

## Динамика конструкций и сооружений

### КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ С МЕМБРАННО – СБРАСЫВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Ф.В. РЕКАЧ, канд. техн. наук, доцент  
Российский университет дружбы народов,  
117198, Москва, ГСП – 6, ул. Миклухо-Маклая, 6

*В статье приведен расчет неуставившегося движения жидкости при гидроударе и влиянии мембранно – сбрасывающего устройства на колебания в цилиндрических оболочках.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мембранно – сбрасывающее устройство, колебания.

Одним из эффективных способов борьбы с резким повышением давления, возникающей в трубопроводной системе вследствие гидроудара, аварийных ситуаций, срабатывания запорной арматуры и т.д. является стабилизатор давления (описанный в [1]), а при больших размерах трубопроводной системы - воздушный колпак, расчет системы с воздушным колпаком приведен в [2]. Однако, для протяженных трубопроводах с большими диаметрами, объем воздушного колпака для эффективного снижения давления может оказаться настолько велик, что его применение станет экономически неэффективным. В этой ситуации, если возможен сброс жидкости в атмосферу или резервуар, может оказаться выгодным применение устройства, сбрасывающее жидкость.

Одной из разновидностей данного устройства является мембранно – сбрасывающее устройство (МСУ). Жесткая мембрана настроена таким образом, что при давлениях, не превышающих давления при стационарном режиме  $p_{CT}$  не происходит сброс жидкости из трубопроводной системы, в случае превышения заданного давления над  $p_{CT}$ , мембрана перемещается и происходит истечение жидкости.

Завод – изготовитель в паспорте МСУ приводит следующие параметры работы устройства:  $t_{CM}$  – минимальное время, за которое мембрана успевает открыться полностью;  $d_M$  – диаметр мембраны;  $Q_M$  – расход истечения жидкости при напоре  $H_M$  при  $h_M = 0$ , где  $h_M$  - превышение напора над напором при стационарном режиме  $H_{CT}$ , не вызывающее открытие мембраны,  $h_M = 0 - 20$  м; параметр  $h_M$  можно регулировать при установке мембраны МСУ.

Для расчетной модели примем следующие гипотезы: **I.** Гидравлическое сопротивление  $\zeta_M$  МСУ при открытой полностью мембране считается постоянным. **II.** Расход оттока жидкости увеличивается от 0 до  $Q_{OT}$  за время  $t_{CM}$  по квадратичному закону. **III.** При падении напора ниже  $H_{CT}$  устройство закрывается мгновенно. Согласно формулам гидравлики,

$$H_M = \zeta_M \frac{v_M^2}{2g} = \zeta_M \frac{(Q_M/\omega_M)^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $v_M$  – средняя скорость истечения жидкости через мембрану,  $\omega_M = \pi d_M^2 / 4$ .

Следовательно, 
$$\zeta_M = \frac{2H_M g}{(Q_M / d_M)^2} = const. \quad (2)$$

Опираясь на гипотезу II (см. (1)), имеем  $Q_{OT} = a_M \sqrt{2gH_P \omega_M^2 / \zeta_M}$ , где  $H_P = \Delta H - h_M$  ( $\Delta H$  – разность напоров в трубопроводе и внешней среде),

$$a_M = \begin{cases} (t/t_{CM})^2 & \text{при } t < t_{CM}, \\ 1 & \text{при } t \geq t_{CM}. \end{cases}$$

Время  $t$  отсчитывается с момента начала открытия МСУ. Если в момент времени  $t_0$   $H_P < H_{CT}$ , то мембрана мгновенно закрывается.

Расчет трубопроводной схемы, включающей мембранно – сбрасывающее устройство (рис.1) проводился численным методом характеристик, описанным в [2]. В качестве основных характеристик потока приняты расход  $Q = F \cdot v$  и гидродинамический напор  $H$  (выраженный в метрах водяного столба), где  $F$  – площадь поперечного сечения трубы [ $м^2$ ],  $v$  – средняя по живому сечению скорость потока [ $м/сек$ ]. Уравнения движения и скорости потока несжимаемой жидкости при этом имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( gFz + gFH + \frac{Q^2}{2F} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\zeta}{2DF} Q|Q| = 0, \quad [м^3 / сек^2] \quad (3)$$

$$\frac{Q}{F} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gF} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad [м/сек], \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $z$  – геометрическая высота;  $t$  – время;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического трения по длине;  $D$  – диаметр трубопровода;  $c$  – скорость распространения волн давления. Численный метод реализован на языке C++ (Frog14), а графическое представление – в среде MAPLE (FrGFAF). Схема численного расчета представлена на рис.1.

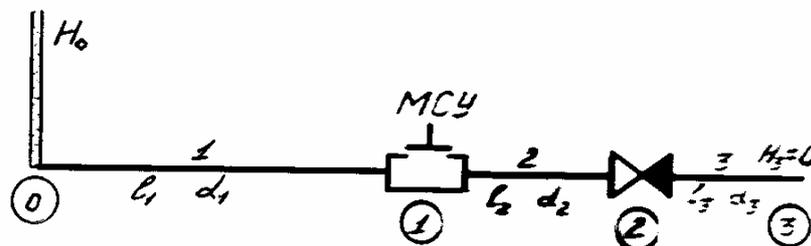


Рис.1

При стационарном режиме, вода благодаря напору  $H_0 = 10 м$  движется с постоянной скоростью от узла 0 к узлу 3. Задвижка, установленная в узле 2, при этом открыта и закрывается при  $t = 10 с$ . При развитии гидроудара мембранно – сбрасывающее устройство, установленное в узле 1, открывается и осуществляет сброс воды.

