



## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТЕЧКИ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДА

**Х.М.Гамзаев**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан*

### **A Method of Determining Leaks Transported Liquid from the Pipeline**

*Kh.M.Gamzaev*

*Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan*

#### **Abstract**

The problem of detecting leaks of oil and petroleum products from the pipeline is considered. For the mathematical description of the problem we use one-dimensional mathematical model of unsteady flow of a viscous incompressible fluid in pipeline, which includes the equation of motion and equation of continuity of fluid flow. In this case, the liquid leak is represented as a point drain described by the Delta function, and the continuity equation is compiled taking into account the point drain. The pressure and volume flow of the liquid in the initial and final sections of the pipeline are considered set. Taking into account the features of point runoff, the task is split into two tasks with matching conditions. Analytical solutions to the obtained problems are determined and explicit formulas are derived for determining the volume flow rate of the liquid for leakage and the coordinates of the leak location in the pipeline.

#### **Keywords:**

Method of leak detection;  
Location of leaks  
in pipelines;  
The fluid flow in  
the leakage;  
Inverse problem.

© 2021 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

### **Введение**

Известно, что трубопроводный транспорт является наиболее распространенным видом транспортировки нефти и нефтепродуктов. При транспортировке нефти и нефтепродуктов по трубопроводам, помимо эксплуатационных потерь, возникают и аварийные потери вследствие нарушения герметичности трубопроводов, несанкционированных врезок и т.д. Аварийные утечки приводят к потерям транспортируемого продукта и дополнительным затратам на проведение восстановительных и ремонтных работ. Кроме того, утечки наносят ощутимый урон окружающей среде, загрязняя атмосферу, почву и водоемы, в ряде случаев приводят к серьезным экологическим катастрофам. Очевидно, что возможный ущерб, возникающий при повреждении трубопроводов, можно уменьшить за счет оперативного обнаружения утечки и ее точного местоположения на трубопроводах. Поэтому одной из наиболее важных проблем эксплуатации трубопроводов является разработка системы обнаружения утечек и

установления ее местоположения.

Существует большое число работ, посвященных проблеме обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов из трубопроводов. К настоящему времени разработано большое количество методов и технических средств для обнаружения утечек и несанкционированных врезок, основанных на различных физических принципах. Подробный анализ методов, основанных на контроле и анализе физических характеристик процессов, происходящих в трубопроводах, приведен в работах [1–3]. Различные теоретико-практические подходы к исследованию проблемы обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов из трубопроводов, основанные на построении и использовании математических моделей происходящих в трубопроводах процессов, рассмотрены в работах [4–11]. Однако необходимо отметить, что несмотря на большое число теоретических и экспериментальных работ, нет единого подхода к решению проблемы обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов из трубопроводов.

В настоящей работе для обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов предлагается метод, основанный на использовании матема-

*E-mail:* xan.h@rambler.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20210100489>

гической модели процесса нестационарного течения несжимаемой вязкой жидкости по трубопроводу.

**Постановка задачи и метод решения**

Пусть рассматривается процесс нестационарного течения несжимаемой вязкой жидкости (нефть или нефтепродукт) в горизонтально расположенном цилиндрическом трубопроводе длиной  $l$ , внутренним диаметром  $d$ . Предполагается, что в сечении трубопровода  $x=0$  обеспечивается подача жидкости в трубопровод. Предположим, что начиная с момента  $t>0$  в сечении трубопровода, расположенном на расстоянии  $x^*$  от начала трубопровода, происходит утечка. Представляя утечку как точечный сток, описываемый дельта функцией Дирака, математическую модель данного процесса можно представить в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, включающую в себя уравнение движения:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{s} \cdot \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \rho \frac{Q(x,t)}{s^2} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \\ = -\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} - \frac{\lambda \rho}{2s^2 d} Q^2(x,t) \end{aligned} \tag{1}$$

и дифференциальное уравнение неразрывности потока жидкости с учетом расхода на утечку:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = -q(t)\delta(x-x^*) \tag{2}$$

- где  $P(x,t)$  – давление жидкости в трубопроводе;
- $Q(x,t)$  – объемный расход жидкости в трубопроводе;
- $q(t)$  – объемный расход жидкости на утечку;
- $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;
- $s=\pi d^2/4$  – площадь поперечного сечения трубопровода;
- $\rho$  – плотность жидкости;
- $\delta(x-x^*)$  – дельта функция Дирака.

