

№ 28/MT-10 / Б. В. Севастьянов, А. П. Тюрин, Р. О. Шадрин, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов, И. В. Васильева. – Ижевск : ИжГТУ, 2010.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616105. Автоматизированная система «БВТ Про-1» / Р. О. Шадрин, Б. В. Севастьянов, И. О. Архипов, А. А. Аввакумов. Правообладатель: ГОУ ВПО «ИжГТУ», 5 августа 2011.

R. O. Shadrin, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

B. V. Sevastyanov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Software Management of Analysis and Prediction of Injuries and Professional Diseases of Employees in the Udmurt Republic

*The computer-aided system "BVT PRO-1" has been developed for analysis and prediction of injuries and professional diseases.*

**Key words:** safety, mathematical modeling, statistics of injuries.

УДК 622.692.482

Т. С. Леготкина, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Ю. Н. Хижняков, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА УТЕЧКИ НЕФТИ В НЕФТЕПРОВОДЕ

*Рассмотрен модифицированный метод контроля утечки нефти при несанкционированных врезках на базе анализа линии гидравлического профиля (уклона) нефтепровода. Для определения места врезки используются предыдущие показания датчиков давления с учетом их точности измерения, установленные по длине нефтепровода.*

**Ключевые слова:** метод контроля, место врезки, нефтепровод, датчики давления.

Существует большое число методов и способов обнаружения утечек (СОУ), основанных на различных физических явлениях и принципах. Все методы делятся на методы постоянного и периодического контроля. К методам постоянного контроля относятся метод материального баланса, метод отрицательных ударных волн, метод гидравлической локации утечки и др.

Довольно распространенным методом в СОУ является метод гидравлической локации места утечки нефти, заключающийся в анализе профиля давления. Измеряется манометрическое давление на концах двух специально выбранных базисных сегментов, находящихся вблизи перекачивающих станций. Если в некоторой точке возникает утечка, то линия гидравлического уклона становится ломаной.

Гидравлический уклон – это величина, характеризующая собой потерю напора на единицу длины нефтепровода. Гидравлический уклон рассчитывается на основе данных о геометрическом профиле нефтепровода, давлении в нем и плотности перекачиваемой нефти. Геометрический профиль нефтепровода – зависимость высотной отметки нефтепровода от его длины.

Гидравлический уклон  $H(x)$  рассчитывается по формуле

$$H(x) = z(x) + \frac{P(x)}{\rho g},$$

где  $z(x)$  – геометрический профиль, м;  $P(x)$  – профиль давления по длине трубопровода Па;  $P(x)/\rho g$  – пьезометрический профиль, м;  $\rho$  – плотность транспортируемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Как показано в [1], гидравлический профиль трубопровода обладает следующими свойствами:

– гидравлический профиль будет иметь прямолинейную зависимость в трубопроводе без утечки с геометрическим профилем  $z(x)$ ;

– при наличии утечки будет наблюдаться надлом гидравлического профиля трубопровода по координате, соответствующей утечке (рис. 1).

Идея метода заключается в следующем. Данные о давлении получают с датчиков, расположенных на контрольных пунктах (КП), распределенных по длине нефтепровода. Показания каждого из датчиков переводятся в значение гидроуклона в соответствующей точке. При нормальном состоянии нефтепровода полученные значения гидроуклонов должны лежать на одной линии [2]. Для проверки этого факта строится линия по значениям гидроуклонов в первой и последней точке. Уравнение прямой имеет вид

$$Ax + By + C = 0.$$

Неизвестные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  определяются по двум точкам с координатами  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ :

$$\begin{cases} Ax_1 + By_1 + C = 0, \\ Ax_2 + By_2 + C = 0. \end{cases}$$

Решением этой системы являются корни:

