

Моделирование переходных процессов, происходящих в морском трубопроводе при перекачке углеводородов

Т.И. Лаптева

к.т.н., зам. начальника лаборатории

T_Lapteva@vniigaz.gazprom.ru

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия

Изложены результаты теоретического исследования переходных процессов в морском трубопроводе при закрытии/открытии элементов запорно-регулирующей арматуры, что также может быть применено и для определения мест утечек извлекаемого продукта в колоннах насосно-компрессорных труб в результате коррозионного или иного их разрушения. Исследованы свойства характеристик потока в трубопроводе при образовании волны скорости и давления.

Материалы и методы

На основе численного решения телеграфных уравнений было смоделировано течение перекачиваемого продукта в морском трубопроводе при закрытии/открытии элементов запорно-регулирующей арматуры.

Ключевые слова

переходные процессы, волновой характер движения, приведенный коэффициент линейного трения, волна разрежения, скачок скорости или давления, запорно-регулирующая арматура, амплитуда скорости

Длительный срок эксплуатации и повышение требований к экологической безопасности объектов морского трубопроводного транспорта нефти и газа ставят в ряд важнейших задач вопросы обеспечения их надежной и безотказной работы, предупреждения и снижения количества аварийных ситуаций, разработки эффективных методов ликвидации последствий аварий. Среди них важное значение имеет задача обнаружения и определения места повреждения морских трубопроводов, обусловленная:

1. значительными загрязнениями поверхности суши и водной среды;
2. увеличением числа незаконных врезок и хищений нефтепродуктов;
3. крупными затратами на производство ремонтных работ и ликвидацию последствий утечек углеводородов.

Эти причины выдвигают высокие требования к системам обнаружения утечек для различных условий эксплуатации:

- оперативность (быстродействие);
- высокая чувствительность;
- точность определения места утечки;
- надежность и достоверность автоматического обнаружения в режиме «online»;
- отсутствие воздействия помех на режимы обнаружения;
- экономичность.

Системы обнаружения утечек на трубопроводах подразделяются на программные и аппаратные системы. В рамках программных систем проводится сбор данных с датчиков, которые обычно используются при эксплуатации трубопроводов (датчики давления, температуры, расхода) для обнаружения и локализации потенциальных утечек на основании программных алгоритмов. В аппаратных системах для мониторинга утечек используются датчики, не связанные с обычным процессом эксплуатации трубопроводов.

Существует четыре принципиально различных подхода к решению задачи контроля утечек [1, 2]:

1. Регистрация на концах контролируемого участка волны разрежения, возникающей в момент возникновения утечки, даёт достаточно высокую чувствительность метода (1,5÷3 % от номинального расхода), время регистрации (5÷10 мин) и низкую погрешность определения места утечки (500÷1000 м на участке 100 км) [3]. Однако метод требует постоянного мониторинга давлений. Время затухания волн давления соизмеримо со временем регистрации.
2. Барокорреляционный принцип гидравлической локации утечек [4] заключается в восстановлении линии пьезометрических уклонов на контролируемом участке трубопровода по показаниям манометров, позволяющий устойчиво регистрировать утечку в 5÷10 % от номинального расхода, имеет низкую погрешность определения места утечки (1500÷2000 м на 100 км

участке), позволяет опрашивать датчики давления поочередно в периодическом режиме, что снижает стоимость системы. Однако метод требует достаточное количество работающих датчиков, даёт ложное срабатывание при возникновении самотёчных участков, смене реологических свойств продукта и движении инородного тела внутри трубы с потоком жидкости и имеет низкую чувствительность. Тем не менее, барокорреляционный принцип применяется повсеместно во всех современных технологиях диагностики утечек совместно с другими методами вследствие хорошей точности в определении места утечки и низкой стоимости аппаратных и программных средств [5, 6].

3. Акустический способ обнаружения утечки основан на регистрации характерного шума в ультразвуковом диапазоне, возникающем при истечении струи под давлением. Акустический способ является достаточно точным (1÷5 м) и дорогим методом определения места утечки, он требует дорогостоящих датчиков с периодичностью установки 100...300 м по длине трубопровода, а так же специализированной линии и технических средств обработки информации. Он нашел своё применение в современных проектах в США при мониторинге подводных переходов [6].
4. Дифференциальный метод сведения баланса расходов на участке трубопровода, оборудованном по концам расходомерами, – самый точный из всех известных методов, способный регистрировать «малые» утечки (меньше 1%) [7, 8].