Так как в начальном сечении трубопровода  $x=0$  обеспечивается подача жидкости в трубопровод, поэтому объемный расход жидкости и давление в этом сечении считаются заданными:

$$Q(0,t) = Q_0(t) \tag{3}$$

$$P(0,t) = P_0(t) \tag{4}$$

Теперь предположим, что места утечки  $x^*$  и объемный расход жидкости на утечку  $q(t)$  в трубопроводе не известны и подлежат определению. При этом в качестве дополнительных условий задаются объемный расход жидкости и давление в конечном сечении трубопровода:

$$Q(l,t) = Q_l(t) \tag{5}$$

$$P(l,t) = P_l(t) \tag{6}$$

Таким образом, задача заключается в определении распределения функций – давления  $P(x,t)$

и объемного расхода жидкости  $Q(x,t)$  по длине трубопровода, объемного расхода на утечку  $q(t)$  и координаты местоположения утечки  $x^*$ , удовлетворяющих уравнениям (1), (2) и условиям (3–6). Поставленная задача относится к классу обратных задач, связанных с восстановлением правых частей дифференциальных уравнений в частных производных [12].

Необходимо отметить, что наличие дельта функции в математической модели (1), (2) позволяет представить трубопровод, как состоящий из двух участков: от начального сечения трубопровода до места утечки и от места утечки до конечного сечения трубопровода. Следовательно, записав уравнения (1), (2) для каждого участка трубопровода, можно расщепить задачу (1)–(6) на следующие две задачи:

на первом участке –  $0 < x < x^*$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{s} \cdot \frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial t} + \rho \frac{Q_1(x,t)}{s^2} \cdot \frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial x} = \\ = -\frac{\partial P_1(x,t)}{\partial x} - \frac{\lambda \rho}{2s^2 d} Q_1^2(x,t) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial x} = 0 \tag{8}$$

$$P_1(0,t) = P_0(t) \tag{9}$$

$$Q_1(0,t) = Q_0(t) \tag{10}$$

на втором участке –  $x^* < x < l$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{s} \cdot \frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial t} + \rho \frac{Q_2(x,t)}{s^2} \cdot \frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial x} = \\ = -\frac{\partial P_2(x,t)}{\partial x} - \frac{\lambda \rho}{2s^2 d} Q_2^2(x,t) \end{aligned} \tag{11}$$

$$\frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial x} = 0 \tag{12}$$

$$P_2(l,t) = P_l(t) \tag{13}$$

$$Q_2(l,t) = Q_l(t) \tag{14}$$

где  $P(x,t) = \begin{cases} P_1(x,t), & 0 \leq x < x^* \\ P_2(x,t), & x^* \leq x \leq l \end{cases}$

$$Q(x,t) = \begin{cases} Q_1(x,t), & 0 \leq x < x^* \\ Q_2(x,t), & x^* < x \leq l \end{cases}$$

Связь между решениями задач (7–10) и (11–14) осуществляется с помощью соотношения:

$$Q_2(x,t) \Big|_{x=x^*} - Q_1(x,t) \Big|_{x=x^*} = -q(t) \tag{15}$$

полученного при интегрировании уравнения (2). Данное соотношение означает разрыв объемного расхода жидкости в сечении  $x^*$ , причем разность объемных расходов справа и слева в сечении  $x=x^*$  равна объемному расходу на утечку в трубопроводе. Предполагая неразрывность давления во всех сечениях трубопровода, включая  $x=x^*$ , при-

ходим ко второму соотношению:

$$P_1(x,t)\Big|_{x=x^*} = P_2(x,t)\Big|_{x=x^*} \quad (16)$$

Сначала построим аналитическое решение задачи (7–10). Проинтегрируем уравнение (8) с учетом граничного условия (10). В результате будем иметь:

$$Q_1(x,t) = Q_0(t) \quad (17)$$

Полученное решение подставим в уравнение (7)

$$\frac{\rho}{s} \cdot \frac{dQ_0(t)}{dt} = -\frac{\partial P_1(x,t)}{\partial x} - \frac{\lambda\rho}{2s^2d} Q_0^2(t)$$

