

Ю. К. Шлык, А. И. Плаксин

(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

*Ключевые слова: динамическая система, переходный процесс, динамические аналогии, стационарный режим*

*Key words: dynamic system, transient, dynamic analogy, steady-state conditions*

Современные системы магистральных трубопроводов относятся к динамическим системам особого рода.

Большая протяженность линейных участков трубопроводов в сочетании с огромными объемами перекачиваемых по ним сред (нефть, газ, нефтепродукты) делает исследования по изучению волновых процессов в таких системах чрезвычайно актуальными.

Такое понятие, как «гидравлический (пневматический) удар», введенное Н. Е. Жуковским еще в конце 19-го века [1], заставляет оценивать роль волновых процессов, возникающих в магистральных трубопроводах при их эксплуатации, как исключительно значимую. Неконтролируемая динамика движения среды в трубопроводе может закончиться техногенной и экологической катастрофой, вызванной его разрывом.

Такой негативный сценарий развития событий на сегодня весьма вероятен, поскольку срок службы большинства систем магистральных нефте- и газопроводов, построенных еще в 80-х годах прошлого века, близок к критическому. Несмотря на всю масштабность динамических систем такого рода, они не являются исключением в том смысле, что происходящие в них волновые процессы не выходят за рамки классической теории автоматического управления (ТАУ) [2].

Данное обстоятельство позволяет с успехом использовать методы моделирования при решении задач, связанных с диагностикой состояния и режимами эксплуатации систем магистральных трубопроводов.

Общезвестно, что любое воздействие на динамическую систему (ступенчатое, импульсное, гармоническое) приводит к развитию в ней переходного процесса [2]. Магистральный трубопровод не является исключением, поскольку среда, которая его заполняет, обладает массой, упругостью и известным уровнем диссипации энергии.

Из всего многообразия причин, способных вызвать в трубопроводе переходный процесс, выделим, по нашему мнению, наиболее значимые. В их числе: изменение режима «прокачки», обусловленное технологической необходимостью, возможное нарушение герметичности стенки трубопровода, возможный несанкционированный отбор среды (нефтепродуктов) из трубопровода, смещение тела самой трубы, вызванное сезонными подвижками грунтов, а также проблемы, связанные с техническим состоянием оборудования перекачивающих станций.

Характер переходного процесса, возникающего в любой динамической системе (апериодический или колебательный), в высшей степени информативен. С позиции ТАУ он позволяет оценить последствия тех или иных воздействий на систему с позиции ее устойчивости (разрыв трубопровода), а также определить упруго-инерционно-диссипативные характеристики самой среды, которая заполняет трубопровод заданной длины. Более того, спонтанно возникающий в трубопроводе переходный процесс, возникновение которого заведомо не связано с технико-технологическими процессами эксплуатации заданного участка магистрального трубопровода и перекачивающей станции, может, в числе прочих причин, свидетельствовать о нарушении герметичности стенки трубопровода. Очевидно, что своевременное определение негерметичности стенки трубопровода, а также ее координаты по длине, позволит предотвратить все возможные негативные последствия, связанные с его разрывом. Однако прежде, чем переходить к решению этой задачи, необходимо определить параметры переходного процесса в герметичной трубе, заполненной реальной средой (газ, жидкость).

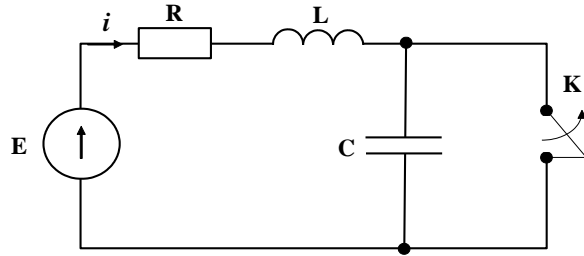
Эту задачу будем решать с использованием метода динамических аналогий, который обобщен и сформулирован Ольсоном [3] в 40-х годах прошлого века. Данный подход в моделировании получил не только свое дальнейшее теоретическое развитие, но и с успехом использовался при решении большого числа практических задач [4,5,6].

В основе метода лежит глубокая физическая аналогия между процессами распространения токов и напряжений в электрических цепях и волноводным распространением звука в трубах – и те и другие процессы описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями. Единственное отличие – это постоянные коэффициенты, входящие в состав этих уравнений.

Поставим задачу по определению функции переходного процесса в трубопроводе, заполненном реальной средой. При этом будем исходить из условия технической реализуемости математической модели переходного процесса в рамках поставленной первозадачи.

В ходе виртуального эксперимента примем условие, при котором к одному торцу трубы заданной длины подсоединен центробежный насос (аналог перекачивающей станции), обеспечивающий требуемый расход среды заданных физических свойств (газ, жидкость). Второй торец открыт (сообщается с атмосферой). В установившемся (стационарном) состоянии в трубе будет реализовано потенциальное движение среды. В момент времени  $t = 0$  открытый торец трубы «мгновенно» закрывается жесткой крышкой [7], движение среды прекращается, и в трубе начинает развиваться переходный процесс в формате роста давления. По его окончании в трубе устанавливается новый стационарный режим, при котором движение среды отсутствует, а давление достигает величины, которая обеспечивается работой насоса. При этом априори считается, что возникшее в трубе давление не должно вести к нарушению ее целостности.

Как было сказано выше, любая реальная среда, заполняющая трубопровод, обладает упруго-инерционно-диссипативными свойствами, что позволяет смоделировать рассмотренный выше трубопровод электрической цепью (рисунки).



