

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВРЕЗОК В МАГИСТРАЛЬНЫЙ НЕФТЕПРОВОД

Латышев Л.Н., Насырова З.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Наиболее дешевым и высоконадежным видом транспорта нефти являются магистральные нефтепроводы, поэтому трубопроводный транспорт можно считать важнейшим элементом топливно-энергетического комплекса страны /1/.

Для надежного снабжения народного хозяйства нефтью, с обеспечением при этом экологической безопасности трубопроводного транспорта, необходимо, чтобы средства транспорта и хранения нефти соответствовали уровню добычи и переработки, экспортным потребностям и перспективам развития. С этой целью проводится полная телемеханизация магистральных нефтепроводов.

Одной из самых актуальных и сложных проблем эксплуатации магистральных нефтепроводов является проблема обнаружения несанкционированных врезок и утечек, предотвращения хищений нефти из магистральных трубопроводов /2/. Ее последствиями являются загрязнение окружающей среды, экономические потери (штрафы за загрязнение природной среды, затраты на ликвидацию повреждений труб, упущенная выгода) и увеличение сроков доставки топлива потребителям.

Сейчас для обнаружения врезок и утечек разработано большое количество методов /3/, основанных на различных физических законах и явлениях. В частности, такие как:

- метод понижения давления с фиксированной или скользящей уставкой;
- метод отрицательных ударных волн;
- метод сравнения расходов;
- радиоактивный метод;
- ультразвуковой метод (зондовый);
- метод акустической эмиссии;
- лазерный газоаналитический метод;
- визуальный метод;
- метод перепада давлений (зондовый);
- метод трассирующих газов;

- метод вихревых токов;
- комбинированный электромагнитный метод контроля;
- метод ударных волн Н.Е. Жуковского
- и другие.

Ни один из перечисленных методов обнаружения утечек не удовлетворяет полностью всем предъявляемым к ним требованиям.

Так, например, общепринятый способ обнаружения несанкционированного отбора продукта из трубопровода заключается в поиске мест вскрытия оболочки трубопровода путем обхода (визуальное обследование) трассы, где проходит трубопровод /4/. Хорошо, если трубопровод лежит на поверхности, но большинство из них находятся под землей и вполне понятно, что данный способ не позволяет надежно выявить места несанкционированных врезок по причине их скрытости. А применяющиеся устройства электромагнитного обследования не всегда эффективны, поскольку отрезки и диаметры врезок в стенку трубопровода на фоне его большого диаметра и массы не позволяют их ощутить методами радиолокации. Метод, основанный на измерении давления жидкости в трубопроводе, в силу инерционности среды, не обеспечивает минимального времени обнаружения утечки с момента ее образования, имеет высокую вероятность ложных срабатываний, требует значительного количества датчиков, устанавливаемых в нефтепроводе. Метод сравнения расходов, основанный на измерении веса (количества) продукта на входе и выходе участка продуктопровода, не может учесть переходных процессов при включении и выключении МНА НПС; требует длительной статистической обработки данных, что увеличивает время обнаружения утечки с момента повреждения трубопровода.

С помощью существующих методов контроля утечек сложно обнаружить несанкционированные врезки из-за их кратковременности и малых объемов утечек, не обеспечивается требование оперативности. Средства и системы для обнаружения врезок являются дорогостоящими из-за использования высокоточной аппаратуры и средств телемеханики, но они себя оправдывают.

В данной работе предложена система обнаружения несанкционированных врезок в магистральный нефтепровод, основанная на измерении и анализе

возникающих при воздействии на металл трубы акустических возмущений /4/. Она предназначена для сигнализации факта осуществления несанкционированной врезки и определения ее приблизительного места. Приведем ниже описание данного метода.

При попытке создания врезки в металле трубы в результате механического воздействия возникают акустические возмущения, которые распространяются по трубе как по волноводу, скорость распространения звука в тяжелых и прочных металлах составляет приблизительно 4800 м/с. Продольная составляющая деформации волны в меньшей степени зависит от структуры среды поглощения и будет иметь затухание порядка 10 дБ на км. Это дает возможность оценить коэффициент затухания в 50...70 дБ. Частотный диапазон оценивается как 10...7000 Гц (первая область) и 18...22 кГц (вторая область).

