
ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕМБРАННО-СБРАСЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ АВАРИЙНОМ ПОВЫШЕНИИ ДАВЛЕНИЯ

Ф.В. Рекач¹, Е.К. Синиченко²

¹Кафедра высшей математики
Факультет физико-математических и естественных наук

²Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Инженерный факультет

Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье приведен расчет и анализ безопасности эксплуатации трубопровода при гидравлическом ударе и влияние мембранно-сбрасывающего устройства на колебания давления в трубопроводах.

Ключевые слова: мембранно-сбрасывающее устройство, колебания.

Наиболее уязвимыми с точки зрения резкого повышения или понижения давления являются режимы, при которых происходит значительное изменение скорости потока жидкости (вплоть до остановки). Это возможно в случае аварийного срабатывания запорной арматуры, изменения параметров работы насосной станции, отключения электроэнергии и других аварийных ситуаций.

Во время переходного процесса в отдельных сечениях трубопровода, особенно на входе и выходе нагнетательной установки, изменение давления может быть столь большим, что возможно разрушение стенок трубопровода. Чтобы избежать возникновения аварийной ситуации, необходимо располагать способами и техническими средствами стабилизации давления в трубопроводе. Кроме того, наличие вредных пульсаций значительно снижает КПД и увеличивает темпы износа трубопроводных систем. Поэтому проблема создания эффективных средств гашения волновых процессов и гидравлических ударов не теряет актуальности на протяжении многих десятилетий.

Одним из эффективных способов борьбы с резким повышением давления, возникающим в трубопроводной системе вследствие гидравлического удара, аварийных ситуаций, срабатывания запорной арматуры и т.д., является стабилизатор давления (описан в [1]), а при больших размерах трубопроводной системы — воздушный колпак (расчет системы с воздушным колпаком приведен в [2]). Однако для протяженных трубопроводов больших диаметров 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, сбрасывающего жидкость.

Одной из разновидностей такого устройства является мембранно-сбрасывающее устройство (МСУ). Жесткая мембрана настроена таким образом, что при давлениях, не превышающих давления при стационарном режиме $p_{ст}$ не проис-

ходит 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_M , не вызывающее открытие мембраны, $h_M = 0$ —20 м; параметр h_M можно регулировать при установке мембраны МСУ.

Для расчетной модели примем следующие гипотезы.

1. Гидравлическое сопротивление ζ_M МСУ при полностью открытой мембране считается постоянным.

2. Расход оттока жидкости увеличивается от 0 до Q_{OT} за время t_{CM} по квадратичному закону.

3. 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,

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

Согласно гипотезе 2 (см. (1))

$$Q_{OT} = a_M \sqrt{\frac{2gH_P \omega_M^2}{\zeta_M}},$$

где $H_P = \Delta H - h_M$ (ΔH — 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.), 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 [м²], v — средняя по живому сечению скорость потока [м/сек].

Уравнения движения и скорости потока несжимаемой жидкости при этом имеют вид

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

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

где g — ускорение свободного падения; z — геометрическая высота; t — время; ζ — 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).

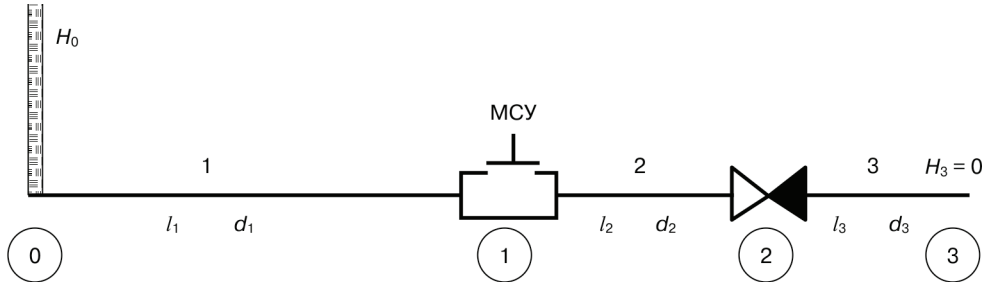


Рис. Схема численного расчета

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 $t = 10$ сек. При развитии гидроудара мембранно-сбрасывающее устройство, установленное в узле 1 открывается и осуществляет сброс воды.

Пример. Дано: $H_0 = 10$ м, $H_3 = 0$, $l_1 = 10\,000$ м, $l_2 = 10$ м, $l_3 = 10$ м, $c = 1000$ м/сек, $d_1 = d_2 = d_3 = 1$ м, гидравлическое сопротивление трубопроводов $\lambda = 0,02$, $H_M = 50$ м, $h_M = 5$ м, $d_M = 0,3$ м, $dx = 10$ м.

