УДК 622.691.4:502.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПРОДУКТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОЛОЖЕННЫХ В СРЕДЕ С ВЫСОКИМ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ РИСК-ФАКТОРОМ

Намгаладзе Д.П., Чалагашвили Г.Г. *(Грузинский Технический Университет)*

Для нефтепроводов сооруженных из современных материалов и по оптимальной технологии, нельзя исключить случайные воздействующие явления. Особое внимание требуют такие участки магистральных нефтепроводов, которые проложены по местности с высоким риск-фактором, например в таких как курортные зоны, пересечения рек, близость к водным акваториям, среда насыщенная минеральными водами и т.д. Установлено, что разлив в окружающей среде даже малого количества нефти, может вызвать необратимые экологические процессы. В связи с этим, рассмотрена гидравлическая задача при истечении продукта из магистрального трубопровода, в случае истечений из двух отверстий. В результате получены аналитические решения.

Как известно, не существует магистральных трубопроводов, вероятность разрыва которых равна нулю. Даже для нефтепроводов, сооруженных из современных материалов и по оптимальной технологии, нельзя исключить случайные воздействующие явления – например землетрясения или теракты. Особое внимание требуют такие участки магистральных нефтепроводов, которые проложены по местности с высоким риск-фактором, например в таких, как: курортные зоны, пересечения рек, близость к водным акваториям, среда насыщенная минеральными водами и т.д. Установлено, что разлив в окружающей среде даже малого количества нефти, может вызвать необратимые экологические процессы.

Ниже поставленная и затем решенная задача возникла в процессе проектирования участка магистрального нефтепровода Баку-Тбилиси-Джейхан проходящего в ущелье, в частноти седловидный профиль.

Проектом было предусмотрено строительство опорожняющего объекта при предполагаемой аварии нефтепровода, так как седловидный участок рассматривался как территория со значительной сенситностью с точки зрения охраны окружающей среды. Опорожняющий объект расположен вдоль нефтепровода в крайней нижней точке. Соответственно устройство данного объекта имеет целью минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду, в случае аварийного разлива нефти. Этот объект который состоит из системы опорожняющих трубопроводов, собирающего резервуара и других устройств, должно располагаться в нижней части нефтепровода седловидного участка, вблизи установленной задвижки (рис.1).

Опорожняющий объект седловидного участка предназначен для опорожнения как входящего участка нефтяного потока (верхний поток), так и для выходящего (нижний поток), при закрытии задвижек. Ёмкость опорожняющего резервуара должна обеспечивать достачный объем для опорожнения объема нефти находящейся в трубопроводе от самой высокой отметки участка до контрольной задвижки с некоторым резервом. Опорожнение нефти осуществляется несколькими опорожняющими трубопроводами подсоедененных в верхней и нижней части задвижки, диаметр которых меньше диаметра магистрального нефтепровода. Возврат поступившей в резервуар нефти после ликвидации аварии, производится низконапорными мобильными насосами. Для полного опорожнения резервуара монтируется низконапорный стационарный насос, с помощью которого возможно полное опорожнение резервуара в автоцистерны.

Так как при аварии некоторый объем нефти обязательно просачивается в грунт, то на близлежащей территории необходимо установление ловушек-перехватчиков нефте-водяной смеси. Такие устройства, как правило устанавливаются в котловинах, в которых происходит задерживание смеси и очисттка. Эти сооружения должны быть оснащены впускными и опрожняющими устройствами, для просачивания в цистерны.

Итак, до закрытия задвижек некоторый объем нефти обязательно просачивается в грунт. Этот объем можно условно разделить на две слагаемые. Первое слагаемое – это объем вытекшей из отверстия нефти, до закрытия задвижек в наивысших точках седловинного участка. Фактически это задача определения сосредоточенного отбора, при работающем насосе. Эта задача решена и оценить отмеченный объем – возможно. Для оценки второго слагаемого, т.е. объема нефти просачивающего в грунт после закрытия и верхних и нижних задвижек, на сей день не существует научно-обоснованной методики.

В отмеченной ситуации весьма значительно знать какой объем нефти опорожняется в резервуар (для установления объема резервуара при проектировании) и какой объем просачивается в грунт.

Для ослабления экологической ситуации вызванной просачиванием нефти в грунт, нужно предусмотреть большое количество факторов.

Среди них близость и уклон ближайших поверхностных и грунтовых вод на нисходящем склоне, чувствительность этих вод, отношение их расхода к транспортируемому расходу нефти, характер проникновение нефти в грунт, экологические ресурсы земляной среды и т.д.

