

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Nemirovsky V.B., Stoyanov A.K. Multi-Step Segmentation of Images by Means of a Recurrent Neural Network // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST – 2012): Proceedings: in 2 v. V. 1. – Tomsk, September 18–21, 2012. – P. 557–560.
3. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 312 с.
4. Пожар на Ожгинском месторождении продолжается // Кунгур Online. Кунгурский информационно-новостной сайт. 2012. URL: <http://kungur-online.ru/?p=18620> (дата обращения: 20.03.2013).
5. Image 80099, URL: http://www.lapix.ufsc.br/sms/byalgorithmimages_80099.html (дата обращения: 20.03.2013).

Поступила 28.03.2013 г.

УДК 621.643

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТЕЧКИ ИЗ НЕФТЕПРОВОДА, ОСНОВАННЫЙ НА РАЗНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ ДАВЛЕНИЯ

Т.Е. Мамонова

Томский политехнический университет
E-mail: mamte@sibmail.com

Предложен метод определения утечки, основанный на анализе гидравлических характеристик трубопровода во времени. Представлены расчётные формулы для определения массового расхода и координаты утечки. Приведено исследование метода с применением программы COMSOL Multiphysics 3.5. Показано, что предложенный метод и расчётные формулы, соответствующие ему, являются применимыми при определении кратковременных утечек.

Ключевые слова:

Нефтепровод, датчик давления, гидравлический профиль трубопровода, утечка в нефтепроводе, имитационная модель.

Key words:

Oil pipeline, pressure sensor, hydraulic profile of oil pipeline, loss in the pipeline, simulation model.

В настоящее время при эксплуатации магистральных нефтепроводов одной из наиболее актуальных и сложных задач является своевременное обнаружение утечек, а также определение координаты и массового расхода этих утечек. Особо важно решить данную задачу при появлении несанкционированных врезок в трубопровод, которые устанавливаются для хищения нефтепродуктов. Так, согласно [1], по данным «Транснефти», всего в период с 2003 по 2012 гг. на объектах компании было выявлено 4779 несанкционированных врезок в магистральные нефтепроводы, что составляет около 70 % всех совершенных преступлений. В 2012 г. таких случаев было зафиксировано 180, в 2011 г. – 214, а в 2010 г. – 313. При этом на ликвидацию современной врезки требуется порядка 2,5 млн р., а экологический ущерб оценить практически невозможно.

Сложность обнаружения несанкционированных врезок заключается в том, что их длительность составляет несколько минут, и изменение давления при их возникновении очень мало по сравнению с давлением в трубопроводе при перекачивании нефтепродуктов. Методы обнаружения утечек, которые используются в настоящее время при эксплуатации линейной части нефтепроводов, приведённые в [2, 3], в большинстве случаев являются малочувствительными к изменениям интенсивности возникающих кратковременных утечек.

В работе предлагается метод для определения координаты и массового расхода утечки, который основан на разности во времени давления в контролируемых сечениях трубы. Прототипом предлагаемого метода является метод гидравлической локализации утечки, который описан в [4] и основан на анализе гидравлических характеристик участка нефтепровода. При этом рассматривается участок нефтепровода между двумя нефтеперекачивающими станциями НПС1 и НПС2, который работает в стационарном режиме, не имеет самотечных участков и транспортирует однородную нефть с некоторым расходом Q_0 . Схема нефтепровода с утечкой и без неё и расчётные данные по методу гидравлической локализации представлены на рис. 1.

