

# Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 621.643

## ВЛИЯНИЕ КООРДИНАТ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В НЕФТЕПРОВОДЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УТЕЧКИ

Мамонова Татьяна Егоровна,

канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mamte@sibmail.com

Предложен метод определения координаты и массового расхода утечки. Данный метод основан на анализе показаний средств измерения давления, расположенных в начале и конце трубы, а также вдоль трубопровода. Описаны формулы для расчета координаты и массового расхода утечки в соответствии с предложенным модифицированным методом гидравлической локации. Выполнены экспериментальные исследования метода и расчетных формул на трубопроводе для перекачки летнего дизельного топлива. Показана возможность практического применения описанных формул по предложенному методу для определения параметров утечки на магистральных трубопроводах. В ходе анализа результатов проведенного эксперимента были установлены зависимости погрешностей расчёта координат и массового расхода утечки от местоположений устройств измерения давления в трубопроводе.

### Ключевые слова:

Нефтепровод, утечка в нефтепроводе, устройство измерения давления, профиль трубопровода, тренд давления, размещение датчиков давления.

Трубопроводный транспорт является самым пространственным и эффективным в нефтяной промышленности, особенно при доставке нефтепродуктов из труднодоступных мест добычи. Важно обеспечивать целостность трубопроводов, так как нарушение их герметичности ведет к большим экономическим и экологическим проблемам вследствие их прорывов либо несанкционированных врезок. В настоящее время существует большое количество методов периодического контроля и постоянного мониторинга трубопроводов. Все они основаны на различных физических явлениях и позволяют определять местоположение утечки с различной точностью [1–4].

С целью повышения точности определения координаты и массового расхода утечки из трубопроводов автором предложен метод определения утечки, основанный на анализе гидравлического профиля эксплуатируемого участка нефтепровода [5]. Данный гидравлический профиль строится по показаниям разработанных автором устройств, описанных в [6] и предназначенных для определения изменения во времени давления в четырёх контролируемых сечениях трубы. При этом средства измерения давления располагаются вдоль трубы в её

четырёх сечениях. Указанный метод является улучшенной модификацией метода гидравлической локации, который предложен в [7].

Формулы для определения координаты и массового расхода утечки в соответствии с предложенным методом имеют вид [5]:

$$\xi = \frac{\begin{pmatrix} (x_2 - x_1)(x_4 \Delta P_3 - x_3 \Delta P_4) - \\ -(x_4 - x_3)(x_2 \Delta P_1 - x_1 \Delta P_2) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (x_2 - x_1)(\Delta P_3 - \Delta P_4) + \\ +(x_4 - x_3)(\Delta P_2 - \Delta P_1) \end{pmatrix}}, \quad (1)$$

$$G_T = \frac{\pi d^2}{16} \sqrt{2d\rho} \times \left[ \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}} \times \right.$$

$$\times \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4) + \frac{x_4 - x_1}{\Delta P_2 (\Delta P_2 - \Delta P_1)}}{x_2 (\Delta P_2 - \Delta P_1) - x_1 \Delta P_2 + x_2 \Delta P_1}} - \left. \sqrt{\frac{1}{\lambda_2}} \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4 - x_1}} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta P_n$  – разность во времени давления в контролируемых сечениях трубопровода [Па];  $x_n$  – координаты установки устройства для измерения разности во времени давления [м];  $z_n$  – геометрический профиль трубопровода [м];  $n=1...4$  – количество устройств определения разности во времени давления;  $P_1, P_4$  – абсолютное давление в первом и четвертом контролируемых сечениях трубы [Па];  $d$  – внутренний диаметр трубы [м];  $\lambda=\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$  – коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода, является безразмерной величиной;  $\text{Re}=(wd)/\nu$  – число Рейнольдса;  $\varepsilon$  – относительная шероховатость внутренней поверхности нефтепровода;  $w$  – скорость перекачки нефтепродукта по сечению [м/с];  $\nu$  – кинематическая вязкость нефтепродукта [м<sup>2</sup>/с];  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты гидравлического сопротивления до и после возникновения утечки, соответственно, являются безразмерными величинами.

Исследование расчётных формул (1) и (2) модельным методом было проведено в [5].