Выполнив интегрирование последнего уравнения по переменной  $x$  с учетом граничного условия (9), получим:

$$P_1(x,t) = P_0(t) - \beta(t)x \quad (18)$$

где

$$\beta(t) = \frac{\rho}{s} \cdot \frac{dQ_0(t)}{dt} + \frac{\lambda\rho}{2s^2d} Q_0^2(t)$$

Аналогично определяется аналитическое решение задачи (11–14):

$$Q_2(x,t) = Q_1(t) \quad (19)$$

$$P_2(x,t) = P_1(t) - \alpha(t)(l-x) \quad (20)$$

$$\alpha(t) = \frac{\rho}{s} \cdot \frac{dQ_1(t)}{dt} + \frac{\lambda\rho}{2s^2d} Q_1^2(t)$$

Подставив (17) и (19) в соотношение (15), находим объемный расход жидкости на утечку в трубопроводе:

$$q(t) = Q_0(t) - Q_1(t) \quad (21)$$

Для определения места утечки в трубопроводе используем соотношение (16). Подставляя в соотношение (16) выражения  $P_1(x,t)$  и  $P_2(x,t)$  из (18) и (20), получим следующую формулу для определения места утечки в трубопроводе:

$$x^* = \frac{P_0(t) - P_1(t) - l\alpha(t)}{\beta(t) - \alpha(t)} \quad (22)$$

Таким образом, путем использования данных измерений параметров потока в начальном и конечном сечениях трубопровода (давление, объемный расход жидкости), с помощью формул (21) и (22) можно определять объемный расход жидкости на утечку и места утечки в трубопроводе. Следует отметить, что полученные расчетные формулы (17)–(22) можно использовать и для стационарного потока жидкостей в трубопроводе.

### Заключение

Для обнаружения утечки нефти и нефтепродуктов из трубопровода предлагается использовать одномерную математическую модель нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости по трубопроводу. Предложенный подход позволяет по явным формулам определять распределения давления и объемного расхода жидкости по длине трубопровода, объемного расхода на утечку и координаты местоположения утечки.

## Литература

1. Гольянов, А. А. (2002). Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах. *Транспорт и хранение нефтепродуктов*, 10–11, 5–14.
2. Шестаков, Р. А. (2019). Разработка методики параметрической диагностики технологических участков магистральных нефтепроводов. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Москва: РГУ им. И.М.Губкина.
3. Fiedler, J. (2016). An overview of pipeline leak detection technologies. <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2016/02/004.pdf>
4. Zhao, Y., Zhuang, X., Min, S. (2010). A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis. *Energy*, 35( 9), 3814-3820.
5. Uttam, R. (2017). Leak detection in pipe networks using hybrid ANN method. *Water Conservation Science and Engineering*, 2, 145–152.
6. Marllene, D. (2010). A model based approach for pipeline monitoring and leak locating. In: 15th *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Melecon*.
7. Воеводин, А. Ф., Никифоровская, В. С. (2009). Численный метод определения места утечки жидкости или газа в трубопроводе. *Сибирский журнал индустриальной математики*, 12(1), 25–30.
8. Aida-zade, K. R., Ashrafova, E. R. (2017). Numerical leak detection in a pipeline network of complex structure with unsteady flow. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 57(12), 1919–1934.
9. Гамзаев, Х. М. (2008). Метод обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов в трубопроводах. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, 2, 24-25.
10. Лурье, М. В., Зверев, Ф. С. (2012). Метод зональной локации для обнаружения утечек нефти из трубопровода. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*, 1, 48-51.
11. Бондарь, Д. В., Жолобов, В. В., Варыбок, Д. И., Надежкин, О. С. (2018). О тестировании алгоритмов обнаружения утечек на основе функций чувствительности. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, 4, 194-233.
12. Самарский, А. А., Вабищевич, П. Н. (2009). Численные методы решения обратных задач математической физики. Москва: ЛКИ.