$$A = y_1 - y_2; \quad B = x_2 - x_1; \quad C = x_1 y_2 - x_2 y_1.$$

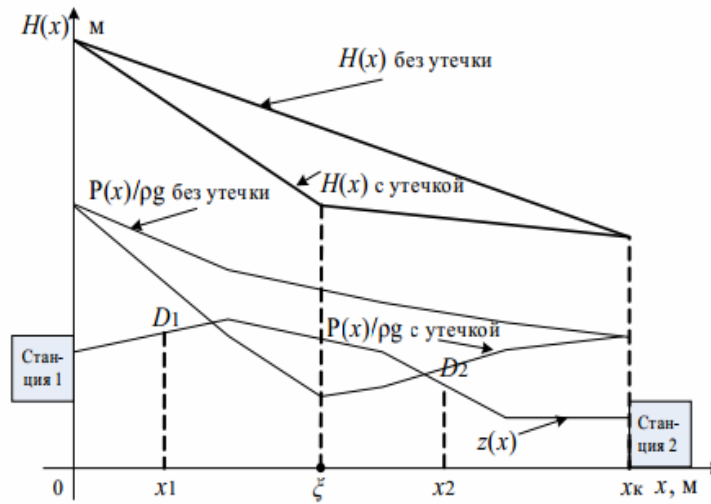


Рис. 1. Трубопровод сложной геометрической формы при наличии утечки и без нее и его профили

Затем по каждой из точек проверяется отклонение значения гидроуклона от этой идеальной линии. Если отклонение превышает максимально допустимое (заранее известное значение), делается вывод о возможной утечке.

Для определения места утечки необходимо определить место излома прямой гидроуклона. Место излома можно определить, вычислив точки с максимальными отклонениями от идеальной линии гидроуклона. Если обозначить общее количество точек с данными о давлениях  $S$  (общее количество КП, расположенных на нефтепроводе), а точки с максимальными отклонениями  $i$  и  $i+1$ , то значения гидроуклонов точек  $[1..i]$ , а также  $[i+1..S]$  должны лежать на двух прямых линиях, пересекающихся в точке утечки. Построив эти прямые и определив место их пересечения, локализуется место утечки.

Параметры этих линий можно определить, аппроксимируя точки  $[1..i]$  и  $[i+1..S]$ . В данной работе аппроксимация производится по методу наименьших квадратов.

Требуется построить наилучшую прямую  $y = ax + b$ , используя экспериментальные данные  $X(x_1..x_n)$  и  $Y(y_1..y_n)$ . Суть метода наименьших квадратов заключается в нахождении коэффициентов наилучшей прямой, для которой функция ошибки  $F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$  принимает наименьшее значение. Таким образом, решение сводится к нахождению экстремума функции двух переменных.

Составляется и решается система из двух уравнений с двумя неизвестными. Находятся частные производные функции ошибок по переменным  $a$  и  $b$  и приравниваются нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases}$$

Отсюда

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Применительно к данной задаче координата  $x$  соответствует текущей высотной отметке нефтепровода, а  $y$  – гидравлическому давлению в текущей точке нефтепровода. Обозначим координаты точек напора до утечки  $(x_i, y_i)$  и после места утечки  $(x_k, y_k)$ , а номер точки перед утечкой – буквой  $p$ . Параметры прямых, построенных до места утечки  $y = a_1 x + b_1$  и после утечки  $y = a_2 x + b_2$ , вычисляются следующим образом:

$$a_1 = \frac{p \sum_{i=1}^p x_i y_i - \sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p y_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^p x_i \right)^2};$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^p x_i^2 \sum_{i=1}^p y_i - \sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p x_i y_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^p x_i \right)^2};$$

$$a_2 = \frac{(n-p) \sum_{k=p+1}^n x_i y_i - \sum_{k=p+1}^n x_i \sum_{k=p+1}^n y_i}{(n-p) \sum_{k=p+1}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=p+1}^n x_k \right)^2};$$

$$b_2 = \frac{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n x_k y_k}{(n-p) \sum_{k=p+1}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=p+1}^n x_k \right)^2}.$$

Точка пересечения  $(x, y)$  двух полученных прямых  $y = a_1 x + b_1$  и  $y = a_2 x + b_2$  определяется по формулам:  $x = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1}$ ;  $y = a_1 x + b_1$ .

Таким образом, имея данные о гидравлическом давлении в точках, расположенных по длине нефтепровода, и зная их высотные отметки, можно анализировать наличие утечки на нефтепроводе и получать данные о расположении утечки [3]. В результате обработки данных с множества датчиков давления можно вычислить место возникновения утечки. Координата места утечки вычисляется как сложная функция. Для вычисления точности обнаружения утечки необходимо определить зависимость погрешности этой сложной функции от погрешности датчиков давления.

Пусть погрешность возникает только при измерении давления.