В зависимости от местоположения устройств, измеряющих изменения во времени давления в контролируемых сечениях нефтепровода, возможно изменение точности определения параметров утечки, а также чувствительности к появлению малых утечек. В соответствии с разработанным методом, утечка может быть обнаружена в случае её появления между вторым и третьим датчиками давления. Существенным недостатком метода является наличие неконтролируемых зон, расположенных между нефтеперекачивающими станциями и вторым датчиком в начале трубы и третьим датчиком в конце трубы. Задачей исследования в рамках данной работы является установление возможности уменьшения данных зон и сохранения чувствительности метода к малым утечкам. Для этого необходимо рассмотреть влияние расположения устройств определения изменения во времени давления на точность определения параметров утечки.

При этом были взяты данные эксперимента, проводимого на нефтепроводе транспортировки лет-

него дизельного топлива плотностью  $\rho=860$  кг/м<sup>3</sup>. Утечка имитировалась открытием крана, интенсивность регулировалась различным диаметром шайбы  $d_{\text{ш}}$ . Диаметр трубы составлял  $d=0,530$  м, отбор нефтепродукта выполнялся в месте с координатой  $\xi=125,71 \cdot 10^{-3}$  м при  $d_{\text{ш}}=10 \cdot 10^{-3}$  м и  $d_{\text{ш}}=20 \cdot 10^{-3}$  м.

Схема нефтепровода и датчиков давления, расположенных в четырёх сечениях трубы, представлена на рис. 1. Данная схема содержит следующие вспомогательные обозначения:  $\Delta x_1$  – расстояние между первым и вторым датчиками давления,  $\Delta x_2$  – расстояние между третьим и четвертым датчиками давления,  $\Delta x_{12}$  – контролируемая зона нефтепровода, определяемая расстоянием между вторым и третьим датчиками давления.

На испытательном участке работающего трубопровода располагаются две системы определения утечек, каждая из которых имеет набор датчиков абсолютного давления, установленных вдоль трубы. В соответствии с этим при проведении эксперимента было выбрано четыре варианта расположения датчиков давления вдоль трубы так, как это указано в табл. 1.

Все данные были обработаны в соответствии со структурой, представленной на рис. 2.

Расчёт параметров утечки был проведён по формулам (1) и (2). Результаты расчётов представлены в табл. 2. При этом значения массового расхода утечки были рассчитаны с использованием формулы [8]:

$$G_T = \rho \mu \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{4} \cdot \sqrt{2gH_{\xi}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода (принят равным 1);  $H_{\xi}$  – значение гидравлического напора в месте утечки, м;  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шайбы, м.

Погрешности расчёта координаты  $\delta \xi$  и массового расхода  $\delta G_T$  утечки рассчитаны по формулам:

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

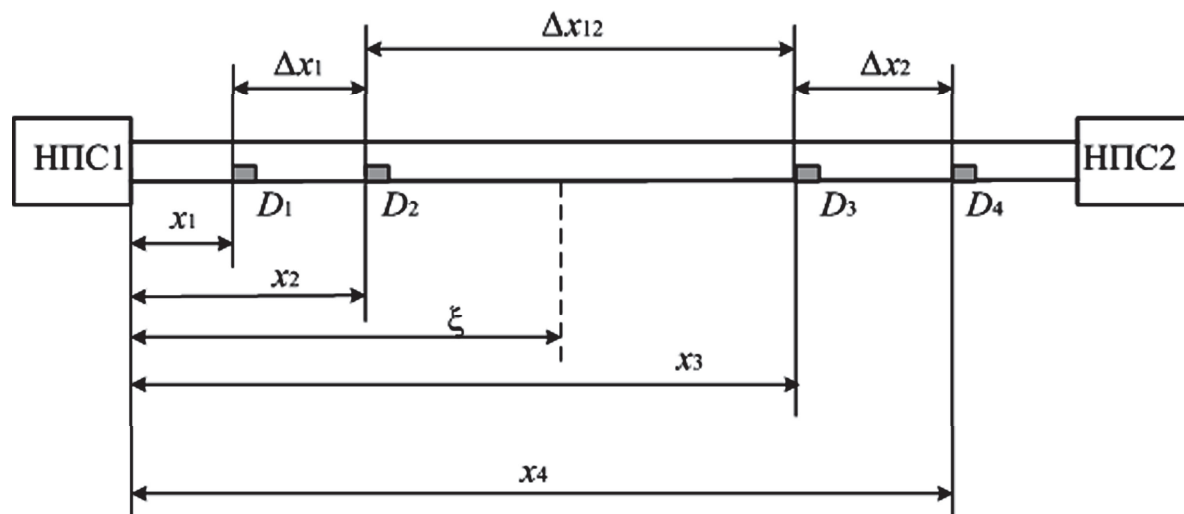


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой при экспериментальном исследовании