**Рисунок. Электрическая схема – аналог трубопровода:**

$E$  – источник постоянной ЭДС, как аналог насоса;  
 $R$  – активное сопротивление, как аналог диссипативных потерь энергии;  
 $L$  – индуктивность, как аналог массы среды;  $C$  – емкость, как аналог упругости среды;  
 $K$  – ключ, осуществляющий коммутацию, как аналог жесткой крышки

Необходимо отметить, что приведенные к единице длины трубопровода параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$  являются характеристиками среды, заполняющей трубопровод заданной длины.

С учетом аналогий [3]: «электрическое напряжение – давление» и «электрический ток – скорость (расход)», определим для схемы (см. рисунок) функцию  $U_C(t)$  в переходном процессе. Данную задачу будем решать с использованием классического метода расчета переходных процессов [8].

Начальные условия для цепи (см. рисунок) запишем, используя законы коммутации:

$$\begin{aligned} i_L(-0) &= i_L(0) = \frac{E}{R}, \\ U_C(-0) &= U_C(0) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В целях упрощения формы записи дальнейшего решения примем, что  $U_C(t) = U_C$ .

На основании второго закона Кирхгофа для цепи после коммутации составим дифференциальное уравнение электрического состояния цепи:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{d U_C}{dt} + U_C = E. \quad (2)$$

Решение (1) для функции  $U_C$  будет представлено в виде

$$U_C = U_{Cnp} + U_{Cсв} \quad (3)$$

где  $U_{Cnp}$  – принужденная составляющая переходного процесса,  $U_{Cсв}$  – свободная его составляющая.

Принужденная составляющая переходного процесса может быть определена как

$$U_{Cnp} = E.$$

Для решения вопроса о временной функции  $U_{Cсв}$  составим характеристическое уравнение цепи по виду общего решения исходного уравнения (2):

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0. \quad (4)$$

Определим его корни:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Учитывая то обстоятельство, что в трубопроводе развивается колебательный переходный процесс, корни (4) будут комплексно сопряженными:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_1; \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{R}{2L}; \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

В результате имеем

$$U_{Cсв} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t + \psi).$$

Тогда выражение для  $U_C$  в переходном процессе примет вид

$$U_C = U_{C\grave{o}} + U_{Cсв} = U_{C\grave{o}} + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t + \psi). \quad (6)$$

Для определения неизвестных коэффициентов  $A$  и  $\psi$  продифференцируем (6):

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{dU_{C\dot{\alpha}}}{dt} + \frac{dU_{C\dot{\alpha}}}{dt}. \quad (7)$$

Объединяя решения по (6) и (7), для момента коммутации ( $t=0$ ), получим

$$\begin{cases} U_C(0) = E + A \sin \psi, \\ \frac{dU_C(0)}{dt} = A[-\alpha \sin \psi + \omega_1 \cos \psi] = \frac{i_C(0)}{C} = \frac{i_L(0)}{C} = \frac{E}{CR}. \end{cases}$$

В итоге

$$\begin{cases} A \sin \psi = -E, \\ A[-\alpha \sin \psi + \omega_1 \cos \psi] = \frac{E}{CR}. \end{cases} \quad (8)$$

Решение системы (8) дает окончательный результат по коэффициентам  $A$  и  $\Psi$ , а именно:

$$\psi = \arctg \left[ \frac{\omega_1}{\alpha - \frac{1}{RC}} \right] \quad \text{и} \quad A = - \frac{E}{\sin \left( \arctg \left[ \frac{\omega_1}{\alpha - \frac{1}{RC}} \right] \right)}.$$

Подставив найденные  $A$  и  $\Psi$  в (6), получим искомое решение задачи в виде

$$U_C(t) = E + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t + \psi). \quad (9)$$

Данный алгоритм решения применим для любых сред (газ, воздух, жидкость) и любых трубопроводов заданной длины и диаметра, вне зависимости от величины  $E$ , как аналога давления в линии нагнетания, при условии, что приведенные параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$  известны.

Обоснованность предложенной модели может быть установлена в ходе проведения экспериментальных исследований по методике рассмотренного выше виртуального эксперимента.

#### Список литературы

1. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. - М.- Л., Гостехиздат, 1949. - 103 с.
2. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993. - 492 с.
3. Olson H. F., 1943, Dynamical analogies. - New York, D. Van Nostrand Co. (Русский перевод: Ольсон Г., 1947, Динамические аналогии. - М.: ИЛ.)
4. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Изд. 2, перераб. и доп. - М.: Недра, 1975. - 296 с.
5. Лепендин Л. Ф. Акустика. - М.: Высш. Школа, 1978. - 448 с.
6. Исакович М. А. Общая акустика. - М.: Наука, 1973. - 496 с.
7. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. - М.: изд-во МГУ, 1960. - 337 с.
8. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. Основы теории цепей. Изд. 4, перераб. - М.: Энергия, 1975.

#### Сведения об авторах

**Шлык Юрий Константинович**, д.т.н., профессор, Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452) 48-61-16  
**Плаксин Алексей Игоревич**, аспирант, Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: 8-922-072-37-52; e-mail: vegavin88@gmail.com

**Shlyk J. K.**, PhD, professor, Tyumen State Oil and Gas University, phone: (3452) 48-61-16

**Plaksin A. I.**, postgraduate student, Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8-922-072-37-52; e-mail: vegavin88@gmail.com