Данная система может быть реализована на базе существующей системы телемеханики с использованием уже имеющихся оборудования и аппаратуры. Структурно система обнаружения врезок (рисунок 1) состоит из трех уровней. Информацией для обнаружения врезок являются показания первичных преобразователей ПП, например акустических пьезодатчиков, которые крепятся непосредственно на трубе (нижний уровень). Они преобразуют механическую энергию ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Обязательными условиями являются: наличие сигналов с обоих датчиков; значение сигналов должно превышать допустимый уровень шумов, которые могут быть вызваны факторами окружающей среды, работой технологического оборудования (в основном, вибрацией насосных агрегатов). Далее этот сигнал через вторичный преобразователь ВП подается в соответствующий модуль программируемого логического контроллера ПЛК, установленного в контрольном пункте КП вдоль трассы магистрального нефтепровода (средний уровень). Затем оба сигнала поступают в ЭВМ автоматизированного рабочего места АРМ диспетчера, которое расположено в районном диспетчерском пункте РДП (верхний уровень). При этом передаваемый на АРМ диспетчера информационный пакет содержит указание времени события, так как контроллеры позволяют производить синхронизацию часов реального времени. В диспетчерском пункте отображается время события и номера двух соседних контролируемых пунктов, ПЛК которых

зафиксировали факт врезки. Далее на РДП по специальной программе осуществляется вычисление места нахождения события и его индикация на мониторе АРМ диспетчера.

Информативным параметром сигнала, поступающего в РДП, может являться как время прихода сигнала от ПЛК в РДП, так и его интенсивность (амплитуда).

В первом случае координата места врезки в РДП определяется по разности прихода во времени сигнала от двух ближайших к месту врезки КП с учетом длины участка нефтепровода между ними.

$$\begin{cases} l_1 + l_2 = l, \\ l_1 - l_2 = V \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

где Δt – разность прихода во времени сигналов t_1 и t_2 от двух ближайших КП. При $t_2 > t_1$, место врезки находится ближе к КП1;

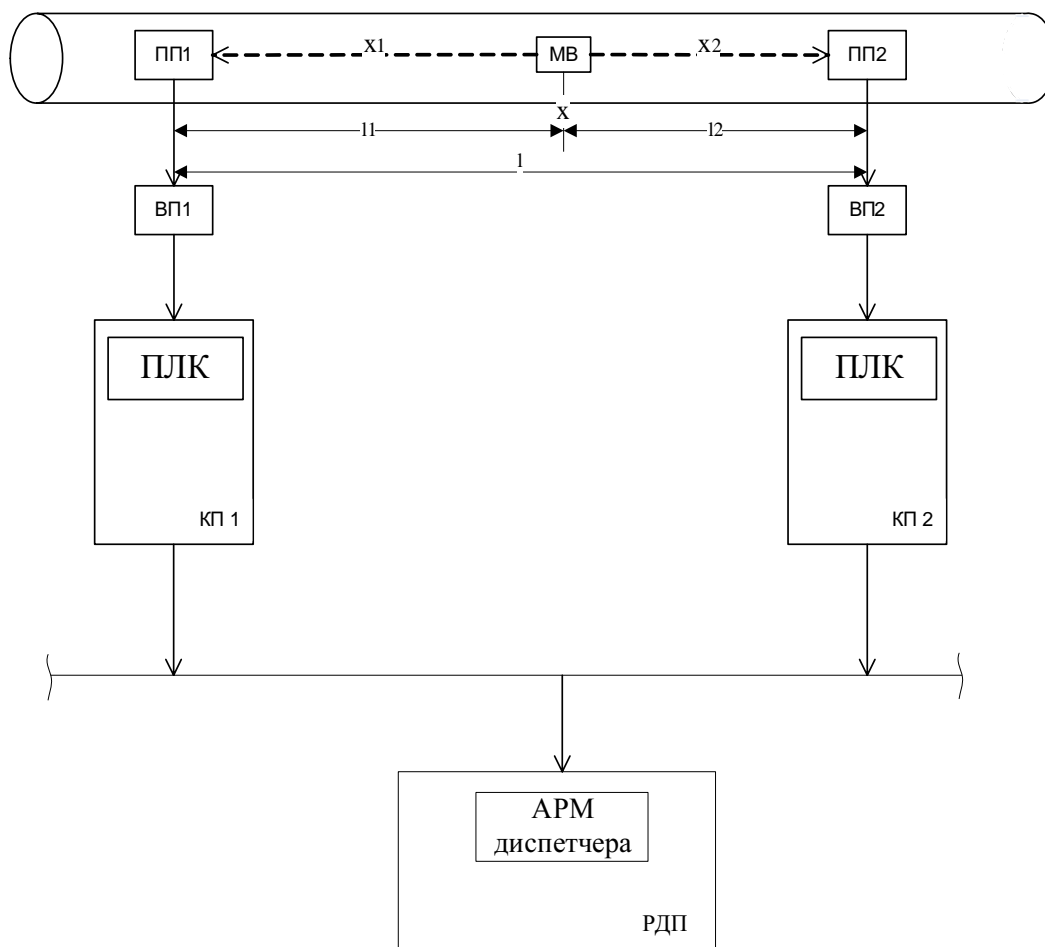
V – скорость распространения звука в металле трубы. Вообще она известна, но ее точное значение для каждой конкретной трубы определить сложно. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать ее как возмущающее воздействие (неизвестную величину, препятствующую вычислению координаты места врезки).

