ТОЧНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СО СТАБИЛИЗАТОРАМИ ДАВЛЕНИЯ

Ф.В. Рекач[1], Е.К. Синиченко[2], А.М. Попов[1]

[1]Кафедра высшей математики
Факультет физико-математических и естественных наук

[2]Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

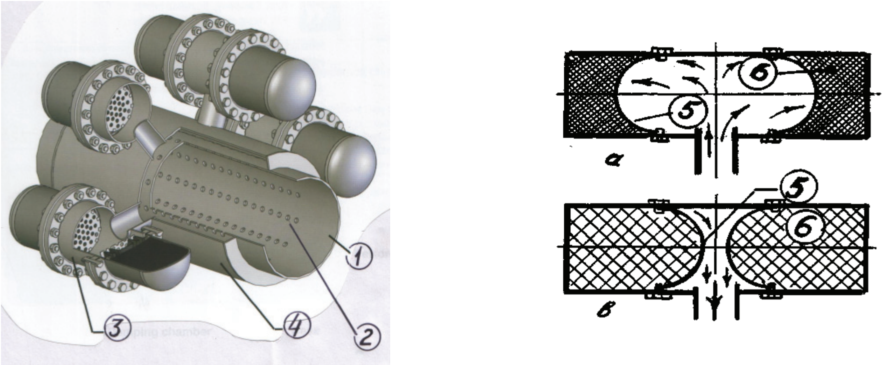
В статье описаны основные точные и численные методы расчета напорных трубопроводов со средствами защиты при неустановившемся движении.

Ключевые слова: стабилизатор давления, гидроудар.

Одним из эффективных средств гашения волновых процессов в трубопроводных системах являются стабилизаторы давления (СД). Принцип их работы основан на распределенном по длине трубопровода диссипативном и упругодемпфирующем воздействии на пульсирующий поток перекачиваемой среды. Наибольший эффект гашения достигается при диссипации энергии пульсаций на перфорационных отверстиях, равномерно распределенных по длине стабилизатора, а также вследствие демпфирования, обусловленного податливостью упругих элементов стабилизатора. Отличительная особенность стабилизаторов давления заключается в том, что они не нарушают форму трубопровода и имеют минимальные гидравлические сопротивления.

Стабилизатор работает следующим образом. При распространении волны повышенного давления (рис. 1а) происходит перетекание транспортируемой среды через отверстия 2 из трубопровода 1 в демпфирующую камеру 3, упругий элемент при этом сжимается. При понижении давления (рис. 1б) упругий элемент увеличивается в объеме, заполняя свободное пространство демпфирующей камеры, часть заполняющей ее среды вновь перетекает в трубопровод 1, обеспечивая сглаживание провала давления. Гашение пульсаций осуществляется также за счет дросселирования среды через перфорационные отверстия 2. При большой суммарной податливости упругих камер и оптимальном варианте суммарной площади перфорации можно добиться максимального уменьшения амплитуд гидроудара и вынужденных колебаний. Дополнительный эффект гашения обеспечивается при расширении потока в коллекторах стабилизатора.

Среди точных методов наиболее рациональными с точки зрения простоты, точности и легкости задания исходных данных являются методы Д'Аламбера и Лапласа.



а) б)

Рис. 1. Распространение волны повышенного (а) и пониженного (б) давления

Метод Д'Аламбера. Неустановившееся движение несжимаемой жидкости в трубопроводе без учета трения (после преобразований) описывается уравнениями движения и неразрывности следующего вида [4]:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2},$$
$$\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial t^2}, \tag{1}$$

где $p(x,t)$ — давление в трубопроводе, н/м^2; Q — расход жидкости в магистрали, м^3/с; F — площадь поперечного сечения магистрали, м^2; c — скорость распространения волн давления, м/с.