В работе [9] на основе численного решения математической модели изменения давления в трубопроводе в виде телеграфного уравнения была получена система уравнений, позволяющая обнаружить при неустановившихся режимах течения перекачиваемого продукта появление малых утечек, возникающих, если давление в окружающей трубопровод среде меньше давления внутри трубопровода. Так как в процессе истечения через трещину происходит вынос некоторой массы и количества движения, то, согласно закону сохранения, должно происходить изменение массы и количества движения жидкости, оставшейся внутри трубопровода. Эти изменения приводят к тому, что вниз и вверх по потоку начнут распространяться волны разрежения, форма, амплитуда которых существенно зависят от размера и скорости роста размера трещины, коэффициента поглощения волны при распространении в перекачиваемом продукте, расстояния трещины до установленных на концах трубопровода датчиков, разности давлений внутри и вне трубопровода, а также других факторов.

В данной статье на базе расчетных соотношений [9–11] рассматривается решение

важной для транспортировки продуктов по морским трубопроводам задачи, определяемой закрытием/открытием элементов запорно-регулирующей арматуры, заполнением танков при танкерном транспорте углеводородов, поскольку одной из основных причин возникновения гидроударных явлений является закрытие запорно-регулирующей арматуры [12]. Процесс закрытия/открытия задвижек по физической сути соответствует образованию утечки в трубопроводе.

Пусть в сечении $x=0$ расположена задвижка, разделяющая технологический трубопровод, сооруженный из различного рода труб, в частности, из металлопластмассовых труб, [13] от другого трубопровода, являющегося ответвлением. На другом конце $x=l$ второго трубопровода расположены емкости, которые необходимо заполнить перекачиваемой средой. Рассмотрим переходные (нестационарные) процессы, протекающие во втором трубопроводе после того, как началось открытие задвижки. Из [14] известно, что волновой характер движения сохраняется вплоть до $al/c=0,5$, где a – приведенный коэффициент линейного трения; c – скорость звука в перекачиваемой среде. При $l=2 \times 10^4$ м, $c=1300$ м/с и $a=0,0308$ 1/с значение величины al/c составляет 0,43, то есть неустановившееся движение перекачиваемой среды будет носить волновой характер.

При небольшом затухании в основных дифференциальных уравнениях (17) [9]

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + 2aw \right) \\ -\frac{\partial p}{\partial t} &= \rho c^2 \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

слагаемое затухания $2a(\rho w)$ можно опустить и рассматривать более простую систему:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w), \\ -\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial}{\partial x}(\rho w), \end{cases} \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости или газа;

p – среднее давление в сечении;

t – время;

w – средняя в сечении скорость.

Эти уравнения сводятся к уравнению малых поперечных колебаний

$$-\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho w) = c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\rho w), \quad (3)$$

общее решение которого можно быть представлено в виде суммы двух волн – прямой и обратной:

$$\rho w = f_1 \left[t - \frac{x}{c} \right] + f_2 \left[t + \frac{x}{c} \right], \quad (4)$$

где f_1, f_2 – произвольные функции времени, равные нулю при $t=0$.

Тогда направо пойдет волна, которая, дойдя до открытого конца, должна отразиться как волна разрежения с той же амплитудой, что и прямая. Но первоначальное давление на $x=0$ близко к атмосферному, следовательно, минимальное давление в отраженной волне не может быть меньше нуля. Поэтому условие равенства нулю избыточно, по отношению к стационарному, давления, принимаемое в классических работах,

в рассматриваемом случае не выполняется: выход на стационарный режим осуществляется монотонно. Наличие отраженной волны приведет, с одной стороны, к некоторому увеличению амплитуды скорости «утечки», а с другой – к уменьшению амплитуды давления. Следует отметить, что волна разрежения проследует далее в технологический трубопровод, вызывая в нем падение давления.

Другим фактором, существенно влияющим на работу системы, является наличие в емкостях, которые необходимо наполнить, некоторого объема перекачиваемой среды. Тогда отверстие задвижки вблизи емкостей будет являться источником волн, которые гасятся пропорционально l/r , так что ударное давление, попадая в емкость, гасится в отношении $2h_0/D$, где h_0 – первоначальное значение высоты перекачиваемой среды в емкости, r – радиус трубопровода; для $h_0=3$ м, $D=0,3$ м имеем $2h_0/D=20$, т.е. амплитуда ударной волны давления уменьшается в 20 раз. Таким образом, без большой погрешности можно считать, что отражения волны от конца с емкостями не существует, то есть полагать, что трубопровод бесконечно длинный. Это заключение приводит к выводу, что можно пользоваться формулами волн давления и скорости из [9, 10]:

$$p(x,t) = \rho c \begin{cases} 0, 0 \leq t \leq \frac{x}{c}, \\ \psi \left(t - \frac{x}{c} \right) e^{-a \frac{x}{c}} + a \int_{\frac{x}{c}}^t \psi(t-\tau) e^{-a\tau} d\tau, t \geq \frac{x}{c}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\left[I_0 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2} + \frac{\tau I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2}} \right] d\tau, t \geq \frac{x}{c}, \quad (5)$$

