

А. П. Пожитков, Ю. К. Шлык

## Влияние волновых процессов в трубопроводе на энергозатраты при транспорте углеводородного сырья

*Рассмотрена возможность согласования волновых сопротивлений давления и скорости трубопровода с нагрузкой перекачивающей станции при помощи метода электродинамических аналогий. Решение данного вопроса позволит существенно снизить энергозатраты при транспортировке нефти.*

Процесс перекачки различных сред (нефть, нефтепродукты) по магистральным трубопроводам сопровождается значительными энергозатратами. Учитывая разветвленность сети современных трубопроводных систем в Западной Сибири, а также большую их протяженность, можно сделать вывод: реализация мер по снижению этих затрат является важной научной и практической задачей.

Из числа возможных способов ее решения выделим основанный на рациональном использовании волновых процессов, сопровождающих движение среды в трубе с жесткими стенками.

Используя известный метод электродинамических аналогий между процессами движения среды в трубе и распространением электрического тока в линии электропередач, можно констатировать, что и те, и другие процессы описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями [1, 2]. В свою очередь, это означает, что классическая теория электрических линий с распределенными по длине параметрами может быть применена для оценки эффективности режима движения жидкости в трубопроводе.

Рассмотрим с этих позиций вопрос о возможности согласования волновых сопротивлений трубопровода и перекачивающей станции, если последнюю представить в виде некоторой акустической нагрузки.

Согласованный режим волноводной системы трубопровода и нагрузки, будет означать отсутствие отраженных волн давления и скорости. В этих условиях реализуется максимум мощности, передаваемой в нагрузку, и, как следствие, достигается максимальный КПД системы в целом. При этом затраты энергии на реализацию процесса перекачки нефтепродуктов минимизируются.

При описании волновых процессов в длинных трубах система нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики [3] в ряде случаев может быть сведена к системе линеаризованных уравнений вида:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} &= \gamma_{\text{ж}} \cdot \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + 2A\gamma_{\text{ж}} w(x, t), \\ -\frac{\partial w(x, t)}{\partial x} &= \frac{1}{\gamma_{\text{ж}} a_{\text{ж}}^2} \cdot \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial p(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p(x, t)$  — среднее давление в сечении  $x$ ;  $w(x, t)$  — средняя скорость в сечении  $x$ ;  $\gamma_{\text{ж}}$  — плотность жидкости, заполняющей трубу;  $a_{\text{ж}}$  — скорость звука в ней;  $2A$  — диссипативный фактор потерь энергии на трение;  $K$  — приведенный модуль упругости стенки трубы;  $t$  — время.

Указанная линеаризация является обоснованной, поскольку принимается целый ряд допущений, сопровождающих движение жидкости в трубопроводе [4].

Электрическим эквивалентом системы (1) будет являться система известных «телеграфных» уравнений длинной электрической линии [5]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} &= L_0 \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_0 i(x, t), \\ -\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} &= C_0 \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + G_0 u(x, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u(x, t)$  и  $i(x, t)$  — мгновенные напряжение и ток;  $L_0$ ,  $R_0$ ,  $C_0$ ,  $G_0$  — индуктивность, сопротивление, емкость и проводимость единицы длины линии.

Систему дифференциальных уравнений в частных производных (2) можно упростить и свести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида (при условии, что  $G_0 = 0$ ):

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dx} &= R_0 \dot{i} + j\omega L_0 \dot{i}, \\ -\frac{d\dot{i}}{dx} &= j\omega C_0 \dot{U}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\dot{U}$  и  $\dot{i}$  — комплексы напряжения и тока в любом произвольном сечении длинной электрической линии;  $\omega$  — угловая частота задающего генератора, питающего линию;  $j = \sqrt{-1}$ .

Отмеченная выше электродинамическая аналогия процессов в рассматриваемых системах позволяет применить методы теории электрических цепей к расчету динамических характеристик процесса перекачки нефти по магистральному трубопроводу.