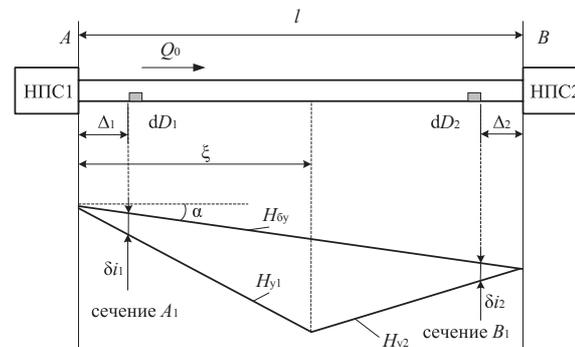


Рис. 1. Расчётная схема метода гидравлической локализации утечки

Протяжённость трубопровода составляет l . Вблизи нефтеперекачивающих станций НПС1 и НПС2 выбираются базисные сегменты следующим образом: AA_1 с протяжённостью Δ_1 вблизи первой нефтеперекачивающей станции и второй B_1B с протяжённостью Δ_2 вблизи второй. В данных сечениях устанавливаются дифференциальные датчики давления dD_1 и dD_2 , которые измеряют разность давления на концах выбранных сегментов. Для определения утечки в соответствии с данным методом строится гидравлическая характеристика $H(x)$, которая рассчитывается так [5]:

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

где $\frac{P(x)}{\rho g}$ – пьезометрический профиль трубопровода, м; $z(x)$ – геометрический профиль трубопровода, м; $P(x)$ – давление вдоль трубопровода, Па; ρ – плотность перекачиваемого продукта, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

При работе трубопровода в стандартном режиме линия гидравлического уклона без утечки не искажена и на рис. 1 соответствует линии $H_{\text{б.г}}$. Когда возникает утечка, происходит надлом линии в месте возникновения утечки на две составляющие: H_{y1} – линия гидравлического уклона при утечке до места её возникновения, H_{y2} – линия гидравлического уклона при утечке после места её возникновения.

Изменения гидравлического уклона может быть рассчитано по показаниям установленных в базисных сегментах дифференциальных манометров по формулам [4]:

$$\delta i_1 = \frac{\delta(H_A - H_{A_1})}{\Delta_1} > 0, \quad \delta i_2 = \frac{\delta(H_B - H_{B_1})}{\Delta_2} < 0.$$

Координата ξ и расход Q утечки рассчитываются по формулам [4]:

$$\xi = l \frac{|\delta i_2|}{|\delta i_1| + |\delta i_2|}, \quad Q = \frac{|\delta i_1| + |\delta i_2|}{(\partial i / \partial Q)_{Q_0}}, \quad (1)$$

где $(\partial i / \partial Q)_{Q_0}$ – частные производные от функции $i(Q)$ по Q , вычисленные при номинальном расходе Q_0 , которые можно определить либо теоретически с помощью дифференцирования формулы зависимости гидравлического уклона $i(Q)$, либо экспериментально при исследовании изменений гидравлического уклона участка нефтепровода при изменениях его пропускной способности.

Анализ указанного метода выполнен в [4] и [5]. К недостаткам метода гидравлической локации можно отнести:

- 1) расчётные формулы (1) базируются на значениях номинальной или текущей производительности перекачки нефтепродукта, которые должны быть известны заранее;
- 2) значения изменения давления на концах выбранных базисных сегментов являются относи-

тельно малыми величинами, поэтому необходима высокая точность измерения изменения дифференциального напора, что в условиях производства является проблематично.

- 3) при уменьшении интенсивности утечки точность метода снижается из-за ограничения чувствительности дифференциальных манометров к малым изменениям давления на концах базисных сегментов.

Предлагаемый в рамках данной работы метод является модификацией метода гидравлической локации и основан на изменении во времени линии гидравлического уклона нефтепровода. При этом рассматривается участок нефтепровода с определённой геометрической формой, который работает в стационарном режиме, не имеет самоотечных участков, лупингов и отводов и транспортирует однородный нефтепродукт. В определённых сечениях вдоль трубопровода устанавливаются специальные устройства, представляющие собой датчики давления, измеряющие изменение давления во времени $\Delta P(t)$ в контролируемых сечениях трубы, разработанные автором работы и описанные в [6].