$$w(x,t) = \begin{cases} 0, 0 \leq t \leq \frac{x}{c}, \\ \psi \left(t - \frac{x}{c} \right) e^{-a \frac{x}{c}} + a \frac{x}{c} \int_{\frac{x}{c}}^t \psi(t-\tau) e^{-a\tau} d\tau, \\ I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2} \\ \frac{\tau I_0 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{x}{c} \right)^2}} d\tau, t \geq \frac{x}{c}, \end{cases} \quad (6)$$

где I_0, I_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядков первого рода от мнимого аргумента.

Так как до открытия задвижки давление в трубопроводе одинаково по сечению и близко к атмосферному p_0 , иначе бы существовало движение, а в технологическом – отлично от нуля, то открытие задвижки в сечении $x=0$ для технологического трубопровода является ни чем иным, как образованием утечки. Тогда по технологическому трубопроводу начнут в обе стороны распространяться вверх и вниз по потоку волны разрежения (волна, распространяющаяся вниз, будет способствовать увеличению местной скорости, а вверх – уменьшению, то есть приращения скорости будут направлены противоположно), а по исследуемому трубопроводу – волна давления с перепадом $p_m - p_0$. Через $t_0=l/c$ секунд волна достигнет датчика, установленного в конце.

Скачок давления по мере распространения уменьшается из-за поглощения на стенках. Вблизи конца трубопровода его

величина равна $(p_m - p_0)_l = (p_m - p_0) e^{-(al/c)}$. Перекачиваемая среда в трубопроводе также придет в движение со скоростью тем большей, чем больше величина скачка давления.

Уравнение движения перекачиваемой среды через открывающуюся задвижку будет иметь вид:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \lambda \frac{\rho w^2}{2D_3}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$D_3 = D_3(t)$ – гидравлический радиус открытой части задвижки.

В начальные моменты времени, когда $Re < Re_{sp}$, где Re_{sp} – критическое число Рейнольдса, скорость будет расти пропорционально D_3^2 , а при $Re > Re_{sp}$ скорость будет расти пропорционально $D_3^{0,7}$, пока не будет достигнут $D_3 = D_{3max}$, после чего изменение D_3 прекратится.

Действительная картина, однако, будет отличаться от описанной, хотя бы потому, что процесс открытия задвижки не мгновенный, а происходит в течение некоторого промежутка времени. С другой стороны, появление утечки неизбежно будет способствовать тому, что давление вблизи задвижки со стороны технологического трубопровода начнет падать.

Опыт показывает, что давление у задвижки растет практически мгновенно, а затем начинает падать по закону

$$p = p_0 + (p_m - p_0) e^{-bt}, \quad (8)$$

где b – эмпирическая константа.

В зависимости от скорости открывания задвижки возможно различное поведение системы. Если скорость мала, то максимальное значение давления не достигается.

Если измерять давление и скорость в начале трубопровода, где $x=0$, тогда получаем, что

$$\begin{aligned} p(0,t) &= \rho c \left\{ \psi(t) + a \int_0^t \psi(t-\tau) e^{-a\tau} [I_0(a\tau) + I_1(a\tau)] d\tau \right\} = \\ &= \rho c \psi(t) \left\{ 1 + e^{at} [(1+2at) I_0(at) + 2at I_1(at)] \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$w(0,t) = \psi(t). \quad (10)$$

Допустим, что измеряем только давление. Тогда для сопоставления с экспериментом необходимо каждый раз вычислять выражение в квадратных скобках в правой части формулы (9). Измерение скорости по (10) сразу же дает результат.

Если функция $\psi(t)$ известна, то легко вычислить и скорость на другом конце трубопровода, где находятся емкости. Для этого случая согласно (6), имеем, что

$$w(l,t) = \begin{cases} 0, 0 \leq t \leq \frac{l}{c}, \\ \psi \left(t - \frac{l}{c} \right) e^{-a \frac{l}{c}} + a \frac{l}{c} \int_{\frac{l}{c}}^t \psi(t-\tau) e^{-a\tau} \left[I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2} + \frac{\tau I_0 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}} \right] d\tau, t \geq \frac{l}{c}. \end{cases} \quad (11)$$

К сожалению, функция $\psi(t)$ заранее не определена. Выход здесь видится в том, чтобы аппроксимировать ее аналитической функцией, чтобы ее дальнейшее поведение во времени было возможным предсказать после нескольких измерений в начале процесса. Действительно, в этом случае

$$\psi(t) = kt, \text{ нпу } t < t_k, x = 0, \quad (12)$$

$$\psi(t) = w_0 + (w_m - w_0)e^{-b(t-t_k)}, \text{ нпу } t > t_k, x = 0, \quad (13)$$

где $w_m = kt_k$.