В первую очередь это касается значения комплексной постоянной распространения волны давления и скорости в линии:

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \alpha + j\beta, \quad (4)$$

где  $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ ;  $Y_0 = j\omega C_0$ ;  $\alpha$  — частотно-зависимый коэффициент затухания, характеризующий затухание падающей волны на единицу длины линии;  $\beta$  — частотно-зависимый коэффициент фазы, характеризующий дисперсию фазовой скорости распространения волны в линии.

С постоянной распространения  $\gamma$  связана величина  $Z_B$ , именуемая волновым сопротивлением линии. Она имеет вид:

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}}. \quad (5)$$

При заданных граничных условиях на входе и выходе линии и известной ее длине  $l$  система (3) позволяет перейти к эквивалентной системе с гиперболическими функциями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + \dot{i}_2 Z_B \operatorname{sh}(\gamma l), \\ \dot{i}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \operatorname{sh}(\gamma l) + \dot{i}_2 \operatorname{ch}(\gamma l), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\dot{U}_1$  и  $\dot{i}_1$  — входные комплексы напряжения и тока;  $\dot{U}_2$  и  $\dot{i}_2$  — выходные комплексы напряжения и тока;  $\operatorname{ch}$  и  $\operatorname{sh}$  — гиперболические функции.

Решение (6) может быть получено в замкнутом виде, если будет известен характер нагрузки в конце волновода и значение его комплексной постоянной распространения  $\gamma$ .

Считая, что входное сопротивление  $Z_{вх}$  равно отношению  $\dot{U}_1$  к  $\dot{i}_1$ , заменим в формулах (6)  $\dot{U}_2$  на  $\dot{i}_2 Z_2$ . Получим

$$Z_{вх} = \frac{\dot{i}_2 Z_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + \dot{i}_2 Z_B \operatorname{sh}(\gamma l)}{\dot{i}_2 \frac{Z_2}{Z_B} \operatorname{sh}(\gamma l) + \dot{i}_2 \operatorname{ch}(\gamma l)} = \frac{Z_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_B \operatorname{sh}(\gamma l)}{\frac{Z_2}{Z_B} \operatorname{sh}(\gamma l) + \operatorname{ch}(\gamma l)}, \quad (7)$$

где  $Z_2$  — сопротивление нагрузки.

Решение уравнения (7) позволяет определить коэффициент отражения по напряжению  $K_U$  как отношение напряжения отраженной волны к падающей [5]. В нашем случае

$$K_U = \frac{Z_2 - Z_B}{Z_2 + Z_B}. \quad (8)$$

Результат показывает, что при определенном сочетании параметров  $Z_2$  и  $Z_B$  может наступить режим, при котором  $K_U$  будет равен нулю. Это и есть самый экономичный с точки зрения энергозатрат режим работы длинной электрической линии. Именно в данном случае вся энергия генератора, работающего на входе линии,

полностью реализуется в нагрузке.

Этот вывод позволяет перенести полученный результат на реальный нефтепровод и наметить пути достижения его на практике. Решение данной задачи может быть получено при условии оптимального сочетания всего комплекса гидродинамических параметров трубопровода, таких как расход, давление, температура, акустические свойства перекачиваемой жидкости и гидродинамический режим работы собственно перекачивающей станции.

### Литература

1. *Исакович М. А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
2. *Ржевкин С. Н.* Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
3. *Чарный И. А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
4. *Шлык Ю. К., Васильев Д. А., Пожитков А. П.* Электродинамическое моделирование волнового процесса в длинном трубопроводе // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2004. Вып. 3. С. 118–121. (статья в данном сборнике).
5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1984. 559 с.

*A. P. Pozhitkov, Yu. K. Shlyk*

### *INFLUENCE UPON POWER LOSSES COMING FROM WAVE PROCESSES IN PIPELINE DURING TRANSPORTATION OF HYDROCARBON RAW MATERIALS*

*The article considers possibility of harmonizing wave resistance of pipeline pressure and velocity with a load from booster station using method of electrodynamic analogies. Solution of the problem will allow to significantly reduce power losses under oil transportation.*