Идея метода Д'Аламбера состоит в представлении неустановившегося движения жидкости на i-м участке в виде прямой и обратной волн, при этом общее решение системы (1) для участка $x_i = l_{i-1} \div l_i$ записывается в виде

$$Q_i(x_i,t) = -\frac{F}{\rho} \cdot \left[f_i\left(t - \frac{x_i}{c}\right) + g_i\left(t + \frac{x_i}{c_i}\right) \right],$$
$$p_i(x_i,t) = -c \cdot \left[f_i\left(t - \frac{x_i}{c}\right) - g_i\left(t + \frac{x_i}{c}\right) \right], \tag{2}$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3.

Затем учитываются граничные условия и производится «сшивка» участков. Этим методом решались задачи на вынужденные колебания со стабилизатором давления [3].

Метод Лапласа. Система уравнений, описывающая движение жидкости в трубопроводе со стабилизатором, считая жидкость несжимаемой средой ρ = = const, имеет вид [2]

$$\frac{\partial p_{\mathrm{I}}(x,t)}{\partial x} = -\rho \cdot \left[\frac{\partial v_{\mathrm{I}}(x,t)}{\partial t} + 2a v_{\mathrm{I}}(x,t) \right], \tag{3}$$

$$\frac{\partial p_{\mathrm{I}}(x,t)}{\partial t} = -\rho c_T^2 \frac{\partial v_{\mathrm{I}}(x,t)}{\partial x}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial p_{\mathrm{II}}(x,t)}{\partial x} = -\rho \cdot \left[\frac{\partial v_{\mathrm{II}}(x,t)}{\partial t} + 2a v_{\mathrm{II}}(x,t) \right], \tag{5}$$

$$\frac{\partial p_{\mathrm{II}}(x,t)}{\partial t} = -\rho {c_T}^2 \frac{\partial v_{\mathrm{II}}(x,t)}{\partial x}, \tag{6}$$

$$\frac{\partial p_{\mathrm{III}}}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_{\mathrm{III}}}{\partial t}, \tag{7}$$

$$\frac{4}{d_{\mathrm{III}}} v_{\text{пер}} + \frac{\partial v_{\mathrm{III}}}{\partial x} = 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial p_{\text{ПК}}}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_{\text{ПК}}}{\partial t}, \tag{9}$$

$$\frac{\pi d_{\mathrm{III}}}{f_{\text{ПК}}} v_{\text{пер}} - \frac{\partial v_{\text{ПК}}}{\partial x} = 0, \tag{10}$$

$$\frac{\partial p_{\text{К}}}{\partial x} = -\rho \cdot \frac{\partial v_{\text{К}}}{\partial t}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial p_{\text{К}}}{\partial t} = -\rho c_{\text{К}}^2 \cdot \frac{\partial v_{\text{К}}}{\partial x}, \tag{12}$$

$$p_{\mathrm{III}} - p_{\text{ПК}} = A v_{\text{пер}} + B v_{\text{пер}} \cdot \left| v_{\text{пер}} \right|, \tag{13}$$

где p_{I}, v_{I}, p_{II}, v_{II}, p_{III}, v_{III} — давление и скорость на участках магистрали $\mathrm{I, II, III}$; a — коэффициент трения в магистрали трубопровода; $c_{\text{Т}}$, $c_{\text{К}}$ — скорость звука в трубе, камере с жидкостью; $v_{\text{пер}}$ — скорость перетекания потока из трубопровода в предкамеру; $p_{\text{ПК}}$, $v_{\text{ПК}}$, $p_{\text{К}}$, $v_{\text{К}}$ — давление и скорость в предкамере и камере стабилизатора; $f_{\text{ПК}} = \frac{\pi}{4}\left(d_{\text{ПК}}^2 - d_{\mathrm{III}}^2\right)$ — площадь поперечного сечения предкамеры кольцевой формы; d_{III}, $d_{\text{ПК}}$ — средний диаметр трубы магистрали и внешний диаметр кольца предкамеры; A и B — постоянные коэффициенты, получаемые экспериментально.