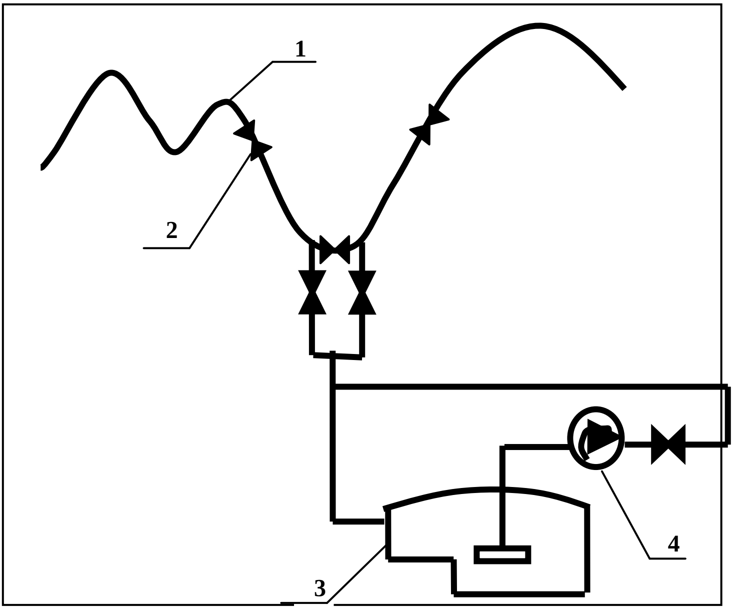

Рис.1. Схема седловидного участка магистрального нефтепровода Баку-Тбилиси-Джейхан, опорожняющего устройства и резервуара: 1. Магистральный нефтепровод; 2. Задвижка; 3. Емкость; 4. Насос подается из емкости в магистральный нефтепровод

Итак имеется гидравлическая задача идеализированная схема которой представлена на рис. 2. Т.е. задача касается истечения жидкости из резервуара с двумя отверстиями или насадками (у которых в общем случае могут быть различные диаметры), под переменным напором.

Наша цель определение времени опорожнения нефти до верхнего отверстия и объем нефти вытекший из отверстия за это время (т.е. тот объем нефти, который просачивается в грунт). Обозначения параметров процесса представлены на рис. 2. С целью упрощения, сперва рассмотрим задачу когда площади отверстий одинаковы и равняются ω. Также положим, что одинаковы коэффициенты расхода ($\mu_1 = \mu_2 = \mu = const$) равны и постоянны.

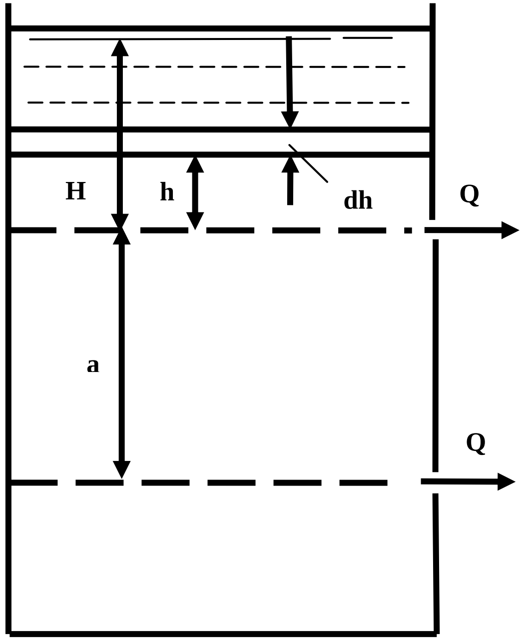

Рис.2. Гидравлическая идеализированная схема опорожнения продукта

Расходы из верхнего и нижнего отверстия соответственно равны [1]:

$$Q_1 = -\mu\omega\sqrt{2gh} \; ; \tag{1}$$

$$Q_2 = -\mu\omega\sqrt{2g(h+a)} \; . \tag{2}$$

где a - расстояние между отверстиями, а μ - коэффициент расхода. Уравнение баланса объемов имеет сдедующий вид

$$\Omega dh = -(Q_1 + Q_2)\; dt \; , \tag{3}$$

где Ω - площадь резервуара (принимается, что $\Omega = const$, т.е. резервуар аналогичен участку трубопровода с постоянным диаметром).