На другом конце, где $x = l$, имеем

$$w(l, t) = 0 \text{ нпу } 0 \leq t \leq \frac{l}{c}, \quad (14)$$

$$w(l, t) = k \left(t - \frac{l}{c} \right) e^{-a \frac{l}{c}} + a \frac{l}{c} \int_{\frac{l}{c}}^t k(t-\tau) x e^{-a\tau} \frac{I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}} d\tau \text{ нпу } \frac{l}{c} < t < \frac{l}{c} + t_k, \quad (15)$$

$$w(l, t) = w_m e^{-a \frac{l}{c}} + a \frac{l}{c} \int_{\frac{l}{c}}^t k(t-\tau) e^{-a\tau} \frac{I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}} d\tau + a \frac{l}{c} \int_{t_k + \frac{l}{c}}^t (w_m - w_0) e^{-b(t-t_k) + b\tau - a\tau} \frac{I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} + t_k \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} + t_k \right)^2}} d\tau \text{ нпу } t > \frac{l}{c} + t_k. \quad (16)$$

Нестационарность, обусловленная быстрым открыванием задвижки в сечении $x=0$, не является единственной. По мере накопления перекачиваемой среды в емкости происходит быстрое закрытие задвижки первой емкости и открытие задвижки второй с заполнением последней.

Пусть первоначальный уровень перекачиваемой среды в первой емкости равен нулю. Тогда и давление в первой емкости равно нулю. Со временем высота столба перекачиваемой среды растет, растет и гидростатическое давление $\rho g z$, достигая $\rho g z_m$, где z_m — максимальная высота, достижимая в данной емкости. При подключении второй емкости происходит скачок давления, отрицательный, $\rho g(z_m - z_{02})$, начинается дальнейший рост уровня перекачиваемой среды и т.д. Время на переключение емкостей составляет несколько минут, то есть практически это есть скачок давления на конце $x=l$, будем иметь

$$\left. \begin{aligned} p(l, t) &= f(t), \\ \rho c w(l, t) &= f(t) + a \int_0^t f(t-\tau) x \\ & \times e^{-a\tau} [I_1(a\tau) - I_0(a\tau)] d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Если из второго уравнения найти и прибавить полученное выражение к значению скорости из (14-16), то получится результат, отражающий полную картину изменения скорости на открытом конце $x = l$.

Любой скачок скорости или давления, который произошел в каком-либо сечении трубопровода, распространяется по трубопроводу. В рассматриваемом случае скачок давления, связанный с переключением емкостей, распространяется в направлении сечения $x = 0$, тогда получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} p(0, t) &= f\left(t - \frac{l}{c}\right) e^{-a \frac{l}{c}} + a \frac{l}{c} \int_{\frac{l}{c}}^t f(t-\tau) e^{-a\tau} \frac{I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}} d\tau, \\ \rho c w(0, t) &= f\left(t - \frac{l}{c}\right) e^{-a \frac{l}{c}} + a \int_{\frac{l}{c}}^t f(t-\tau) e^{-a\tau} \left[\frac{I_1 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}}{\sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2}} - I_0 a \sqrt{\tau^2 - \left(\frac{l}{c} \right)^2} \right] d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Следовательно, скорость из последнего выражения должна быть прибавлена к выражению (12, 13).

Таким образом, полагая коэффициенты, входящие в уравнения, описывающие поток в трубопроводе, известными, и измеряя в реальном масштабе времени скорость и давление в разных точках трубопровода, и пользуясь вышеприведенными формулами, можно, в принципе, смоделировать течение перекачиваемого продукта в трубопроводе.

Зависимости скорости и давления от времени могут быть представлены графически в виде ломаных линий (рис. 1), где моменты запуска и переключения емкостей изображены скачками. Общими для всех осциллограмм является то, что существуют два режима, отличающиеся знаками производных: если режим течения определяется изменениями условий на входе, то все производные имеют одинаковый знак — режим I на рис. 1. В

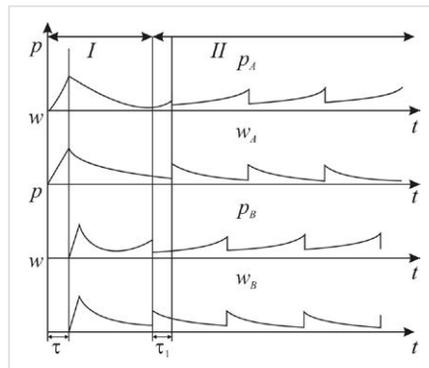


Рис. 1 — Зависимости характеристик потока (скорость и давление) от времени

остальное время — в режиме II — росту давления соответствует уменьшение скорости, и, наоборот, уменьшению давления — рост скорости. За исключением отрезка времени τ , необходимого для распространения сигнала от одного конца трубопровода до другого, в котором изменения скорости в точках, соответствующих началу (А) и концу (В) отрезка времени τ , совпадают. Наконец, в отрезке времени τ_1 , соответствующем времени переключения емкостей, знаки изменения w_A и w_B противоположны.