Результаты. Проводилась серия расчетов с приведенными исходными данными и различным временем полного открытия мембраны $t_{CM} = 0; 0,01; 0,5; 1; 2$ сек. На рис. 1 показано давление P в гидравлической системе без МСУ в узле 1. Максимальное давление составляет 1,1 МПа (110 м водного столба). На рис. 2 показано давление при $Q_M = 0,46$ м³/сек и $t_{CM} = 1$ сек.

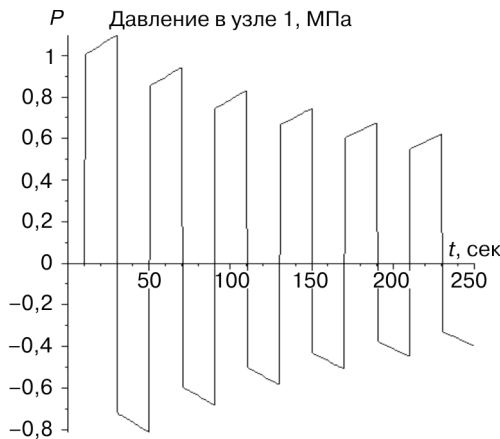


Рис. 1

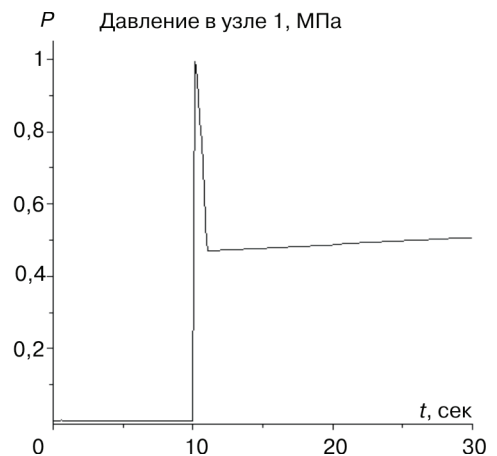


Рис. 2

Проводилась серия расчетов при $t_{CM} = 1$ сек и $Q_M = 0,23; 0,345; 0,46; 0,575$ м³/сек. Переход к неустановившемуся движению жидкости осуществляется в момент времени $t = 10$ сек, когда в узле 2 (см. рис.) мгновенно срабатывает задвижка.

Выводы.

Как показали численные эксперименты, мембранно-сбрасывающее устройство небольшой производительности даже при мгновенном открытии мембраны пропускает пик повышенного давления (см. рис. 1), высота пика 0,1 МПа. Ширина пика зависит от t_{CM} : чем больше t_{CM} , тем шире зона повышенного давления. Попытка уменьшить шаг dx до 0,5 м (при $t_{CM} = 0$) не привела к качественному изменению картины: пик повышенного давления остался, при значительном уменьшении шага вывода графической информации развивался на протяжении нескольких точек.

При изменении Q_M величина пика повышенного давления не меняется (1 МПа), однако ступенька давления тем ниже, чем больше Q_M . При $Q_M = 0,23 \text{ м}^3/\text{сек}$, $p_{\max} = 0,74 \text{ МПа}$; при $Q_M = 0,575 \text{ м}^3/\text{с}$, $p_{\max} = 0,43 \text{ МПа}$. Для ликвидации пика повышенного давления возможно совместное использование МСУ со стабилизатором давления, принцип работы которого заключается в упруго-демпфирующем воздействии на поток.

При большом Q_M (т.е. при большой производительности МСУ) 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 (см. рис.) установки МСУ).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И.* Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.
- [2] *Рекач Ф.В.* Расчет колебаний в круговых цилиндрических оболочках со стабилизатором давления методом характеристик // *Строительная механика строительных конструкций и сооружений.* — 2010. — № 1. — С. 60—65.

OPERATION SAFETY ANALYSES OF PIPE-LINES, USING MEMBRANE-DISCHARGE DEVICE UNDER ACCIDENTAL PRESSURE INCREASE

F.V. Rekach, E.K. Sinichenko

Peoples' Friendship University of Russia

¹Department of Mathematics

Faculty of science

²Department of Hydraulics and Hydraulic Structures

Engineering faculty

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

A model of membrane-discharge device is described. Analysis of pressure oscillations and safety of operation, depending on its parameters is given.

Key words: membrane-discharge device, oscillations.