Из (3) получим:

$$dt = -\frac{Adh}{\sqrt{h} + \sqrt{h+a}} \; , \tag{4}$$

где

$$A = \frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \; . \tag{5}$$

Поэтому

$$dt = \frac{A}{a}\left(\sqrt{h} - \sqrt{h+a}\right)\ dh \tag{6}$$

и после интегрирования будем иметь:

$$t = \frac{2A}{3a}\left[h^{3/2} - (h+a)^{3/2}\right] + C\,. \tag{7}$$

Здесь C - постоянная интегрирования. Так как $t = 0$, $h = H_0$. поэтому окончательно получим:

$$t = \frac{2A}{3a}\left[(H_0 + a)^{3/2} - (h+a)^{3/2} - \left(H_0{}^{3/2} - h^{3/2}\right)\right]. \tag{8}$$

Время, в течение которого свободная поверхность жидкости достигнет уровня нижнего отверстия, т.е. когда $h = 0$, равняется:

$$T = \frac{2A}{3a}\left[(H_0 + a)^{3/2} - a^{3/2} - H_0{}^{3/2}\right], \tag{9}$$

или

$$T = \frac{2A}{3a}H_0{}^{3/2}\left[\left(1 + \frac{a}{H_0}\right)^{3/2} - \left[1 + \left(\frac{a}{H_0}\right)^{3/2}\right]\right]. \tag{10}$$

Если $a \ll H_0$, тогда выражения в скобках можно разложить согласно следующей формуле [2]:

$$(1+x)^{3/2} = 1 + \frac{3}{2}x + \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{4}x^2 - \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{6}x^3 + \ \ldots \tag{11}$$

где $x = \dfrac{a}{H_0}$ и ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$T = \frac{2A}{3a}H_0^{3/2}\left[\frac{3a}{2H_0} - \left(\frac{a}{H_0}\right)^{3/2}\right], \tag{12}$$

что в пределе, когда $a \to 0$, приводит к классической формуле истечения, когда оба отверстия находятся на одном уровне, т.е.

$$\lim_{a\to 0} T = \lim_{a\to 0}\left[A\sqrt{H_0} - \frac{2A}{3}\sqrt{a}\right] = A\sqrt{H_0}\ . \tag{13}$$

Рассмотрим случай, когда площади отверстий различны друг от друга $\omega_1 \neq \omega_2$ и $\mu_1 \neq \mu_2$. Естественно, что ход рассуждения аналогичен выше приведенному. Поэтому будем иметь:

$$\begin{cases} Q_1 = -\mu_1\omega_1\sqrt{2gH}\,; \\ Q_2 = -\mu_2\omega_2\sqrt{2g(h+a)}. \end{cases} \tag{14}$$

$$\Omega\ dh = -(Q_1 + Q_2)dt\,; \tag{15}$$

$$\Omega\ dh = -\sqrt{2g}\left(\mu_1\omega_1\sqrt{h} + \mu_2\omega_2\sqrt{h+a}\right)\,dt\,; \tag{16}$$

$$dt = -\frac{\Omega\ dh}{\sqrt{2g}\left(\mu_1\omega_1\sqrt{h} + \mu_2\omega_2\sqrt{h+a}\right)}; \tag{17}$$

$$t = -\frac{\Omega}{\mu_1\omega_1\sqrt{2g}}\int\frac{dh}{\sqrt{h} + \dfrac{\mu_2\omega_2}{\mu_1\omega_1}\sqrt{h+a}} + C\,; \tag{18}$$

Обозначим

$$M = \frac{\Omega}{\mu_1\omega_1\sqrt{2g}}\,; \tag{19}$$

$$N = \frac{\mu_2\omega_2}{\mu_1\omega_1}\,, \tag{20}$$

тогда

$$t = -M\int\frac{dh}{\sqrt{h} + N\sqrt{h+a}} + C\,. \tag{21}$$

Окончательно, после интегрирования и определения постоянных, получим:

$$\begin{aligned} t = {} & \frac{2M\sqrt{h}}{1-N^2} + \frac{N^2Ma}{1-N^2}\,\frac{2}{\sqrt{-N^2a(1-N^2)}}\,arctg\,\frac{(1-N^2)\sqrt{h}}{\sqrt{-N^2a(1-N^2)}} - \\ & -\frac{2MN\sqrt{h+a}}{1-N^2} - \frac{aMN}{1-N^2}\,\frac{2}{\sqrt{-a(1-N^2)}}\,arctg\,\frac{(1-N^2)\sqrt{h+a}}{\sqrt{-a(1-N^2)}} - \\ & -\frac{2M\sqrt{H_0}}{1-N^2} - \frac{N^2Ma}{1-N^2}\,\frac{2}{\sqrt{-N^2a(1-N^2)}}\,arctg\,\frac{(1-N^2)\sqrt{H_0}}{\sqrt{-N^2a(1-N^2)}} + . \\ & +\frac{2MN\sqrt{H_0+a}}{1-N^2} - \frac{aMN}{1-N^2}\,\frac{2}{\sqrt{-a(1-N^2)}}\,arctg\,\frac{(1-N^2)\sqrt{H_0+a}}{\sqrt{-a(1-N^2)}}. \end{aligned} \tag{22}$$

Когда $N > 1$.