Исследуем свойства характеристик потока в трубопроводе при образовании волны скорости в сечении $x=0$.

Пусть скорость потока в начале трубопровода изменяется по линейному закону $w = kt$, где k есть константа, определяемая в начале открывания задвижки, определяется из условия $w_m = kt_k$. Спустя время t_k с начала открытия задвижки скорость достигает постоянного значения $w = w_m$. То есть изменение скорости в сечении $x = 0$ можно представить следующим образом:

$$w(0, t) = \begin{cases} kt, & t > 0 \\ w_m, & t \geq t_k \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 2 представлены вычисленные по формулам (14-16) графики скорости потока от времени для среды со следующими параметрами $a = 0,0156$ 1/с, $w_m = 2$ м/с на открытом конце трубопровода длиной $l = 2 \cdot 10^4$ м для различных значений k . На границах скорость начинает изменяться не с момента $t = 0$, а спустя $t_0 = l/c$. Характерно, что в интервале времени $t_0 \leq t < t_0 + t_k$ изменение скорости происходит по линейному закону. В момент $t = t_0 + t_k$ достигается значение скорости, близкое к $w_m e^{-a(l/c)}$ (штриховая линия — головное значение волны до изменения состояния задвижки). Видно, что чем медленнее открывается задвижка, тем больше отличается скорость от головного значения волны. В последующие моменты времени скорость растет во всех случаях, но никогда не достигает значения w_m , причем, чем больше k , тем большее значение скорости может быть достигнуто.

На рис. 3 показаны зависимости скорости от времени в сечении $x = l$ при $w_m = 2$ м/с, $k = 1/150$ м/с² для различных коэффициентов a . Из рисунка видно, что амплитуда скорости во всех случаях выше соответствующих головных значений, причем, чем больше коэффициент a , тем меньше головное значение скорости; эта разница тем больше, чем больше коэффициент поглощения. Следует также отметить, что на ускорение потока коэффициент поглощения не оказывает влияния, а воздействует лишь на амплитудные значения скорости: чем больше a , тем меньше значение скорости.

Зависимость скорости потока в различных сечениях трубопровода показана на рис. 4 для $a = 0,0308$ 1/с, $w_m = 2$ м/с, $k = 1/60$ м/с². Время t_0 , за которое волна достигает данного сечения, растет с ростом x . Угол наклона графиков остается неизменным по длине трубопровода, то есть ускорение потока от x не зависит. Значения скоростей больше в сечениях, наиболее близко расположенных к началу трубопровода, это объясняется меньшим влиянием поглощающего действия стенок.

Рассмотрим теперь поведение другой характеристики потока — давления. Скорость по-прежнему изменяется согласно (19). Вычисления давления проводились по формуле (12, 13). На рис. 5 представлены графики зависимостей давления потока в начале трубопровода для различных k и $a = 0,0249$ 1/с, $w_m = 2$ м/с. За промежуток времени $t < t_k$ рост давления происходит по линейному закону. В момент $t = t_k$ давление достигает значений, намного превышающих значение $p = \rho c w$, определенное по закону Жуковского. Чем меньше k , тем больших значений достигает давление к моменту $t = t_k$. При $t > t_k$ давление продолжает расти в течение 1000 с. В течение последующих 1000 с оно практически не изменяется, а затем неограниченно растет. Значения давления к моменту $t = t_k$ тем больше, чем меньше k . Рост давления при $t > t_k$ происходит таким образом, что через некоторое время достигается значение порядка 3 МПа, независимо от k . При $t > 2000$ с рост давления снова зависит от k : чем больше k , тем быстрее растет и давление.