В трубопроводах при транспортировке нефтепродуктов имеет место гидравлический шум $P_{\text{ш}}$, который может быть обусловлен следующими явлениями:

- 1) образованием вихрей или неоднородностей потока жидкости вблизи твердых границ (вихревой шум);
- 2) образованием пульсаций давления при изменении сечения потока движущейся жидкости;
- 3) автоколебаниями упругих конструкций в жидкости;
- 4) кавитацией в жидкости из-за потери ею сплошности при уменьшении давления: образуются полости и пузырьки, заполненные газами, при захлопывании которых возникает звуковой импульс.

При значении изменения давления в контролируемых сечениях $\Delta P(t) \geq P_{\text{ш}}$ имеет место либо изменение режима перекачки нефтепродукта, либо возникает утечка на участке нефтепровода, пролегающего между двумя перекачивающими станциями.

По показаниям датчиков давления, измеряющих разность во времени давления в контролируемых сечениях трубы, с учётом параметров нефтепродукта (плотность, скорость перекачки) и нефтепровода (коэффициент гидравлического сопротивления и геометрический профиль трубы), можно определить параметры утечки из нефтепровода (координата и массовый расход).

При этом используются полученные автором расчётные формулы для двух вариантов работы трубопровода.

В первом случае контролируемый участок нефтепровода находится между двумя нефтеперекачивающими станциями НПС1 и НПС2, расположенными в местах с координатами x_1 и x_4 , соответственно (рис. 2).

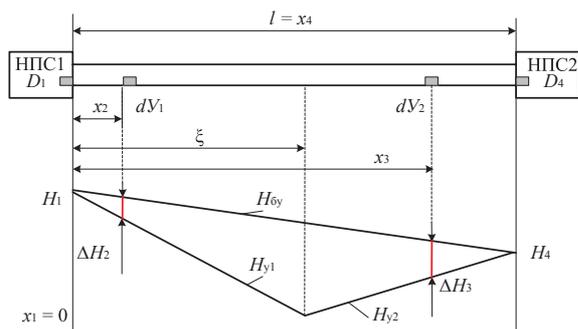


Рис. 2. Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и без неё и его гидравлические уклоны при постоянных значениях давления в начале и конце трубы

Давления в начале и в конце трубы считаются постоянными и не изменяются во времени, либо данное изменение минимально. Вдоль нефтепровода в сечениях x_2 и x_3 располагаются устройства, описанные выше, которые измеряют изменения во времени давления в данных сечениях трубы $\Delta P_2(t)$ и $\Delta P_3(t)$. Расчётные формулы для определения координаты утечки ξ и её массового расхода G_T при постоянных значениях давления в начале и в конце эксплуатируемого участка были рассчитаны геометрическим способом. При этом предполагается, что в стандартном режиме работы трубопровода без утечки линия гидравлического уклона H_{by} прямолинейна. При возникновении утечки данная линия состоит из двух составляющих H_{y1} и H_{y2} , которые пересекаются в точке с координатой, где произошла утечка. Гидравлический уклон определяется по формуле [5]:

$$H(x) = z(x) + \frac{P(x)}{\rho g}, \quad (2)$$

где $z(x)$ – геометрический профиль трубопровода, представляющий собой высоту трубы над уровнем

горизонта, м; $\frac{P(x)}{\rho g}$ – пьезометрический профиль

трубы, м; ρ – плотность перекачиваемого продукта, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для определения массового расхода утечки необходимо выразить расход трубопровода в месте утечки до её возникновения и после. Тогда, зная изменения во времени давления в контролируемых сечениях трубы, уровень трубопровода и координату мест установок устройств, абсолютное давление в начале и конце трубопровода, параметры трубопровода и транспортируемой жидкости и учитывая (2), находим формулы для расчёта координаты и массового расхода утечки:

$$\xi = \frac{x_2 x_4 \Delta P_3}{(x_4 - x_3) \Delta P_2 + x_2 \Delta P_3}, \quad (3)$$

$$G_T = \frac{\pi d^2}{16} \sqrt{\frac{2d\rho}{\lambda}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{x_2(P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)) - x_4 \Delta P_2}{x_2 x_4} - \frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4}}, \quad (4)$$

где d – внутренний диаметр трубы, м; $\lambda = \lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода, является безразмерной величиной;

$\text{Re} = \frac{wd}{\nu}$ – число Рейнольдса; $\varepsilon = \frac{\Delta}{d}$ – относи-

тельная шероховатость внутренней поверхности нефтепровода; Δ – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы; w – скорость перекачки нефтепродукта по сечению, м/с; P_1, P_4 – давления на НПС1 и НПС2, соответственно, Па; z_1, z_4 – высота над уровнем горизонта на НПС1 и НПС2, соответственно, м.

Во втором варианте работы нефтепровода предполагается, что участок нефтепровода располагается между двумя нефтеперекачивающими станциями НПС1 и НПС2, давление в начале трубы (на НПС1) является постоянным либо изменяется во времени в допустимых пределах, давление на НПС2 изменяется во времени. При этом учитываются показания датчиков, расположенных на НПС1 и НПС2, и устройств, измеряющих изменения во времени давления в контролируемых сечениях трубы, расположенных вдоль нефтепровода и на НПС2 (рис. 3).

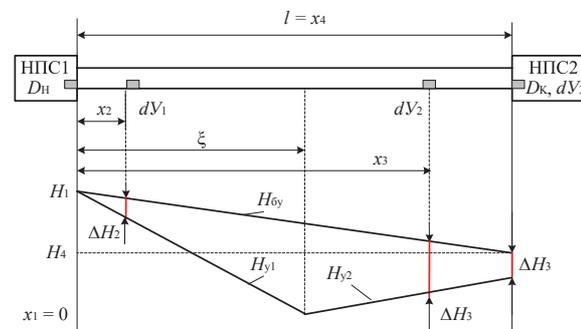


Рис. 3. Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и без неё, а также его гидравлические уклоны при постоянном значении давления в начале трубы и изменяющемся во времени давлении в конце трубы

Массовый расход утечки при этом рассчитывается по формуле (4). Геометрическим способом была получена формула для определения координаты утечки при постоянном давлении в начале эксплуатируемого участка и изменении во времени давления в его конце, которая имеет вид:

$$\xi = \frac{x_2(x_4 \Delta P_3 - x_3 \Delta P_4)}{(x_4 - x_3) \Delta P_2 + x_2(\Delta P_3 - \Delta P_4)}, \quad (5)$$

где $\Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$ – разность во времени давления в двух сечениях вдоль трубопровода и в его конце на НПС2, Па.

Для доказательства работоспособности представленных формул (2)–(4) был проведён модельный эксперимент с применением пакета COMSOL Multiphysics 3.5. Для этого в указанном пакете было проведено моделирование трубопроводов, работающих в рассмотренных выше режимах. Следует отметить, что расчёт для трубопроводов реальных размеров выполняется в течение продолжительного времени, поэтому было решено проводить эксперимент для масштабированного трубопровода, параметры которого взяты из [7] и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трубопровода и транспортируемой жидкости

Обозначения	Значение	Ед. измерения
Параметры трубопровода		
Длина l	100	м
Диаметр трубы d	0,1	м
Диаметр отверстия утечки d_y	0,01	м
Площадь сечения S	$7,85 \cdot 10^{-3}$	м ²
Давление в начале трубы P_1	1	МПа
Давление в конце трубы P_4	0,7	МПа
Параметры транспортируемой жидкости		
Плотность ρ	817	кг/м ³
Скорость движения w	1,2	м/с
Кинематическая вязкость ν	$0,98 \cdot 10^{-6}$	м ² /с
Скорость распространения звуковой волны C	975	м/с

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Массовый расход утечки в программе COMSOL Multiphysics 3.5 был рассчитан по формуле [8]:

$$G_T = \rho \mu \frac{\pi d_y^2}{4} \sqrt{2gH_\xi}, \quad (6)$$

где d_y – диаметр отверстия утечки, м; μ – коэффициент расхода (примем равным 1); H_ξ – значение гидравлического напора в месте утечки, м.