$$t = \frac{2M\sqrt{h}}{1-N^2} + \frac{N^2Ma}{1-N^2}\frac{1}{\sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}}ln\frac{\left(1-N^2\right)\sqrt{h} - \sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}}{\left(1-N^2\right)\sqrt{h} + \sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}} -$$

$$-\frac{2MN\sqrt{h+a}}{1-N^2} + \frac{aMN}{1-N^2}\frac{1}{\sqrt{a\left(1-N^2\right)}}ln\frac{\left(1-N^2\right)\sqrt{h+a} - \sqrt{a\left(1-N^2\right)}}{\left(1-N^2\right)\sqrt{h+a} + \sqrt{a\left(1-N^2\right)}} -$$

$$-\frac{2M\sqrt{H_0}}{1-N^2} - \frac{N^2Ma}{1-N^2}\frac{1}{\sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}}ln\frac{\left(1-N^2\right)\sqrt{H_0} - \sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}}{\left(1-N^2\right)\sqrt{H_0} + \sqrt{N^2a\left(1-N^2\right)}} + \quad (23)$$

$$+\frac{2MN\sqrt{H_0+a}}{1-N^2} - \frac{aMN}{1-N^2}\frac{1}{\sqrt{a\left(1-N^2\right)}}ln\frac{\left(1-N^2\right)\sqrt{H_0+a} - \sqrt{a\left(1-N^2\right)}}{\left(1-N^2\right)\sqrt{H_0+a} + \sqrt{a\left(1-N^2\right)}}.$$

Когда $N < 1$.

Перейдем к решению второй части задачи. Допустим, что нижнее отверстие не работает. Тогда исходя из классической гидравлики [1], время опорожнение жидкости от свободной поверхности до отметки нижнего отверстия, равняется:

$$t_1 = A_1\sqrt{H_0}\ . \tag{24}$$

Допустим, что работает только нижнее отверстие. Тогда время которое требуется для опорожнения (выпуска) того же объема (т.е. время в течение которого свободная поверхность достигает отметки верхнего отверстия), [1]:

$$t_2 = A_2\left(\sqrt{H_0 + a} - \sqrt{a}\right). \tag{25}$$

Величины A_1 и A_2 входящие в выражения (24) и (25), равняются:

$$\begin{cases} A_1 = \dfrac{\Omega}{\mu_1\omega_1\sqrt{2g}}; \\ A_2 = \dfrac{\Omega}{\mu_2\omega_2\sqrt{2g}}. \end{cases} \tag{26}$$

Очевидно, что когда работают оба отверстия, тогда вышедшие объемы W_1 и W_2, обратно пропорциональны рассмотренному времени, т.е.:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{W_2}{W_1}; \tag{27}$$

К этому уравнению добавляется еще одно очевидное уравнение:

$$W_1 + W_2 = \Omega(H_0 + a). \tag{28}$$

Решим систему (27) и (28) относительно W_1. Получим:

$$W_2 = \Omega(H_0 + a) - W_1; \tag{29}$$

Отсюда:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\Omega(H_0 + a) - W_1}{W_1} = \frac{\Omega(H_0 + a)}{W_1} - 1; \tag{30}$$

$$W_1 = \frac{\Omega(H_0 + a)}{1 + \dfrac{t_1}{t_2}}. \tag{31}$$

Внесем значения t_1 и t_2 из выражений (24) и (25) в (21), получим: -

$$W_1 = \frac{\Omega(H_0 + a)}{1 + \dfrac{A_1}{A_2}\dfrac{\sqrt{H_0}}{\sqrt{H_0 + a} - \sqrt{a}}}. \tag{32}$$

В том случае, когда отверстия одинаковы, тогда $A_1 = A_2$ и получим:

$$W_1 = \frac{\Omega(H_0 + a)}{1 + \dfrac{\sqrt{H_0}}{\sqrt{H_0 + a} - \sqrt{a}}}. \tag{33}$$

Вывод. Полученные результаты дают возможность проиграть все возможные сценарии аварийной утечки нефти из нефтепровода.

Summary

It is impossible, to exclude the casual effects for installation of oil pipelines from modern materials and on optimum technology. The special attention demand such sides of the principle oil pipelines, which are laid on district with high risk-factor, for example, in such as health-resort zones, river crossings, affinity to water areas, environment rich with mineral waters and etc. Even small quantity of oil spillage in environment can cause irreversible environmental processes. In this connection, the hydraulic task (fluid problem) is considered at the expiration of a product from the main pipeline, in case of outlets (expirations) from two apertures. Analytical decisions are received as a result.

1.Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И.. Гидравлика. М., Л., Госэнергоиздат. 1954. 2.Бронщтейн И.Н., Семендяев К.А., Справочник по математике. М., Наука, Лейпциг, Тойбнер. 1981