Пример. Дано:  $H_0 = 10 м$ ,  $H_3 = 0$ ,  $l_1 = 10000 м$ ,  $l_2 = 10 м$ ,  $l_3 = 10 м$ ,  $c = 1000 м/с$ ;  $d_1 = d_2 = d_3 = 1 м$ , гидравлическое сопротивление трубопроводов  $\lambda = 0.02$ ,  $H_M = 50 м$ ,  $h_M = 5 м$ ,  $d_M = 0.3$ ,  $dx = 10 м$ .

Результаты: 1. Проводилась серия расчетов с приведенными исходными данными и различным временем полного открытия мембраны  $t_{CM} = 0; 0.01; 0.5; 1; 2$  секунды. На рис. 2 показано давление  $P$  в гидравлической системе

без МСУ в узле 1. Максимальное давление составляет 1.1 МПа (110 м водного столба). На рис. 3 изображено давление при  $Q_M = 0.46 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{\text{см}} = 1 \text{ с}$ .

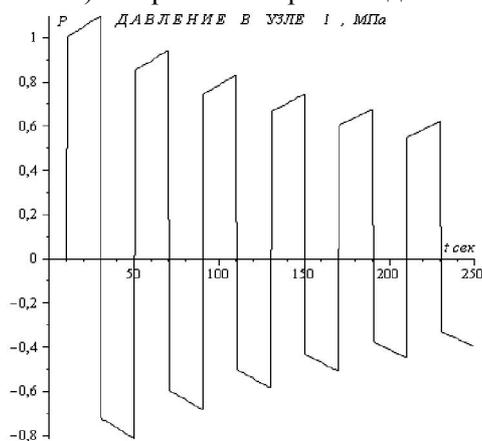


Рис.2

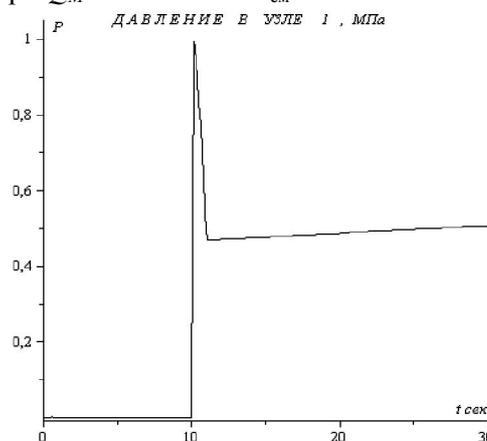


Рис.3

2. Проводилась серия расчетов при  $t_{\text{см}} = 1 \text{ с}$  и  $Q_M = 0.23; 0.345; 0.46; 0.575 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Переход к неустановившемуся движению жидкости осуществляется в момент времени  $t = 10 \text{ с}$ , когда в узле 2 мгновенно срабатывает задвижка.

#### ВЫВОДЫ:

1) Как показали численные эксперименты, мембранно – сбрасывающее устройство даже при мгновенном открытии мембраны пропускает пик повышенного давления (рис. 3), высота пика зависит от  $t_{\text{см}}$ : чем больше  $t_{\text{см}}$ , тем шире зона повышенного давления. Попытка уменьшить шаг  $dx$  до 0.5 м (при  $t_{\text{см}} = 0$ ) не привела к качественному изменению картины: пик повышенного давления остался, при значительном уменьшении шага вывода графической информации, развивался на протяжении нескольких точек.

2) При изменении  $Q_M$  величина пика повышенного давления не меняется (1 МПа), однако ступенька давления тем ниже, чем больше  $Q_M$ . При  $Q_M = 0.23 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $p_{\text{max}} = 0.74 \text{ МПа}$ ; при  $Q_M = 0.575 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $p_{\text{max}} = 0.43 \text{ МПа}$ .

3) При большом  $Q_M$  расчет не дает хороших результатов, так как из трубопровода принудительно вытекает большой расход и численное решение получает вредные осцилляции. В этом случае необходимо задавать другие граничные условия (например, давление, равное нулю в узле 1 установки МСУ).

4) Небольшой пик повышенного давления может быть снят при включении в схему стабилизатора давления небольшого объема.

#### Л и т е р а т у р а

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

2. Рекач Ф.В. Расчет колебаний в круговых цилиндрических оболочках со стабилизатором давления методом характеристик// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – №1. – С. 60-65.

#### PRESSURE OSCILLATIONS IN CIRCULAR CYLINDRICAL SHELLS WITH MEMBRANE – DISCHARGE DEVICE

F.V. Rekach

A model of membrane – discharge device is described. Analysis of pressure oscillations, depending on its parameters is given.

KEY WORDS: membrane – discharge device, oscillations.