Во втором случае, когда информативным параметром является интенсивность сигнала, нужно учитывать коэффициент затухания акустических колебаний в металле трубы и скорость их распространения, а также коэффициент преобразования первичных и вторичных преобразователей a .

$$\begin{cases} x_1 = (l - x) \cdot f \cdot a, \\ x_2 = x \cdot f \cdot a \end{cases} \quad (2)$$

где x – координата места врезки, примем, что она отсчитывается от первого КП,

f – возмущающее воздействие, обусловленное невозможностью точного определения скорости распространения звука в металле и затуханием электрических колебаний.



x_1, x_2 – сигнал о врезке, воспринимаемый ПП; x – координата места врезки; l_1, l_2 – расстояния от места врезки до первого и второго ПП (КП),
 l – длина участка между двумя соседними КП.

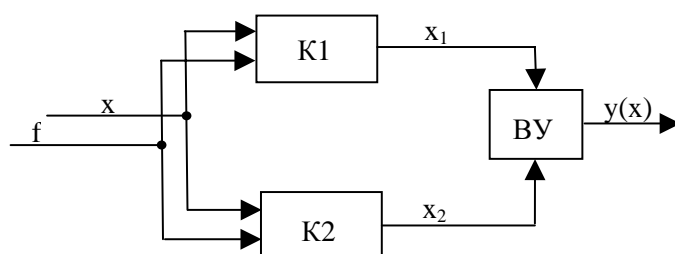
Рисунок 1 – Структурная схема системы обнаружения врезок

Но вне зависимости от того, что является информативным параметром сигнала, на первичный преобразователь, кроме измеряемой величины (механической энергии звуковых колебаний), будет влиять ряд возмущающих воздействий. Для их компенсации при проектировании измерительных и вычислительных устройств используется теория инвариантности /5/, основным принципом которой является принцип многоканальности передачи возмущения. Его суть заключается в следующем: для достижения инвариантности какой-либо координаты $x(t)$ измерительного устройства от влияющего на него возмущающего воздействия необходимо наличие как минимум двух каналов передачи этого возмущения от точки его приложения до точки, в которой производится измерение данной координаты (выходной координаты) устройства. Этот принцип

позволяет получить высокую точность измерения, снизить требования к стабильности узлов этих устройств и устранить влияние на точностные показатели возмущающих воздействий, включая и те, при которых одноканальные измерительные устройства (ИУ) практически теряют работоспособность.