**Таблица 1.** Координаты расположения четырёх датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и расстояния между ними

Координаты установки датчиков давления, м				Расстояния между датчиками давления, м		
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_{12}$
27 339,49	28 139,49	149 636,40	150 480,12	800	844	121 497
27 339,49	28 139,49	143 692,00	150 480,12	800	6 788	115 553
27 339,49	90 279,93	149 636,40	150 480,12	62 940	844	59 359
27 339,49	90 279,93	143 864,52	150 480,12	62 940	6 616	53 585
90 279,93	91 077,42	143 692,00	143 864,52	797	173	52 614



**Рис. 2.** Структура для обработки данных

где  $\xi_{р}, G_{тр}$  – расчётные значения координаты и массового расхода утечки, полученные по формулам (1) и (2);  $\xi_{с}, G_{тс}$  – эталонные значения координаты и массового расхода, полученные экспериментальным путём.

**Таблица 2.** Результаты расчёта параметров утечки модифицированным методом гидравлической локации при вариации координат установки датчиков давления

Заданные значения	Расчётные значения		Погрешности расчёта			
	$\xi \cdot 10^3$ , м	$G_t$ , кг/ч	$\Delta \xi$ , м	$\delta_\xi$ , %	$\Delta G_t$ , кг/ч	$\delta_{G_t}$ , %
$\xi=125,71 \cdot 10^3$ , м $d_{ш}=20 \cdot 10^{-3}$ , м $G_t=19,274$ , кг/ч	125,325	16,500	438	0,349	2,774	14,394
	125,627	16,500	83	0,066	2,774	14,394
	125,975	22,667	265	0,211	3,393	17,605
	125,706	19,055	4	0,003	0,219	1,136
	125,758	17,050	48	0,038	2,224	11,539
$\xi=125,71 \cdot 10^3$ , м $d_{ш}=10 \cdot 10^{-3}$ , м $G_t=10,868$ , кг/ч	126,197	9,023	487	0,387	1,845	16,976
	125,572	9,023	138	0,110	1,845	16,976
	126,032	13,032	322	0,256	3,381	19,913
	125,694	9,813	16	0,013	1,055	9,704
	125,772	12,132	62	0,049	1,264	11,632

Результаты экспериментального исследования, указанные в табл. 2, показали, что формулы для определения местоположения и массового расхода утечки из трубопровода (1) и (2) применимы на практике. Установлено, что точность определения параметров утечки зависит от координат установки устройств измерения давления, а также от их сочетания. Наилучшая точность определения координаты утечки и массового расхода (при  $\delta \xi = 0,003$  % и  $\delta G_t = 0,211$  %) наблюдается при наибольших из представленных расстояний  $\Delta x_1, \Delta x_2$  и наименьшем расстоянии контролируемого участка нефтепровода  $\Delta x_{12}$ . При уменьшении интенсивности утечки точность определения параметров утечки ухудшается, однако тенденция её улучшения наблюдается при сокращении зоны  $\Delta x_{12}$ .

Графики зависимости погрешности расчёта координаты утечки  $\delta_\xi$  и массового расхода утечки  $\delta_{G_t}$  от расстояния между датчиками давления  $\Delta x_2$  при  $\Delta x_1 = \text{const}$  представлены на рис. 3.

По графикам, представленным на рис. 3, а, установлено, что при фиксированном расстоянии между первым и вторым датчиками давления  $\Delta x_1$  наилучшая точность расчёта координаты утечки достигается при наименьшем расстоянии между третьим и четвёртым датчиками  $\Delta x_2$ . Указанная на рисунке зависимость нелинейная, так как погрешность расчёта координаты утечки по формуле (2) зависит от многих факторов. Поэтому можно наблюдать уменьшение погрешности определения координаты утечки при приближении утечки к местоположению третьего датчика давления. Заметим также, что погрешность расчёта координаты утечки зависит и от интенсивности утечки, которая изменяется в зависимости от диаметра шайбы. При этом увеличение  $d_{ш}$  в два раза ведёт к увеличению точности расчёта координаты утечки минимум на 0,011 %.

