260 с.

Материал поступил в редакцию 25.05.11.

***Бегляров Давид Суренович**, доктор технических наук, профессор*
***Греков Дмитрий Михайлович**, аспирант*
Тел. 8(499)976-11-85

УДК 502/504:627.13

М. А. ВОЛЫНОВ

Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. А. Костякова

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

В статье анализируются известные эмпирические зависимости разных авторов, описывающие взаимосвязь основных гидравлических параметров потоков в открытых саморегулирующихся руслах. Показано, что коэффициент C в формуле для средней скорости Шези зависит только от уклона дна русла и может определиться без использования в расчетах понятия «шероховатость русла».

Расход, средняя скорость, глубина потока, формула Шези, коэффициент Шези, уклон дна, гранулометрический состав донного грунта, шероховатость, ширина русла.

The well known empirical dependencies of different authors are analyzed which describe the relationship of flow main hydraulic parameters in open self-regulating beds. It is shown that in the Chezy formula for an average velocity the factor C depends only on the river bed's slope and in estimations it can be determined without usage of the concept "river bed's roughness".

Discharge, average velocity, depth of the flow, Chezy formula, Chezy factor, bed slope, granulometric composition of the bed ground, roughness, depth of the river bed.

Основной вопрос, который возникает при исследовании течений в открытых руслах, состоит в определении проходящего расхода или средней скорости (при заданном уклоне и наполнении). Там, где это возможно, расход определяется путем измерения скоростей в отдельных точках живого сечения потока. Во многих случаях расход приходится находить расчетом посредством определения средней скорости.

Для искусственных каналов с помощью полуэмпирической теории турбулентности ранее была получена зависимость для определения коэффициента C в формуле Шези $V = C\sqrt{Ri}$ в следующем виде [1]:

$$C = 20\lg\left[R\Big/\left(E + 0{,}004\big/\sqrt{Ri}\right)\right], \text{м}^{1/2}/\text{с} \qquad (1)$$

где R – гидравлический радиус, мм; E – приведенная местная шероховатость, мм (величина, пропорциональная средней высоте выступов); i – уклон дна русла.

Формула (1) представляет собой обобщенную зависимость, действующую во всей области турбулентного течения и хорошо подтвердившуюся многочисленными опытными данными [1–3].