Из [4] известно что погрешность  $\Delta f$  сложной функции – функции нескольких переменных  $f = f(x, y, z, \dots)$  – определяется по формуле

$$\Delta f = |f'_x| \Delta x + |f'_y| \Delta y + |f'_z| \Delta z + \dots$$

В рассматриваемом случае функция имеет вид  $x = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1}$ .

Тогда погрешность в этом случае

$$\Delta x = \left| \frac{\partial x}{\partial b_1} \right| \Delta b_1 + \left| \frac{\partial x}{\partial a_1} \right| \Delta a_1 + \left| \frac{\partial x}{\partial b_2} \right| \Delta b_2 + \left| \frac{\partial x}{\partial a_2} \right| \Delta a_2.$$

Вычислим погрешности  $\Delta b_1, \Delta a_1, \Delta b_2, \Delta a_2$ .

Функцию  $b_1$  можно считать сложной функцией от нескольких переменных  $y_1, y_2, \dots, y_p$ . Так как для измерения гидравлического давления используются одинаковые датчики, то погрешность датчиков одинакова и равна  $\Delta y$ . Тогда погрешность определения параметров прямых можно вычислить по формулам:

$$\Delta b_1 = \sum_{i=1}^p \frac{\partial b_1}{\partial y_i} \Delta y = \frac{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p x_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^p x_i \right)^2} \Delta y = \Delta y;$$

$$\Delta a_1 = \sum_{i=1}^p \frac{\partial a_1}{\partial y_i} \Delta y = \frac{p \sum_{i=1}^p x_i - p \sum_{i=1}^p x_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^p x_i \right)^2} \Delta y = 0.$$

Аналогично,  $\Delta b_2 = \Delta y_i$ ;  $\Delta a_2 = 0$ .

Таким образом,

$$\Delta x = \left| \frac{\partial x}{\partial b_1} \right| \Delta b_1 + \left| \frac{\partial x}{\partial b_2} \right| \Delta b_2 = \frac{2 \Delta y}{|a_2 - a_1|}.$$

Предлагаемый модифицированный метод используется для контроля герметичности нефтепровода. Для вычисления гидравлического давления в точках нефтепровода нужно измерить давление в этих точках и знать высотные отметки данных точек. При проектировании нефтепровода по его длине необходимо установить контрольные пункты с измерительной и управляющей аппаратурой, которые обычно содержат разнообразные датчики (давления, расхода, температуры, электрического потенциала) и управляющую аппаратуру (задвижки).

Для получения данных о гидравлическом давлении на контрольных пунктах (КП) нефтепровода должны быть установлены датчики давления. Для передачи данных с датчиков необходимы контроллеры, задача которых – обработать сигналы с датчиков и передать их на линию связи. Датчики должны поддерживать интерфейс, совместимый с выбранной линией связи. Для агрегации данных со всех КП и последующей передачи на сервер ввода/вывода необходим концентратор данных в виде модема. Сервер ввода/вывода должен получать, сохранять и предоставлять доступ к агрегированным данным.

Линейная часть нефтепровода обычно рассчитывается на рабочее давление до 10 МПа. Исходя из требований регламента, при изменении давления в меньшую сторону на 0,5 кПа нефтепровод останавливается. При этом, чтобы обеспечить максимальную точность измерения, рабочее давление должно находиться в пределах второй-третьей шкалы датчика.

Погрешность выбранного метода обнаружения утечек напрямую зависит от погрешности измерения давления, поэтому необходимо выбирать датчик с максимально высоким классом точности. В нефтяной промышленности используются мембранные датчики давления. Обычно погрешность таких датчиков составляет 0,04–0,075 %. Для задачи обнаружения утечек этого достаточно. Это датчики фирмы АВВ серии 2600Т; фирмы Fisher Rosemount модель 3051CD; датчик абсолютного давления EJX310A, Yokogawa.

Для проверки предлагаемого метода обнаружения утечек была создана программа для моделирования работы системы. При моделировании используются параметры реального магистрального нефтепровода Северокамск – Пермь общей протяженностью почти 67 км. По длине нефтепровода установлены КП

с датчиками давления. Для моделирования используются показания датчиков давления за предыдущие периоды. Рассматривается работа программы в нормальном режиме функционирования нефтепровода, а также при возникновении утечки. Для симуляции значений с датчиков используется симулятор значений OPC – Iconics OPC Simulator, с помощью которого создано дерево сигналов, повторяющее структуру сигналов реального нефтепровода. Была проведена

симуляция работы нефтепровода без утечки (рис. 2). Построена линия гидроуклона, на этой линии отмечены точки напоров с каждого датчика давления. В отдельных точках наблюдалось отклонение точек от идеальной линии (за счет разбросов показаний с датчика давления), не превышающее допустимое.

При моделировании аварийной ситуации (возникновение утечки) скриншот программы выглядит следующим образом (рис. 3).

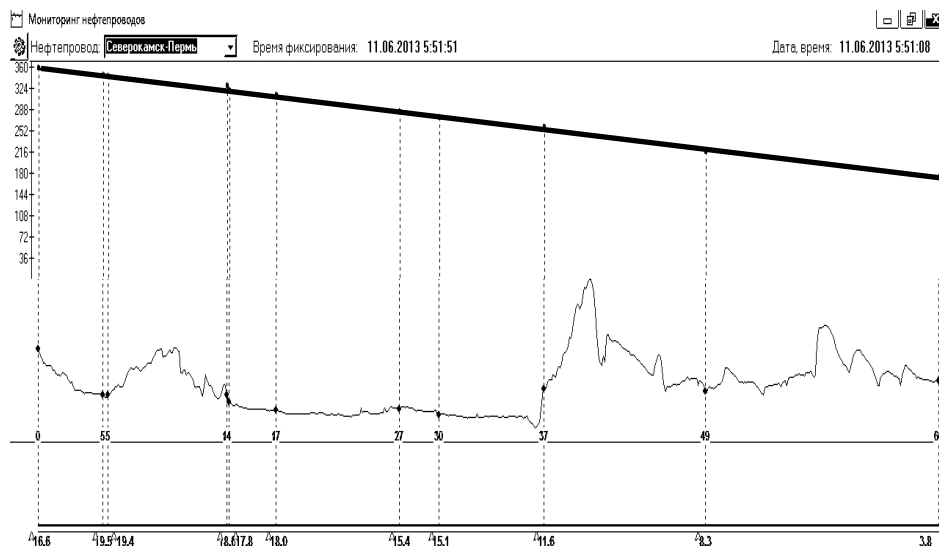


Рис. 2. Нормальный режим работы нефтепровода (без утечек)

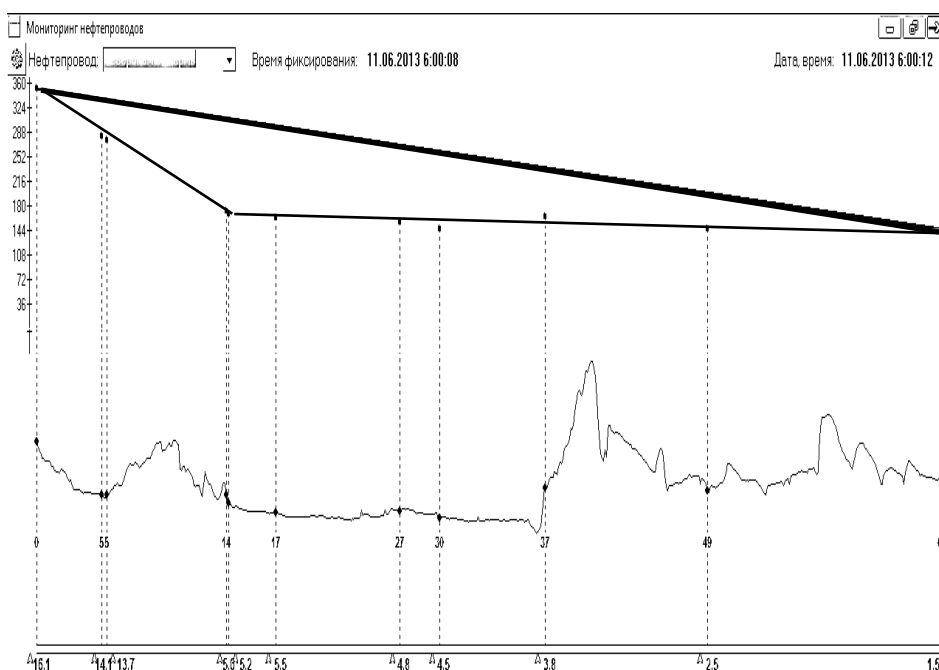


Рис. 3. Интерфейс программы при обнаружении утечки

Таким образом, программа фиксирует максимальное отклонение, делает вывод о наличии утечки и строит прямые для определения места утечки. В данном случае утечка произошла на 15-м км нефтепровода. Погрешность определения места утечки  $\pm 21$  м.

По указанным в скриншоте программы (рис. 2) данным построена прямая гидроуклонов для нормального режима нефтепровода  $y = -0,194x + 16,6$ . Для аварийного режима по значениям датчиков давления (рис. 3) построены прямые, описываемые уравнениями: левая прямая  $y = -0,797x + 16,85$ ,

правая –  $y = -0,081x + 6,65$ . Точка пересечения прямых  $x = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1} = \frac{16,85 - 6,75}{-0,081 + 0,797} = 14,25$  км. Точность определения места утечки равна  $2,8 \cdot \Delta y$  ( $\Delta y$  – погрешность датчиков давления). При использовании мембранного датчика давления с погрешностью 0,075 % погрешность определения места утечки  $\Delta x = 2,8 \cdot 0,00075 \cdot 10 \text{ мПа} = 0,021$  км.

#### Библиографические ссылки

1. Трубопроводный транспорт нефти : учебник для вузов / С. М. Вайншток, В. В. Новосёлов, А. Д. Прохоров, А. М. Шаммазов. В 2 т. – Т. 1. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2004. – 407 с.
2. Степанченко Т. Е., Шкляр В. Н. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения утечек в магистральных трубопроводах на основе их гидродинамических моделей // Изв. Томского политех. ун-та. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 70–73.
3. Степанченко Т. Е., Шкляр В. Н. Оценка точности алгоритма определения параметров утечки // Изв. Томского политех. ун-та. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 37–42.
4. Вержбицкий В. М. Основы численных методов : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 2005. – 840 с.

*T. S. Legotkina*, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University  
*Yu. N. Khizhnyakov*, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University

#### Method of Determining the Oil Leak in Pipelines

*The paper considers the modified method of monitoring the oil leak because of illegal tapping on the basis of analyzing the hydraulic line profile (slope) of a pipeline. To determine the place of illegal tapping the previous readings of pressure sensors (set along a pipeline) are used with account of their measurement accuracy.*

**Key words:** control method, place of tapping, pipeline, pressure sensors.

УДК 681.32

**С. Ф. Тюрин**, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
**А. Н. Каменских**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## САМОСИНХРОННЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫЙ ТОЛЕРАНТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

*Предлагается базис для построения самосинхронных комбинационных схем. Проводится синтез и анализ самосинхронного функционально-полного элемента.*

**Ключевые слова:** самосинхронные схемы, функционально-полный толерантный элемент, NCL-базис, полумодулярность.

**С**амосинхронные методики проектирования как альтернатива ставшему традиционным синхронному методу активно развиваются в последние годы. Самосинхронные схемы привлекли внимание ученых, благодаря таким качествам, как повышенное быстродействие, высокая достоверность функционирования, низкое энергопотребление. Стоит отметить, что самосинхронные схемы сохраняют функциональность даже при очень низких напряжениях питания [1].

Существует несколько основных самосинхронных методик.

1. Логика с нулевым согласованием (NCL) [2].
2. Конвейерная схема (Pipeline line) [3].
3. Строго самосинхронная [4].

Использование NCL-базиса – одно из самых распространенных решений в мире для проектирования самосинхронных схем. Развитием базиса занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Базис

прост для понимания, имеет готовую библиотеку элементов. Также учеными из США была создана LUT-ячейка самосинхронной ПЛИС для реализации NCL-схем [5].

Конвейерная схема – второе решение для проектирования СС-устройств – базируется на применении G-триггеров. В конвейерной схеме вся синхронизация проходит через регистры. Блок индикации фиксирует состояния NULL/DATA на выходах регистров и посылает управляющий сигналы дальше по схеме. Такой подход освобождает от временного анализа во время проектирования. К недостаткам можно отнести большую избыточность комбинационно-регистровых схем, а также невозможность использовать самодиагностику для самих комбинационных схем.

Строго самосинхронные методики, разработкой которых в основном занимается ИПИ РАН, хорошо подходят для полужаказных схем, так как имеют лучшие технические характеристики, нежели кон-