Из графиков, представленных на рис. 3, б, видно, что при фиксированном расстоянии между первым и вторым датчиками давления  $\Delta x_1$  точность расчёта массового расхода утечки увеличивается при уменьшении расстояния между третьим и четвёртым датчиками  $\Delta x_2$ . Указанная зависимость является нелинейной, так как погрешность расчёта массового расхода утечки по формуле (3) зависит от расстояния между возникшей утечкой и местоположениями датчиков давления, а также от точности датчиков абсолютного давления в месте расположения первого и четвёртого датчиков давления. Погрешность определения массового расхода утечки не зависит от местоположения третьего и четвёртого датчиков давления при постоянных координатах установки первого и второго датчиков. Погрешность расчёта массового расхода утечки зависит также от интенсивности утечки. При увеличении диаметра отверстия утечки от 0,01 до 0,02 м погрешность расчёта увеличивается минимум на 0,093 %.

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях использовались показания датчиков абсолютного давления, что повлияло на точ-

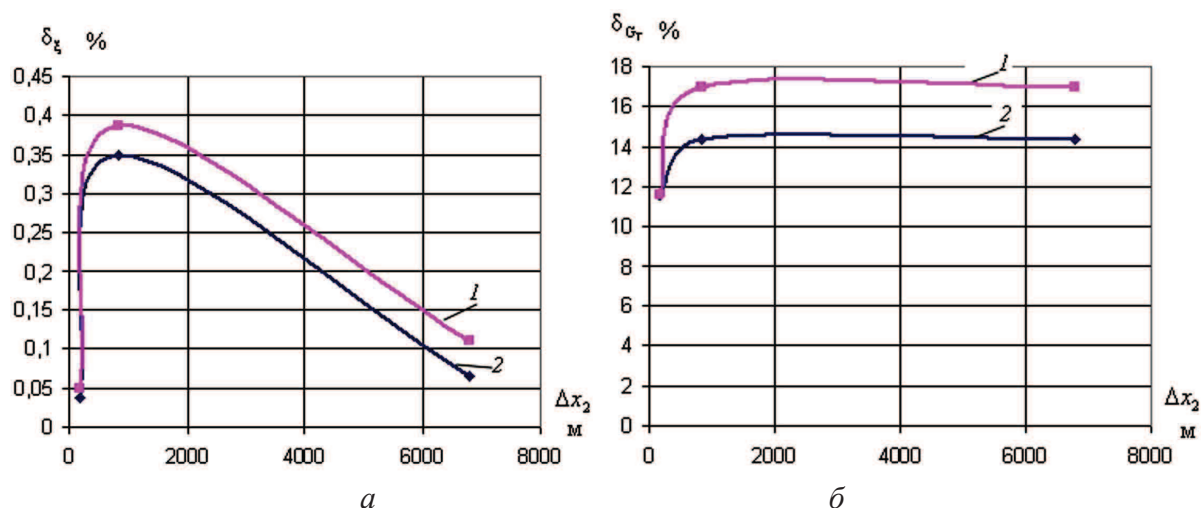


Рис. 3. Графики зависимостей погрешности расчёта а) координаты утечки; б) массового расхода утечки от расстояний между датчиками давления  $\delta_z(\Delta x_2)$  при  $\Delta x_1=800$  м и диаметре шайбы: 1)  $d_{ш}=10 \cdot 10^{-3}$  м; 2)  $d_{ш}=20 \cdot 10^{-3}$  м

ность определения изменения во времени давления в контролируемых сечениях и, следовательно, отразилось на точности расчёта параметров утечки.

#### Выводы

Таким образом, для достижения наибольшей точности определения координаты и массового расхода утечки по модифицированному методу гидравлической локации утечки и соответствующим ему расчётным формулам (1) и (2), а также для увеличения при этом контролируемой зоны трубопровода нужно устанавливать средства измерения да-

вления так, чтобы расстояния между первым и вторым устройствами  $\Delta x_1$  и между третьим и четвёртым  $\Delta x_2$  были наименьшими, так чтобы чувствительность измерительных устройств позволяла определять изменения давлений выше шумов в трубе. Расположение устройств измерения изменения во времени давления будет также зависеть от их точности и чувствительности.

