УДК 681.5

ПОЛУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРУБОПРОВОДА В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА

Ульянов Н.И.
Могилевский государственный университет продовольствия
г. Могилев, Беларусь

Автоматические системы регулирования расхода, предназначенные для стабилизации возмущений по материальным потокам, являются неотъемлемой частью систем автоматизации технологических процессов. Системы регулирования расхода характеризуются двумя особенностями: малой инерционностью собственно объекта регулирования; наличием высокочастотных составляющих в сигнале изменения расхода, обусловленных пульсациями давления в трубопроводе (последние вызваны работой насосов или компрессоров или случайными колебаниями расхода при дросселировании потока через сужающее устройство).

Объектом регулирования расхода является участок трубопровода между точкой измерения расхода и регулирующим органом. Длина этого участка определяется правилами установки сужающих устройств и регулирующих органов и составляет обычно несколько метров. Ввиду малой инерционности объекта регулирования особые требования предъявляются к процессам в трубопроводах и методов расчета систем регулирования.

К рассмотрению процессов в трубопроводах можно подойти с двух точек зрения. Первая точка зрения – это рассматривать их как объект с распределенными параметрами, т.е. обладающий волновыми свойствами. Вторая точка зрения – принимать трубопровод как объект с сосредоточенными параметрами и учитывать только запаздывание, вызванное конечной скоростью распространения газа или жидкости. Длинные трубопроводы могут заполнять жидкостями или газами. Несмотря на это, они будут описываться одними и теми же передаточными функциями, но с различными коэффициентами, так как жидкость несжимаема, а газ сжимаем. Запишем уравнение длинного трубопровода, заполненного жидкостью, считая его объектом с распределенным параметрами

$$-\frac{\partial q}{\partial x}=\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{r}{g}v\,,\quad \frac{\partial v}{\partial x}=\frac{g}{a^2}\frac{\partial q}{\partial t}\,,$$

где q – давление; v – скорость движения жидкости; x – расстояние от начала отсчета; a – скорость звука в жидкости; r – коэффициент трения; g – ускорение силы тяжести.

При граничных условиях x=0, x=L, q=q_0, v=v_0 получим передаточную функцию длинного трубопровода

$$\frac{\varepsilon(p)}{q(p)}=\frac{2Q_0(1-e^{-2\tau p})}{(1+Q_0)-e^{-2\tau p}(1-Q_0)},$$

где ε – перемещение исполнительного органа, меняющего проходное сечение трубопровода

$$Q_0=\frac{av_0}{2gq_0}\,;\ \tau=\frac{L}{a}\cdot$$

Таким образом, объект с распределенными параметрами в конечном счете характеризуется запаздыванием τ.

Запишем теперь уравнение длинного трубопровода, заполненного газом

$$\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=-\frac{1}{a}\frac{\partial q}{\partial x}.$$

К этому уравнению следует добавить

– уравнение постоянства массы

$$\frac{\partial d}{\partial t}+Q_0\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial d}{\partial x}=0,$$

где d – плотность газа;

– уравнение газового состояния

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^k=\frac{q}{q_0},$$

где k – показатель адиабаты;

– уравнение скорости звука в газе

$$a=\sqrt{\frac{kq_0}{d_0}}.$$

Учитывая опять граничные условия $x=0$, $x=L$, $v=v_0$, получим передаточную функцию длинного трубопровода, заполненного газом

$$\frac{\varepsilon(p)}{q(p)}=\frac{1-be^{-2\tau p}}{\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)+be^{-2\tau p}\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)},$$

где $\tau=\frac{L}{a}$; $\gamma=\frac{v_0}{a}$; $b=\frac{1+\gamma\left(1-\frac{k}{2}\right)}{1-\gamma\left(1-\frac{k}{2}\right)}$.

Можно длинный трубопровод разбить на n секций. Передаточная функция одной секции будет иметь вид

$$K(p)=\frac{k}{Tp+1}.$$

Передаточная функция n секций, соединенных последовательно, запишется следующим образом

$$K_n(p)=\frac{k_1k_2\cdots k_n}{(Tp+1)^n}=\frac{k}{(Tp+1)^n}.$$

Это уравнение приближенно может описать длинный трубопровод, правда, без учета волновых явлений. Однако передаточная функция $K_n(p)$ записывалась в предположении, что последующее звено не влияет на предыдущее, а это принципиально не соответствует действительности. Поэтому передаточной функцией $K_n(p)$ следует пользоваться с большой осторожностью. Кроме этого, нельзя дать рекомендацию, на сколько секций n разбивать трубопровод.

Наконец, передаточную функцию можно представить и в следующем приближенном виде

$$K_\tau(p)=\frac{k\cdot e^{-\tau p}}{Tp+1},\ \tau=\frac{L}{a},\ T=\frac{G}{G_2},$$

где G – количество газа во всем трубопроводе, кг; G_2 – расход газа через трубопровод, кг/с.

Передаточная функция $K_\tau(p)$ также не учитывает волновых явлений, но физически она точнее определяет процесс в трубопроводе, чем функция $K_n(p)$.

Поэтому динамика канала «расход вещества через клапан – расход вещества через расходомер» приближенно описывается апериодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием.