

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Гамзаев Х.М.

Баку, Азербайджанская государственная нефтяная академия

Работа посвящена исследованию некоторых вопросов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. В первой части работы рассматривается задача выбора режима работы насосной станции, расположенной на заданном участке трубопровода, а во второй части исследуется задача обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов в трубопроводах.

Для математического описания задач используется одномерная математическая модель стационарного движения вязкой жидкости по трубопроводу. При этом давление и массовый расход жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода считаются заданными. Предложен аналитический метод решения поставленных задач и получены явные формулы для определения режима работы насосной станции, массового расхода на утечку и места утечки в трубопроводе.

Выбор режима работы насосной станции

В настоящее время наиболее эффективным средством транспортировки нефти и нефтепродуктов считается трубопроводный транспорт. Современные магистральные трубопроводы, транспортирующие нефти и нефтепродуктов, состоят из следующих основных объектов: насосных станций, резервуарного парка и линейной части - собственно трубопровода. Обычно гидравлический расчет трубопроводов начинают с определения оптимального диаметра трубопровода, обеспечивающего заданный объем перекачки. Для определения оптимального диаметра трубопровода используется ряд методов [1]. Основная идея этих методов состоит в следующем. Составляют выражения для полной годовой стоимости трубопровода, включая как капитальные затраты на его сооружение и прокладку, так и эксплуатационные расходы, выраженные в функции от диаметра трубопровода. Затем находят минимум этой функции, т.е. берут первую производную от стоимости по диаметру и приравняют к нулю. Из получаемого таким образом уравнения определяют диаметр трубопровода, соответствующий минимуму его полной стоимости. При этом устанавливают

материал трубы и толщины ее стенки. После этого, исходя из условий прочности, определяют предельно допустимое для выбранной трубы давление

$$p_{\max} = \frac{2\theta\sigma}{d},$$

где θ - толщина стенки трубы, d - ее диаметр, σ - допускаемое напряжение на растяжение.

Затем переходят к определению необходимого числа насосных станций и их расстановке по трассе. Для этого строят продольный профиль трассы трубопровода и по известному диаметру и заданному расходу перекачиваемой жидкости находят суммарные потери напора по всей длине трубопровода и определяют необходимое число насосных станций по формуле

$$n = \frac{H}{H_s},$$

где H - суммарная потеря по всей трассе трубопровода, H_s - напор развиваемый одной насосной станцией, соответствующий в первом приближении предельно допустимому давлению жидкости в трубе

$$H_s = \frac{p_{\max}}{\rho g},$$

где ρ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

После этого, пользуясь графическим способом, определяют места расположения насосных станций.

Необходимо отметить, что определение количества насосных станций, а также их места расположения по вышеизложенному подходу нецелесообразно из технико-экономических соображений. Кроме того, использование данного подхода при проектировании нефте и нефтепродуктопроводов не обеспечивает достаточной для практических целей точности. В связи с этим, требуется совершенствование существующих и разработка новых методов гидравлического расчета трубопроводов. В данной работе рассматривается вопрос выбора режима работы насосных станций на определенных участках трубопроводов.

Предположим, что требуется перекачивать нефть или нефтепродукт с массовым расходом M по горизонтально расположенному трубопроводу диаметром d и длиной l . При этом в начальном $x = 0$ и конечном $x = l$

сечениях трубопровода необходимо поддерживать постоянные давления P_0 и P_l , соответственно.

Примем, что из-за потерь на трение давление P_0 в начальном сечении трубопровода не обеспечивает давления P_l во входном сечении трубопровода. Следовательно, на заданном участке трубопровода необходимо разместить насосную станцию.

Перейдем к математической описанию поставленной задачи. Практика эксплуатации магистральных нефте и нефтепродуктопроводов свидетельствует, что при включении насосной станции происходит кратковременное изменение динамических параметров потока, и через определенное время трубопровода устанавливается стационарный режим. Поэтому для описания состояния данного трубопровода можно использовать математическую модель стационарного режима работы трубопровода. Математическую модель стационарного режима работы трубопровода при наличии насосной станции представим в следующем виде:

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} - p_\xi \delta(x - \xi) = \frac{4}{d} \tau_m,$$

$$\frac{dup}{dx} = 0,$$
(1)

где P - давление, u - средняя по поперечному сечению трубопровода скорость движения перекачиваемой жидкости, $\delta(x - \xi)$ - дельта функция Дирака, τ_m - касательное напряжение на стенке трубопровода, ξ - точка расположения насосной станции, P_ξ - давление, развиваемое насосной станцией.

Предположим, что давление P_ξ неизвестно и подлежит определению. А место расположения насосной станции, а также давление и массовый расход жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода считаем заданными, т.е. для системы (1) имеем следующие граничные условия

$$p|_{x=0} = p_0, \quad p|_{x=l} = p_l, \tag{2}$$

$$Sup|_{x=0} = m, \quad Sup|_{x=l} = m, \tag{3}$$

где S - площадь поперечного сечения трубопровода.

Примем, что перекачиваемая жидкость вязкая и касательное напряжение на стенке трубопровода можно определить по формуле

$$\tau_m = -\frac{8\mu}{d}u, \quad (4)$$

полученной на основе закона трения Ньютона [2], а в качестве уравнения состояния жидкости используем

$$\rho = \rho_a e^{\beta(p-p_a)}, \quad (5)$$

где β - коэффициент объемного сжатия жидкости, ρ_a - плотность жидкости при давлении p_a , μ - коэффициент вязкости жидкости.

Нетрудно видеть, что интегрируя второе уравнение системы (1), можно записать

$$up = const = \frac{m}{S}. \quad (6)$$

Тогда первое уравнение системы (1) с помощью соотношений (4), (5), (6) преобразуется к следующему виду

$$-\frac{m^2\beta}{S^2}\frac{dp}{dx} + \rho\frac{dp}{dx} - \rho p_\xi \delta(x-\xi) = -\frac{128\mu m}{\pi d^4}. \quad (7)$$

Наличие дельта функции в уравнении (7) показывает, что из-за наличия насосной станции в сечении ξ трубопровод разбивается на две зоны: от начала трубопровода до места расположения насосной станции и от места расположения насосной станции до конца. Следовательно, будем рассматривать две задачи:

для первой зоны, $0 < x < \xi$:

$$-\frac{m^2\beta}{S^2}\frac{dp_-}{dx} + \frac{1}{\beta}\frac{dp_-}{dx} = -\frac{128\mu m}{\pi d^4}, \quad (8)$$

$$p_-|_{x=0} = p_0, \quad (9)$$

для второй зоны, $\xi < x < l$:

$$-\frac{m^2\beta}{S^2}\frac{dp_+}{dx} + \frac{1}{\beta}\frac{dp_+}{dx} = -\frac{128\mu m}{\pi d^4}, \quad (10)$$

$$p_+|_{x=l} = p_l, \quad (11)$$

где давление и плотность в первой зоне обозначены индексом «-», а второй зоне индексом «+».

Интегрируя уравнения (8) и (10) с учетом условий (9), (11) будем иметь

$$-\frac{m^2\beta}{S^2}(p_- - p_0) + \frac{\rho_a}{\beta}(e^{\beta(p_- - p_a)} - e^{\beta(p_0 - p_a)}) = -\frac{128\mu m}{\pi d^4}x,$$

$$-\frac{m^2\beta}{S^2}(p_l - p_+) + \frac{\rho_a}{\beta}(e^{\beta(p_l - p_a)} - e^{\beta(p_+ - p_a)}) = -\frac{128\mu m}{\pi d^4}(l - x).$$

Разрешая первое уравнение последней системы относительно p_- , а второе уравнение относительно p_+ , предварительно воспользовавшись разложением функции $e^{\beta(p - p_a)}$ в ряд Тейлора и ограничившись двумя первыми членами ряда

$$e^{\beta(p - p_a)} = 1 + \beta(p - p_a),$$

получим

$$p_-(x) = p_0 - kx, \quad 0 \leq x \leq \xi, \quad (12)$$

$$p_+(x) = p_l + k(l - x), \quad \xi \leq x \leq l, \quad (13)$$

$$\text{где } k = \frac{32\mu / d^2}{S\rho_a / m - \beta m / S}.$$

Теперь для определения давления P_ξ , развиваемого насосной станцией, обе части уравнения (7) разделим на ρ и проинтегрируем на отрезке $[\xi - \varepsilon, \xi + \varepsilon]$. В результате будем иметь:

$$p_\xi = \left(1 - \frac{m^2\beta}{\rho_a S^2}\right)(p_+|_\xi - p_-|_\xi).$$

Учитывая выражения для $p_-(x)$ и $p_+(x)$ из (12), (13), окончательно получим следующую формулу для определения P_ξ

$$p_\xi = \left(1 - \frac{m^2\beta}{\rho_a S^2}\right)(p_l - p_0 + kl). \quad (14)$$

Таким образом, задавая массовый расход жидкости и давление в начальном и конечном сечениях трубопровода, с помощью формул (12) и (13) можно найти распределение давления по трубопроводу, а по формуле (14) - давление развиваемое насосной станцией.

Обнаружение утечек нефти и нефтепродуктов в трубопроводах

Следует отметить, что одной из наиболее важных проблем эксплуатации магистральных нефте и нефтепродуктопроводов является разработка системы обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов, возникающих при повреждении трубопроводов. Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с возрастающими требованиями к охране окружающей среды. К настоящему времени известны различные методы обнаружения утечек, к которым, в частности, относятся внешний (визуальный или инструментальный) и внутренний инструментальный контроль состояния трубопровода, сравнение параметров работы трубопровода (линейного баланса, давление, расхода) и др. [3]. В практике эксплуатации трубопроводов для обнаружения утечек широко применяется метод контроля линейного баланса трубопровода, который основан на точном измерении расхода перекачки на входе и выходе. В целом контроль линейного баланса трубопровода позволяет обнаруживать утечки в пределах 1-5 % величины потока, но не может указывать их место. В связи с этим очень важное значение имеет определение места утечки нефти и нефтепродуктов в наземных и подводных магистральных трубопроводах.

В данной работе для определения места утечки нефти и нефтепродуктов предлагается метод, основанный на использовании математической модели процесса движения сжимаемой жидкости по трубопроводу.

Предположим, что в горизонтально расположенном трубопроводе круглого сечения, транспортирующем жидкость (нефть или нефтепродукт) происходит утечка в сечении, расположенном на расстоянии ξ от начала трубопровода. При возникновении утечки в трубопроводе, как показывает практика эксплуатации нефте и нефтепродуктопроводов, появляется кратковременное изменение динамических параметров потока, которое от места утечки распространяется по обе стороны трубопровода. Однако через определенное время в трубопроводе устанавливается стационарный режим течения с учетом расхода на утечку. Поэтому для анализа состояния данного трубопровода используем математическую модель стационарного режима работы трубопровода с учетом расхода на утечку:

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = \frac{4}{d} \tau_m,$$

$$\frac{d\rho}{dx} = - \frac{m_\xi}{S} \delta(x - \xi), \quad (15)$$

где m_ξ - массовый расход на утечку за единицу времени.

Предположим, что места утечки ξ и массовый расход на нее m_ξ в трубопроводе не известны и подлежат определению. При этом давление и массовый расход жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода считаются заданными, т.е. для системы (15) имеем следующие граничные условия

$$p|_{x=0} = p_0, \quad p|_{x=l} = p_l, \quad (16)$$

$$Sup|_{x=0} = m_0, \quad Sup|_{x=l} = m_l. \quad (17)$$

Примем, что перекачиваемая жидкость вязкая и касательное напряжение на стенке трубопровода можно определить по формуле (4), а в качестве уравнения состояния жидкости используем уравнение (5).