Относительные погрешности определения координаты $\delta\xi$ и массового расхода δG_T утечки рассчитаны по формулам:

$$\delta\xi = \frac{|\xi_p - \xi_s|}{\xi_s} \cdot 100 \%, \quad \delta G_T = \frac{|G_{Tp} - G_{Ts}|}{G_{Ts}} \cdot 100 \%,$$

где ξ_p, G_{Tp} – расчётные значения координаты и массового расхода, полученные по формулам (3), (4) и (5); ξ_s, G_{Ts} – эталонные значения координаты и массового расхода, заданные в программе COMSOL Multiphysics 3.5 и в соответствии с (6).

Таблица 2. Результаты модельного эксперимента

Значение параметров утечки	Геометрический профиль трубы		Прямолинейный без наклона	Прямолинейный с наклоном
	Заданные значения в COMSOL Multiphysics 3.5			
Расчётные значения параметров утечки по формулам (3) и (4)	ξ , м	55	55	55
	G_T , кг/с	6,46	6,46	6,46
	$\delta\xi$, %	55,12	55,16	55,16
	δG_T , %	6,48	6,52	6,52
Расчётные значения параметров утечки по формулам (4) и (5)	ξ , м	0,22	0,28	0,28
	G_T , кг/с	0,35	0,92	0,92
	$\delta\xi$, %	55,13	6,48	6,48
	δG_T , %	55,15	6,52	6,52

Таким образом, модельный эксперимент показал, что погрешность расчёта параметров утечки по предложенному методу и соответствующим данному методу формулам составляет 0,22 % для координаты утечки и 0,28 % для массового расхода утечки при прямолинейном трубопроводе без наклона, 0,28 % и 0,92 % для координаты и массового расхода утечки соответственно при прямолинейном трубопроводе с наклоном.

Выводы

Предложенный метод определения утечки является улучшенной модификацией метода гидравлической локации утечки, так как позволяет обнаружить кратковременные утечки малой интенсивности, в том числе несанкционированные врезки в трубопровод, проводимые с целью хищения нефтепродукта. Чувствительность предложенного метода достигается за счёт применения устройства, позволяющего измерять разность во времени давления в контролируемых сечениях трубопровода, расположение которых не зависит от физических возможностей датчиков давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забелло Е. Нефть в России стали воровать в промышленных масштабах // РБК. 2013. URL: <http://top.rbc.ru/economics/28/01/2013/842358.shtml> (дата обращения: 29.01.2013).
2. Мамонова Т.Е. Методы диагностики линейной части нефтепроводов для обнаружения утечек // Проблемы информатики. – 2012. – Спецвыпуск. – С. 103–112.
3. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения утечек в магистральных трубопроводах на основе их гидродинамических моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 70–73.
4. Лурье М.В., Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1998. – № 12. – С. 65–69.

5. Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С.М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 2. – 621 с.
6. Способ измерения изменения давления в нефтепроводе транспортировки жидкости и устройство для его осуществления: пат. № 2426080. Рос. Федерация. № 2010117477/28; заявл. 30.04.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. – 5 с.
7. Мамонова Т.Е. Учёт геометрического профиля нефтепровода при определении параметров утечки // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2012. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Mamonova/Mamonova_1.pdf (дата обращения: 18.06.2013).
8. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре // Образовательный ресурс по гидродинамике и гидропневмоприводе. 2011. URL: <http://gidravil.narod.ru/is-techenie.html> (дата обращения: 05.04.2013).

Поступила 31.01.2013 г.