Для установления характера влияния погрешности измерения давления в трубопроводе на точность определения параметров утечки по предложенному методу необходимо провести дополнительные исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gerhard G. Principles of Leak Detection // Fundamentals of Leak Detection. Krohne. Oil & Gas. 2003. – P. 1–48. URL: [http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE\\_Gerhard\\_Geiger\\_Principles\\_of\\_Leak\\_Detection\\_2012.pdf](http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE_Gerhard_Geiger_Principles_of_Leak_Detection_2012.pdf) (дата обращения: 26.12.2012).
- Kelvin T. Erickson, E. Keith Stanek, Miller A. Reliability of Pressure Signals in Offshore Pipeline Leak Detection. – Rolla: University of Missouri-Rolla, 2004. – P. 1–85.
- Gorny M. Monitoring acoustic noise in steel pipelines // Proceedings of IPC2008 7<sup>th</sup> International Pipeline Conference. – Calgary, 2008. – P. 123–135.
- Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С.М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 2. – 621 с.
- Мамонова Т.Е. Метод определения утечки из нефтепровода, основанный на разности во времени давления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 216–219.
- Лурье М.В., Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1998. – № 12. – С. 65–69.
- Мамонова Т.Е. Обнаружение утечек из нефтепровода с использованием устройства для измерения изменений давления // Наука Красноярья. – 2012. – № 5 (05). – С. 102–112.
- Кононов А.А. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре // Образовательный ресурс по гидродинамике и гидропневмоприводу. 2011. URL: <http://gidravlnarod.ru/istechenie.html> (дата обращения: 26.12.2012).

Поступила 25.06.2013 г.

UDC 621.643

## INFLUENCE OF INSTALLATION COORDINATES OF PRESSURE MEASUREMENT DEVICES IN THE OIL PIPELINE ON ACCURACY IN DETERMINING LEAK PARAMETERS

**Tatyana E. Mamonova,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: mamte@sibmail.com

*The author proposes the method for determining leak coordinate and mass rate. The method is based on the analysis of indications of pressure gages located at the beginning and the end of a pipe, and along the pipeline. The paper describes the formulas for calculating leak coordinate and mass rate according to the offered modified method of hydraulic location. The experimental studies of the method and the rated formulas were carried out on the pipeline for pumping summer diesel fuel. The paper demonstrates the possibility of practical application of the described formulas on the offered method for determining leak parameters on the main pipelines. When analyzing the experimental results the author determined the dependences of calculation errors of leak coordinates and mass rate on location of pressure measurement devices in the pipeline.*

### Key words:

*Oil pipeline, loss in the oil pipeline, pressure measurement device, pipeline profile, pressure trend, placing pressure sensors Singular placing Plural placings.*

### REFERENCES

1. Gerhard G. Principles of Leak Detection. *Fundamentals of Leak Detection*. Krohne. Oil & Gas. 2003. pp. 1–48. Available at: [http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE\\_Gerhard\\_Geiger\\_Principles\\_of\\_Leak\\_Detection\\_2012.pdf](http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE_Gerhard_Geiger_Principles_of_Leak_Detection_2012.pdf) (accessed 26 December 2012).
2. Kelvin T. Erickson, E. Keith Stanek, Miller A. *Reliability of Pressure Signals in Offshore Pipeline Leak Detection*. Rolla, University of Missouri-Rolla, 2004. pp. 1–85.
3. Gorny M. Monitoring acoustic noise in steel pipelines. *Proceedings of IPC2008 7<sup>th</sup> International Pipeline Conference*. Calgary, 2008. pp. 123–135.
4. *Truboprovodnyy transport nefti* [Pipeline transport of oil]. Ed. by S.M. Vaynshtoka. Moscow, Nedra-Busines center Publ., 2004. Vol. 2. 621 p.
5. Mamonova T.E. Metod opredeleniya utechki iz nefteprovoda, osnovanny na raznosti vo vremeni davleniya [Method of leak definition from the oil pipeline, based on a difference in pressure time]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 216–219.
6. Lurye M.V., Makarov P.S. Gidravlicheskaya lokatsiya utechek nefteproduktov na uchastke truboprovoda [Hydraulic location of leakages of oil products on a pipeline site]. *Transport and storage of oil products*, 1998, no. 12, pp. 65–69.
7. Mamonova T.E. Obnaruzhenie utechek is nefteprovoda s ispolzovaniem ustroystva dlya izmereniya izmeneniy davleniya [Leaks detection from the oil pipeline by the device for measuring pressure changes]. *Nauka Krasnoyarska*, 2012, no. 5 (05), pp. 102–112.
8. Kononov A.A. Istecheniya cherez malye otverstiya v tonkoy stenke pri postoyannom napore [The expiration through small openings in a thin wall at a constant pressure]. *Obrasovatelnyy resurs po gidrodinamike i gidropevmoprivodu* [Educational resource on hydrodynamics and a hydropneumatic actuator]. Available at: <http://gidravl.narod.ru/istechenie.html> (accessed 26 December 2012).