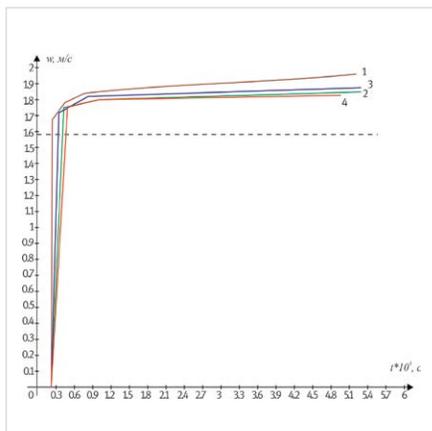


Рис. 2 — Зависимость скорости потока от времени на открытом конце трубопровода при линейном законе изменения скорости в сечении $x=0$
 $1 - k = 1/30$ м/с²; $2 - k = 1/90$ м/с²;
 $3 - k = 1/60$ м/с²; $4 - k = 1/150$ м/с²;
 - - - - - головное значение волны скорости;
 $a = 0,0156$ 1/с; $l/c = 14$ с; $w_m = 2$ м/с

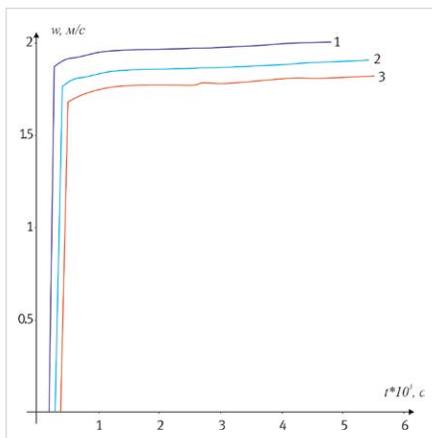


Рис. 4 — Зависимость скорости потока от времени при линейном законе изменения скорости в сечении $x=0$ для различных времен x/c
 $1 - x/c = 3,5$ с; $2 - x/c = 7$ с; $3 - x/c = 10,5$ с;
 $a = 0,0308$ 1/с;
 $k = 1/60$ м/с²; $w_m = 2$ м/с

Проанализированы в морском трубопроводе с запорно-регулирующей арматурой переходные процессы, вызываемые их закрытием/открытием. Поскольку при переходном процессе допускается 10% превышение давления над максимально-допустимым рабочим давлением, то решение поставленной задачи по моделированию потока в трубопроводе при закрытии/открытии задвижек на основе уравнений волн разряжения скорости и давления в соответствии с критериями, определяющими их тип, позволит в дальнейшем сформулировать рекомендации по предотвращению опасности превышения допустимых давлений трубопроводов, приводящих к их разрыву и тяжелым экологическим последствиям.

Итоги

Приведены расчетные значения для определения скорости и давления от времени, исследованы свойства характеристик потока в трубопроводе при образовании волн скорости и давления, вызванных закрытием/открытием задвижек.

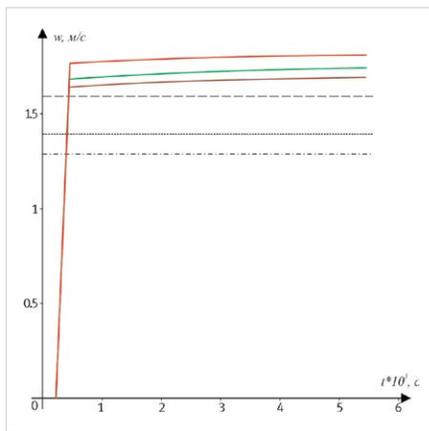


Рис. 3 — Зависимость скорости потока от времени на открытом конце трубопровода при линейном законе изменения скорости в сечении $x=0$ для различных коэффициентов a
 $1 - a = 0,0156$ 1/с; $2 - a = 0,0249$ 1/с;
 $3 - a = 0,0308$ 1/с;
 $4 -$ головное значение волны для $a = 0,0156$ 1/с; $5 - a = 0,0249$ 1/с;
 $6 - a = 0,0308$ 1/с; $k = 1/150$ м/с²; $w_m = 2$ м/с

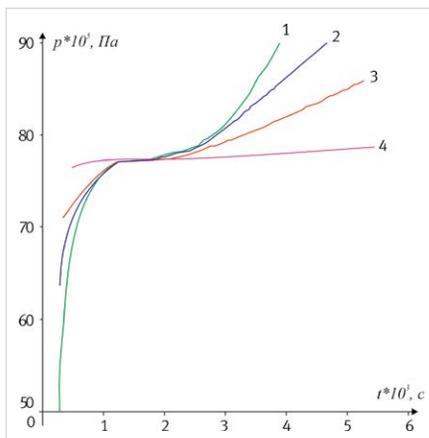


Рис. 5 — Зависимость давления потока от времени в начале трубопровода при линейном законе изменения скорости в сечении $x=0$
 $1 - k = 1/30$ м/с²; $2 - k = 1/60$ м/с²;
 $3 - k = 1/90$ м/с²; $4 - k = 1/150$ м/с²;
 $a = 0,0249$ 1/с; $w_m = 2$ м/с

Выводы

1. На основе полученных формул для морских трубопроводов с запорно-регулирующей арматурой проведен анализ переходных процессов, вызываемых их закрытием/открытием.
2. Полученные формулы дают возможность определить истинное место утечки извлекаемого продукта из насосно-компрессорных труб без подъема их из скважины, что приводит к уменьшению времени поиска утечек и удельных энергозатрат.
3. Необходимо в дальнейшем сформулировать рекомендации по предотвращению превышения допустимых давлений трубопроводов при закрытии/открытии элементов запорно-регулирующей арматуры.