Наличие дельта функции в системе (1) показывает, что из-за утечки в сечении ξ трубопровод разбивается на две зоны: от начала его до места утечки и от места утечки до конца. Тогда задачу (15)-(17) с учетом соотношений (4), (5) можно записать в виде:

для первой зоны, $0 < x < \xi$:

$$\frac{du_- \rho_-}{dx} + \left(\frac{1}{u_-} - \beta u_- \rho_- \right) \frac{dp_-}{dx} = - \frac{32\mu}{d^2},$$

$$p_-|_{x=0} = p_0, \quad (18)$$

$$\frac{du_- \rho_-}{dx} = 0, \quad Su_- \rho_-|_{x=0} = m_0, \quad (19)$$

для второй зоны, $\xi < x < l$:

$$\frac{du_+ \rho_+}{dx} + \left(\frac{1}{u_+} - \beta u_+ \rho_+ \right) \frac{dp_+}{dx} = - \frac{32\mu}{d^2},$$

$$p_+|_{x=l} = p_l, \quad (20)$$

$$\frac{du_+ \rho_+}{dx} = 0, \quad Su_+ \rho_+|_l = m_l, \quad (21)$$

где параметры потока - скорость движения жидкости, плотность и давление в первой зоне обозначены индексом «-», а во второй – индексом «+».

Связь между решениями задач (18), (19) и (20), (21) осуществляется с помощью соотношения

$$u_+ \rho_+ \Big|_{\xi} - u_- \rho_- \Big|_{\xi} = - \frac{m_{\xi}}{S}, \quad (22)$$

полученного при интегрировании второго уравнения системы (15). Данное соотношение означает разрыв массового расхода жидкости в сечении ξ , причем разность массовых расходов справа и слева в сечении $x = \xi$ равна массовому расходу на утечку в трубопроводе. Предполагая неразрывность давления во всех сечениях трубопровода, включая $x = \xi$, приходим ко второму соотношению

$$p_- \Big|_{\xi} = p_+ \Big|_{\xi}. \quad (23)$$

Нетрудно видеть, что решениями задач (19), (21) соответственно будут

$$\begin{aligned} u_- \rho_- &= \text{const} = \frac{m_0}{S}, \\ u_+ \rho_+ &= \text{const} = \frac{m_l}{S}. \end{aligned} \quad (24)$$

Учитывая (24) и решая задачи (18) относительно p_- , а задачи (20) относительно p_+ , будем иметь

$$\begin{aligned} p_-(x) &= p_0 - k_- x, & 0 \leq x \leq \xi, \\ p_+(x) &= p_l + k_+(l - x), & \xi \leq x \leq l, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{где } k_- = \frac{32\mu / d^2}{S\rho_a / m_0 - \beta m_0 / S}, \quad k_+ = \frac{32\mu / d^2}{S\rho_a / m_l - \beta m_l / S}.$$

Подставив (24) в соотношение (22), находим массовый расход на утечку в трубопроводе

$$m_{\xi} = m_0 - m_l. \quad (26)$$

Для определения места утечки в трубопроводе используем соотношение (23). Подставляя в соотношение (23) выражения для $p_-(x)$ и $p_+(x)$ из уравнения (25), получим следующую формулу для определения места утечки в трубопроводе:

$$\xi = \frac{p_0 - p_l - k_+ l}{k_- - k_+}. \quad (27)$$

Таким образом, измерив давление и массовый расход жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода, с помощью формул (26) и (27) можно определить массовый расход на утечку и места утечки в трубопроводе, образующиеся при повреждении трубопровода.

Литература

1. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра, 1980.
2. Гамзаев Х.М., Ширинов К.Ф. К определению коэффициента гидравлического сопротивления // Изв. НАН Азербайджана. Сер. физ.-тех. мат. наук, т. XVIII, 1998, №6, с. 143-146.
3. Применение ЭВМ для обнаружения утечек на нефтепродуктопроводах // Загоскин В.Н., Венгерцев Ю.А., Казак Ю.А., Яковлев Ю.А. М.: УНИИТЭнефтехим, 1989.