На рисунке 2 приведена структурная схема измерительного устройства, включающего в себя первичные преобразователи (ПП) и вычислительное устройство (ВУ).

В соответствии с принципом многоканальности вычисление координаты места несанкционированной врезки ведется по двум каналам.



$K1, K2, K3$ – каналы измерения координаты x , ВУ – вычислительное устройство,
 f – возмущающие воздействия, x – измеряемая величина,
 x_1 – сигнал, поступающий от первого канала, x_2 – сигнал, поступающий от второго канала.

Рисунок 2 – Структурные схемы разомкнутых инвариантных ИУ

В акустическом методе обнаружения врезок по времени для определения места врезки используется разность во времени прихода сигналов от ближайших к месту события КП. На первичный преобразователь воздействуют следующие возмущения:

- коэффициент затухания акустических колебаний в металле трубы,
- скорость распространения звука в металле при эксплуатации трубопровода (меняющиеся условия эксплуатации);
- вид энергетического воздействия на металл трубы (интенсивности) при совершении врезки, то есть акустическая продольная волна, которая вызывает в металле трубы деформацию.

Для компенсации их влияния выберем, согласно теории инвариантности, инвариантное измерительное устройство. В нашем случае каждый канал

физически представляет собой совокупность материала трубы, датчика (первичного преобразователя ПП) и вторичного преобразователя. Первый канал К1 является непосредственно измерительным каналом и измеряет акустический сигнал, а второй канал – калибровочный, применяется для исключения влияния возмущающих воздействий. Для калибровки создают специальное направленное механическое воздействие на трубу, которое вызывает акустическое возмущение в металле трубы.

По данной структурной схеме (рисунок 2) могут быть выведены выражения, отражающие зависимость поступающих в ВУ сигналов от измеряемой величины и возмущений /5/:

$$\begin{aligned}x_1 &= F_1(x, f) \text{ в канале К1,} \\x_2 &= F_2(x, f) \text{ в канале К2,} \\(x) &= F(x_1, x_2).\end{aligned}\tag{3}$$

Но при решении системы уравнений, полученной с использованием метода инвариантности, необходимо проверить (согласно теореме Крамера) основной определитель на равенство нулю. Система имеет решение и не вырождается в однородное уравнение, если основной определитель не равен нулю. Следовательно, она подходит для описания измерительного устройства.

Сначала определяем разность прихода во времени сигналов Δt_1 с двух ближайших КП:

$$x_1 = \Delta t_1 = t_1 - t_2,\tag{4}$$

где Δt_1 – сигнал первого канала, являющийся временным интервалом (x_1 на рисунке 2), мс;

t_1 – время прихода сигнал о врезке от первого КП;

t_2 – время прихода сигнал о врезке от второго КП.

Затем определяется время прохождения сигнала Δt_2 по всей длине нефтепровода L со скоростью распространения звука в металле V , измеренное в результате калибровки:

$$x_2 = \Delta t_2 = \frac{L}{V},\tag{5}$$

где Δt_2 – сигнал второго канала, являющийся временным интервалом (x_2 на рисунке 2), мс;

Калибровка должна проводиться с заданной периодичностью (например, один раз в сезон) при конкретных фиксированных условиях эксплуатации.

Пусть координата x отсчитывается от первого КП. Тогда расстояние от места врезки до второго КП равно $(L-x)$ и, значит, разница расстояний от места врезки до двух ближайших КП определяется как

$$x - (L - x) = \Delta t_1 \cdot V ; \quad (6)$$

значение искомой координаты – расстояние от КП с меньшим номером:

$$x = \frac{1}{2} \cdot (L - \Delta t \cdot V). \quad (7)$$

Как видим, последнее выражение содержит значение скорости звука в металле, которое является возмущением:

$$f = \frac{1}{V}, \quad (8)$$

где f – возмущающее воздействие, обусловленное невозможностью точного определения скорости распространения звука в металле.