Список литературы

1. Фармер Э.Дж. Испытание новой системы обнаружения утечек из трубопровода // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1993. № 6. С. 51–53.
2. Кутуков С.Е. Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов. М.: СИП РИЛ, 2002. 324 с.
3. Бусыгин Г.П. Эксплуатация системы контроля утечек в ОАО «Уралтранснефтепродукт» // Транспорт и хранение нефтепродуктов: НТС. М.: ЦНИИГЭнефтехим, 1999. № 9–10. С. 30–31.
4. Лурье М.В. Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов: НТС. М.: ЦНИИГЭнефтехим, 1998. № 12. С. 16–18.
5. Bose J.R., Olson M.R. TAPS's leak detection seeks greater precision // Oil & Gas J. 1993. Vol. 91.14. p. 43.44, 46–48.
6. Council T.L., Honey D.J., Cox M.L. Environmental solutions - key successful south Texas line installation // Oil & Gas J. 2000. Vol. 98.30. July 24. p. 70–72.
7. Куликов В.Д., Шитнев А.В., Яковлев А.Е., Антипов В.П. Промысловые трубопроводы. М.: Недра, 1994. 303 с.
8. Рахматуллин Ш.И., Гумеров А.Г., Ванфатова В.В. К оценке динамического баланса объемов нефти в трубопроводе с самотечными участками // Трубопроводный транспорт нефти. Приложение к журналу. 2001. № 3. С. 24–27.
9. Лаптева Т.И., Мансуров М.Н. Обнаружение утечек при неустановившемся течении в трубах // Нефтегазовое дело. 2006. №2. Режим доступа: <http://ogbus.ru/article/obnaruzhenie-utechek-pri-neustanovivshemsya-techenii-v-trubax/>
10. Лаптева Т.И. Моделирование процессов образования и обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегазовое дело. 2006. №2. Режим доступа: <http://ogbus.ru/article/modelirovanie-processov-obrazovaniya-i-obnaruzheniya-utechek-v-truboprovodax/>

11. Лаптева Т.И., Мансуров М.Н. Обеспечение устойчивости и конструктивной прочности морских подводных трубопроводов. Безопасность морских объектов: тезисы межд. науч.-техн. конф. М: ВНИИГАЗ, 2007. С. 109–110.
12. Арбузов Н.С. Обеспечение технологической безопасности

- гидравлической системы морских нефтеналивных терминалов в процессе налива судов у причальных сооружений (теория и практика): автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.26.02. Москва, 2015. 51 с.
13. Айдуганов В.М., Волкова Л.И., Лаптева Т.И. Опыт строительства и эксплуатации трубопроводов

- из металлопластмассовых труб // Нефтегазовое дело. 2006. №1. Режим доступа: <http://ogbus.ru/article/opyt-stroitelstva-i-ekspluatatsii-truboprovodov-iz-metalloplastmassovykh-trub/>
14. Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 300 с.

Simulation of the transient processes occurring in the offshore pipeline at hydrocarbons pumping

UDC 622.692.4

Author:

Tatiana I. Lapteva — Ph.D., deputy head of laboratory; T_Lapteva@vniigaz.gazprom.ru

"Gazprom VNIIGAZ" LLC, Moscow, Russian Federation

Abstract

Results of theoretical research of transient processes in the offshore pipeline are stated at closing/opening of shut-off-and-regulating fitting elements, that also it can be applied and to definition of places of leakages of taken product in tubing strings as a result of corrosion or other their destruction. Properties of characteristics of stream in the pipeline are investigated at formation of speed and pressure wave.

Materials and methods

On the basis of the numerical solution of the telegraphic equations the current of pumped-over product in the offshore pipeline has been simulated at closing/opening of elements of the locking regulating fitting.

Results

Calculated values for determination of speed and pressure from time are given, properties of characteristics of stream in the pipeline are researched at formation of waves of speed and pressure, the latches caused by closing/opening.

Conclusions

1. On the basis of the received formulas for offshore pipelines with the locking regulating fitting the analysis of the transient processes caused by their closing/opening is carried out.
2. The received formulas give the chance to define true place of leakage of taken product from pump and compressor pipes without lifting them from well

that leads to reduction of time of search of leaks and specific energy consumption.