## References

1. Gol'yanov, A. A. (2002). Analiz metodov obnaruzheniya utechek na nefteprovodah. *Transport i hranenie nefteproduktov*, 10–11, 5–14.
2. Shestakov, R. A. (2019). Razrabotka metodiki parametricheskoj diagnostiki tekhnologicheskikh uchastkov magistral'nyh nefteprovodov. *Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk*. Moskva: RGU im. I.M.Gubkina.
3. Fiedler, J. (2016). An overview of pipeline leak detection technologies. <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2016/02/004.pdf>
4. Zhao, Y., Zhuang, X., Min, S. (2010). A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis. *Energy*, 35( 9), 3814-3820.
5. Uttam, R. (2017). Leak detection in pipe networks using hybrid ANN method. *Water Conservation Science and Engineering*, 2, 145–152.
6. Marllene, D. (2010). A model based approach for pipeline monitoring and leak locating. In: 15th *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Melecon*.
7. Voevodin, A. F., Nikiforovskaya, V. S. (2009). Chislennyj metod opredeleniya mesta utechki zhidkosti ili gaza v truboprovode. *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki*, 12(1), 25–30.
8. Aida-zade, K. R., Ashrafova, E. R. (2017). Numerical leak detection in a pipeline network of complex structure with unsteady flow. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 57(12), 1919–1934.
9. Gamzaev, H. M. (2008). Metod obnaruzheniya utechek nefiti i nefteproduktov v truboprovodah. *Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti*, 2, 24-25.
10. Lurie, M. V., Zverev, F. S. (2012). Method of zonal location to detect oil leaks. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 1, 48-51.
11. Bondar, D. V., Zholobov, V. V., Varybok, D. I., Nadezhkin, O. S. (2018). About the testing of the leak detecting algorithms based on the sensitivity function. *The electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 4, 194-233.
12. Samarskii, A. A., Vabishchevich, P. N. (2009). Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics. *Moscow: LKI*.

## Метод определения утечки транспортируемой жидкости из трубопровода

*Х.М.Гамзаев*

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

### Реферат

Рассматривается задача обнаружения утечки нефти и нефтепродуктов из трубопровода. Для математического описания задачи используется одномерная математическая модель нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости по трубопроводу, включающая в себя уравнение движения и уравнение неразрывности потока жидкости. При этом утечка жидкости представляется как точечный сток, описываемый дельта функцией, и уравнение неразрывности составляется с учетом точечного стока. Давление и объемный расход жидкости в начальном и конечном сечениях трубопровода считаются заданными. Учитывая особенности точечного стока, поставленная задача расщепляется на две задачи с условиями сопряжения. Определены аналитические решения полученных задач и выведены явные формулы для определения объемного расхода жидкости на утечку и координаты местоположения утечки в трубопроводе.

**Ключевые слова:** метод обнаружения утечек; место утечки в трубопроводах; расход жидкости на утечку; обратная задача.

## Boru kəməmindən nəql olunan mayenin sızmasının təyin edilməsi üsulu

*Х.М.Нəмзəyəв*

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan

### Xülasə

Boru kəməmindən neft və neft məhsullarının sızmasının aşkar olunması məsələsinə baxılır. Məsələnin riyazi təsviri üçün sıxılmayan özlü mayenin boru kəməri ilə qeyri stasionar axınının hərəkət tənliyi və maye axınının kəsilməzlik tənliyindən ibarət olan bir ölçülü riyazi modelindən istifadə edilir. Bu zaman mayenin sızması delta funksiya ilə təsvir olunan nöqtəvi axın şəklində təqdim edilir və kəsilməzlik tənliyi nöqtəvi axın nəzərə alınmaqla yazılır. Boru kəmərinin başlanğıc və sonuncu kəsiklərində təzyiq və mayenin həcmi sərfi verilmiş hesab edilir. Qoyulmuş məsələ nöqtəvi axının məxsusiyyəti nəzərə alınmaqla qoşulma şərtləri ilə əlaqələndirilən iki məsələyə parçalanır. Alınmış məsələlərin analitik həlləri qurulmuş, mayenin sızmaya həcmi sərfinin və boru kəməmində sızma yerinin koordinatının təyin edilməsi üçün aşkar düsturlar çıxarılmışdır.

**Açar sözlər:** sızmanı aşkar etmə üsulu; boru kəməmində sızma yeri; mayenin sızmaya sərfi; tərs məsələ.