Подставим последнее выражение в формулы (4) и (5):

$$x_1 = \Delta t_1 = t_1 - t_2 = \frac{x}{V} - \frac{L - x}{V} = fx - fL + fx = 2fx - fL, \quad (9)$$

$$x_2 = \Delta t_2 = Lf. \quad (10)$$

Оба сигнала x_1 и x_2 поступают в вычислительное устройство, в нашем случае – процессорный модуль контроллера, где происходит вычисление m отношения величин сигналов:

$$m = \frac{x_1}{x_2} = \frac{2fx - fL}{Lf} = \frac{2x - L}{L}. \quad (11)$$

Из формулы (11) получаем выражение для определения координаты x :

$$x = \frac{L}{2} \cdot (m + 1), \quad (12)$$

где $m < 1$.

При этом удается освободиться от влияния возмущающего воздействия.

Алгоритм действий над сигналами задается программно.

Для акустического метода обнаружения врезок по затуханию (интенсивности) сигнала структурная схема измерительного устройства будет выглядеть аналогично выше описанному (рисунок 1). Возмущающими воздействиями являются:

- коэффициент затухания акустических колебаний в металле трубы,
- вид энергетического воздействия на металл трубы при совершении врезки.

В данном случае сигнал от первого канала:

$$x_1 = (L-x)fa, \quad (13)$$

сигнал от второго канала:

$$x_2 = xfa, \quad (14)$$

где $a = K_{пп} \cdot K_{вп}$ – постоянный коэффициент, одинаковый для обоих каналов,

$K_{пп}$ – коэффициент преобразования первичного преобразователя,

$K_{вп}$ – коэффициент преобразования вторичного преобразователя.

Оба сигнала x_1 и x_2 поступают в вычислительное устройство, в котором последовательно производятся следующие действия:

- а) сложение значений сигналов x_1 и x_2

$$x_1 + x_2 = (L-x)fa + xfa = Lfa - xfa + xfa = Lfa; \quad (15)$$

- б) деление x_2 на сумму значений сигналов x_1 и x_2

$$m = \frac{x_2}{x_1 + x_2} = \frac{xfa}{Lfa} = \frac{x}{L}, \quad (16)$$

таким образом удастся освободиться от влияния возмущающего воздействия f ;

- в) вычисление значения x

$$x = mL, \quad (17)$$

где $m < 1$.

Своевременное обнаружение несанкционированных врезок позволит предотвратить хищения нефти и нанесение непоправимого урона окружающей среде. Проведенный сравнительный анализ существующих методов определения утечек показал, что они являются неэффективными для обнаружения несанкционированных врезок из-за кратковременности последних и малых объемов утечек. В данном случае вполне эффективным является применение метода, предложенного в данной работе, который основан на измерении и анализе

акустических возмущений в металле трубопровода, возникающих при попытке врезки. Структура измерительных устройств для реализации данного метода была подобрана исходя из теории инвариантности в измерительной технике. Применение этой теории позволяет устранить зависимость результата измерения от возмущающих факторов. С использованием принципа многоканальности – основного принципа теории инвариантности – по выбранной структуре измерительного устройства были выведены соотношения для определения приблизительного места врезки и созданы алгоритм и программа, позволяющие реализовать работу метода.

Литература

1. Трубопроводный транспорт нефти/ С.М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др.; Под ред. С.М. Вайнштока: Учеб. для вузов: В 2 т. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т.2. – 621 с.
2. Некрасова А.П. О статистике аварий и несанкционированных врезок на магистральных нефтепродуктопроводах и мероприятия по снижению их числа // Транспорт и хранение нефтепродуктов, 2000. – № 8-9. – С. 9-11.
3. Гольянов А.А. Анализ методов обнаружения утечек на трубопроводах //Транспорт и хранение нефтепродуктов, 2002. – №10-11. – С. 5-14.
4. Харенко Д.Н. Система обнаружения несанкционированной врезки в магистральный нефтепровод /Тезисы доклада конференции молодых специалистов ОАО «СЗМН» / КРНУ – Казань, 2004.
5. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лункин и др. – М., «Наука», 1976. – 246 с.