3. It is necessary to formulate further recommendations about prevention of exceeding of allowable pressures of pipelines at closing/opening of elements of the locking regulating fitting.

Keywords

transient processes, wave-like behavior of motion, reduced factor of linear friction, depression wave, velocity or pressure jump, shut-off-and-regulating fitting, velocity amplitude

References

1. Farmer E.Dzh. *Ispytanie novoy sistemy obnaruzheniya utechek iz truboprovoda* [Trial of new pipeline's leak detection system]. Oil, gas and petrochemistry abroad, 1993, issue 6, pp. 51–53.
2. Kutukov C.E. *Informatsionno-analiticheskie sistemy magistral'nykh truboprovoda* [Information analysis system of major pipeline]. Moscow, SIP RIL, 2002, 324 p.
3. Busygin G.P. *Ekspluatatsiya sistemy kontrolya utechek v OAO «Uraltransnefteprodukt»* [Running of leak control system in "Uraltransnefteprodukt"]. *Transport i khranenie nefteproduktov: NTS*, Moscow: TsNIGEneftekhim, 1999, issues 9–10, pp. 30–31.
4. Lur'e M.V. Makarov P.S. *Gidravlicheskaya lokatsiya utechek nefteproduktov na uchastke truboprovoda* [Hydraulic localization of petroleum product's leak on pipeline section]. *Transport i khranenie nefteproduktov: NTS*, Moscow: TsNIGEneftekhim, 1998, issue 12, pp. 16–18.
5. Bose J.R., Olson M.R. TAPS's leak detection seeks greater precision // *Oil & Gas J.*, 1993, Vol. 91.14, pp. 43.44, 46–48.
6. Council T.L., Honey D.J., Cox M.L. Environmental solutions - key successful south Texas line installation // *Oil & Gas J.* 2000, Vol. 98.30, July 24, pp. 70–72.
7. Kulikov V.D., Shitnev A.V., Yakovlev A.E., Antip'ev V.P. *Promyslovye truboprovody* [Field pipelines]. Moscow: Nedra, 1994, 303 p.
8. Rakhmatullin Sh.I., Gumerov A.G., Vanfatova V.V. *K otsenke dinamicheskogo balansa ob'emov nefi v truboprovode s samotekhnymi uchastkami* [Estimation of oil volume in pipeline with gravity-flow sections]. *Truboprovodnyy transport nefi, Prilozhenie k zhurnal, 2001, issue 3, pp. 24–27.*
9. Lapteva T.I., Mansurov M.N. *Obnaruzhenie utechek pri neustanovivshemsya techenii v trubakh* [Detection of leaks in pipes with unsteady flow]. Oil and gas business, 2006, issue 2. Available at: <http://ogbus.ru/article/obnaruzhenie-utechek-pri-neustanovivshemsya-techenii-v-trubakh/>
10. Lapteva T.I. *Modelirovanie protsessov obrazovaniya i obnaruzheniya utechek v truboprovodakh* [Simulation of leak formation processes and leak detection in pipeline]. Oil and gas business, 2006, issue 2. Available at: <http://ogbus.ru/article/modelirovanie-processov-obrazovaniya-i-obnaruzheniya-utechek-v-truboprovodakh/>
11. Lapteva T.I., Mansurov M.N. *Obespechenie ustoychivosti i konstruktivnoy prochnosti morsikh podvodnykh truboprovodov* [Stability and structural strength of subsea flow line]. Safety of off-shore facility. International scientific technical conference, abstracts. Moscow: VNIIGaz, 2007, pp. 109–110.
12. Arbuзов N.S. *Obespechenie tekhnologicheskoy bezopasnosti gidravlicheskoy sistemy morsikh neftenalivnykh terminalov v protsesse naliva sudov u prichal'nykh sooruzheniy (teoriya i praktika)* [Technological safety of hydraulic system of marine oil-load terminals during ship's oil-loading in terminal (theory and practice)]. Extended abstract of dissertation. 05.26.02, Moscow, 2015, 51 p.
13. Ayduганov V.M., Volkova L.I., Lapteva T.I. *Opyt stroitel'stva i ekspluatatsii truboprovodov iz metalloplastmassovykh trub* [Experience of construction and operation pipelines from metal-plastic tubes]. Oil and gas business, 2006, issue 1. Available at: <http://ogbus.ru/article/opyt-stroitelstva-i-ekspluatatsii-truboprovodov-iz-metalloplastmassovykh-trub/>
14. Charnyy I.A. *Neustanovivshesya dvizhenie real'noy zhidkosti v trubakh* [Unsteady flow of real liquid in pipes]. Moscow: Nedra, 1975, 300 p.