Уравнения (3)—(13) представляют собой систему относительно одиннадцати неизвестных функций p_{I}, v_{I}, p_{II}, v_{II}, p_{III}, v_{III}, $p_{\text{ПК}}$, $v_{\text{ПК}}$, $p_{\text{К}}$, $v_{\text{К}}$, $v_{\text{пер}}$, в которой (3), (5), (7), (9), (11) являются уравнениями равновесия элемента потока; (4), (6), (8), (10), (12) — уравнениями неразрывности и уравнение (13) выражает условие перетекания жидкости через перфорацию.

Длина волны, которую гасит стабилизатор, как правило, значительно превышает его длину $l_{\text{СТ}}$. Поэтому принимается гипотеза о том, что давление в различных элементах стабилизатора не меняется по координате x.

Система (3)—(13) сводится к четырем уравнениям, к которым вместе с граничными условиями (в граничных сечениях задается известная величина давления или расхода) применяется преобразование Лапласа по времени. Преобразованная система дифференциальных уравнений уже не является системой в частных производных и имеет точное решение. Переходя обратно во временную область с помощью формулы обращения Меллина, методом Д'Аламбера находятся оригиналы функций $\overline{p}_{\mathrm{I}}(s,x)$, $\overline{v}_{\mathrm{I}}(s,x)$, $\overline{p}_{\mathrm{II}}(s,x)$, $\overline{v}_{\mathrm{II}}(s,x)$.

Сравнение методов. Методом Д'Аламбера были решены задачи на вынужденные колебания, в которых в одном из граничных сечений задавалось давление равное нулю (выброс жидкости в атмосферу), во втором задавались известные пульсации давления или расхода. Аналогичные задачи решались и методом Лапласа, однако ввиду громоздкости вычислений (которые не всегда можно было поручить компьютеру) число рассматриваемых участков сокращалось до минимума.

Методом Лапласа легче решаются задачи на гидроудар (в граничном сечении с постоянным расходом мгновенно закрывается задвижка) [1]. Также исследовались задачи с нелинейным законом перетекания жидкости через перфорацию, что в методе Д'Аламбера сделать трудно (если вообще возможно). Задачи с наличием трения в магистральном трубопроводе можно решать обоими методами.

При решении задач на вынужденные колебания метод Д'Аламбера более удобен, так как легче задавать гармоники вынужденных колебаний.

Часть результатов решения по рассматриваемым методам сравнивались и разница амплитуд давления не превосходила 10%.

Выводы. При решении методом Д'Аламбера значительно легче рассчитывать гидравлические системы, включающие несколько разных конструктивных участков, однако труднее учитывать нелинейности задач.

Оба метода имеют определенные ограничения их использования, связанные с невозможностью (или большой технической трудностью) учета изменений в системе, происходящих в заданные моменты времени.

Решение задач точными методами дает правдоподобную физическую интерпретацию, что может быть использовано при поверке решений численными методами.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И.* Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

[2] *Низамов Х.Н., Рекач Ф.В., Синиченко Е.К.* Расчет вынужденных колебаний трубопровода со стабилизатором давления диссипативного принципа действия методом Лапласа с учетом трения в магистральном трубопроводе и нелинейной зависимости скорости перетекания жидкости через перфорацию // Двойные технологии. — 2005. — № 2. — С. 20—25.

[3] *Рекач Ф.В.* Исследование вынужденных колебаний в круговых цилиндрических оболочках методом Д'Аламбера со стабилизатором давления диссиптивного типа // Строительная механика конструкций и сооружений. — 2007. — № 2. — С. 47—52.

[4] *Чарный И.А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. — М.: Недра, 1975.

EXACT METHODS IN ANALYSIS OF PRESSURE PIPELINES WITH PRESSURE STABILIZERS

F.V. Rekach[1], E.K. Sinichenko[2], A.M. Popov[1]

[1]Department of Mathematics
Faculty of science

[2]Department of Hydraulics and Hydraulic Structures
Engineering faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

A short essay of pressure pipelines analysis on water hammer and pressure oscillations by exact methods is described in an article.

Key words: pressure stabilizer, water hammer.