

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-5-152-157

УДК 622.692; 621.544

Э.И. Гусейнли (Государственный институт водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика), **Р.А. Эминов, С.Г. Абдурагимов** (Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика)

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Elmir I. Huseynli (State Research Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan), **Ramiz A. Eminov, Sahib G. Abdurahimov** (Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan)

OPTIMIZATION OF THE PRESURE NEGATIVE WAVE METHOD UNDER PIPELINES STATE DIAGNOSTICS

Введение

С развитием микроэлектромеханических систем стали появляются малогабаритные устройства диагностики состояния трубопроводов, а на их основе - беспроводные сети контроля возникновения утечек на магистральных трубопроводах. Основным недостатком оптических методов является их относительно низкое быстродействие, т.к. для их нормального функционирования необходим выход определенного количества газа во внешнее пространство. Указанный недостаток свойственен практически всем прямым методам детектирования утечки газа, поскольку необходимо взаимодействие зондирующего сигнала (оптического, акустического или другого типа) с образовавшимся облаком газа. В отличие от таких прямых методов существуют косвенные методы, в которых детектируется не сама внутритрубая масса, а некоторый показатель этой массы внутри трубопровода. В методе регистрации отрицательной волны давления внутри трубопровода таким показателем является давление в трубе.

Background

With the development of microelectromechanical systems, small-sized devices for diagnosing the state of pipelines appear, and based on them, wireless networks for monitoring the occurrence of leaks in main pipelines. The main disadvantage of optical methods is their relatively low speed, because for their normal functioning, a certain amount of gas must exit into the outer space. This drawback is a characteristic of almost all direct methods for detecting a gas leak, since the interaction of a probing signal (optical, acoustic or other type) with the gas cloud formed is necessary. In contrast to such direct methods, there are indirect methods in which it is not the in-tube mass itself that is detected, but some indicator of this mass inside the pipeline. In the method of registering a negative pressure wave inside the pipeline, such an indicator is the pressure in the pipe.

The article is devoted to optimizing the diagnosis of pipe lines using the negative pressure wave method.

Статья посвящена оптимизации диагностики трубных линий при использовании метода отрицательной волны давления.

Цели и задачи

Постановка задачи оптимизации метода отрицательной волны давления для определения места утечки из трубопровода.

Результаты

Решение задачи определения места утечки из трубопровода методом безусловной вариационной оптимизации показало, что в секциях магистрального трубопровода, где межсенсорный интервал выше, давление в трубе следует снизить, чтобы можно было достичь максимального значения среднего по секциям трубопровода детектируемого расстояния до утечки.

Определено условие, при котором давление в соответствующей секции трубопровода может иметь минимальное значение.

Aims and Objectives

Development of the optimization task for the pressure negative wave method to determine the place of leakage from the pipeline.

Results

The solution to the task of determining the place of leakage from the pipeline by the method of unconditional variational optimization showed that in main pipeline sections, where the intersensory interval is higher, the pressure in the pipe should be reduced so that the maximum value of the average detectable distance to the leakage in sections of the pipeline can be reached.

The condition is calculated under which the pressure in the corresponding section of the pipeline can have a minimum value.

Ключевые слова: отрицательная волна давления; диагностика; трубопровод; оптимизация; сенсоры; утечка

Key words: pressure negative wave; diagnostics; pipeline; optimization; sensors; leak

Введение

С развитием микроэлектромеханических систем стали появляться малогабаритные устройства диагностики состояния трубопроводов, а на их основе - беспроводные сети контроля возникновения утечек на магистральных трубопроводах [1-3].

Методы обнаружения утечек из трубопроводов могут быть классифицированы по различным признакам. Различают оптические и неоптические [4], прямые и косвенные методы [5]. Оптические методы в основном базируются на явлениях поглощения и отражения оптического сигнала молекулами вышедшей наружу внутритрубной жидкости или газов. Основным недостатком оптических методов является их относительно низкое быстродействие, т.к. для их нормального функционирования необходим выход определен-

ного количества газа во внешнее пространство. Указанный недостаток свойственен практически всем прямым методам детектирования утечки газа, поскольку в принципе необходимо взаимодействие зондирующего сигнала (оптического, акустического или другого типа) с образовавшимся облаком газа. В отличие от таких прямых методов существуют косвенные методы, в которых детектируется не сама внутритрубная масса, а некоторый показатель этой массы внутри трубопровода.

В методе регистрации отрицательной волны давления внутри трубопровода таким показателем является давление в трубе. Суть указанного метода вкратце заключается в следующем. При возникновении утечки из трубы давление в ней падает. Это происходит из-за резкого уменьшения плотности внутритрубной массы. Возникшая при этом волна давления начинает движение от места воз-

никновения утечки. Указанная волна регистрируется датчиками давления, установленными по обе стороны от места утечки. Вычисляется разность времен прихода волны парой близрасположенных датчиков давления, и на этой основе определяется место возникшей утечки.

Постановка задачи

Принцип работы метода отрицательной волны давления иллюстрируется на рисунке 1.

Следуя работе [6], будем считать, что скоростью газа в трубе U по сравнению со скоростью распространения v отрицательной волны давления в трубе нельзя пренебречь.

Согласно работе [5], время достижения отрицательной волной давления левого датчика может быть определено по формуле:

$$t_1 = \frac{x}{v - U}. \quad (1)$$

Аналогично (1) время достижения указанной волной правого датчика определим как [5]:

$$t_2 = \frac{L - x}{v + U}. \quad (2)$$

Согласно [5, 6], из (1) и (2) можно получить следующее уравнение:

$$x = \frac{1}{2v} [L(v - U) + \Delta t(v^2 - U^2)], \quad (3)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$.

Задача исследования в настоящей статье формулируется дуально.

Задача 1 может быть сформулирована следующим образом. Примем, что магистральный газопровод состоит из последовательно соединенных секций давления, размещенных с определенным шагом L . При этом давление в секциях трубопровода разное.

Стоит определить оптимальное соотношение между скоростью движения газа в трубопроводе и длиной межсенсорного интервала L .

Критерием оптимальности является достижение максимальной величины x , т.е. достижение регистрации максимально возможной величины расстояния до точки утечки.

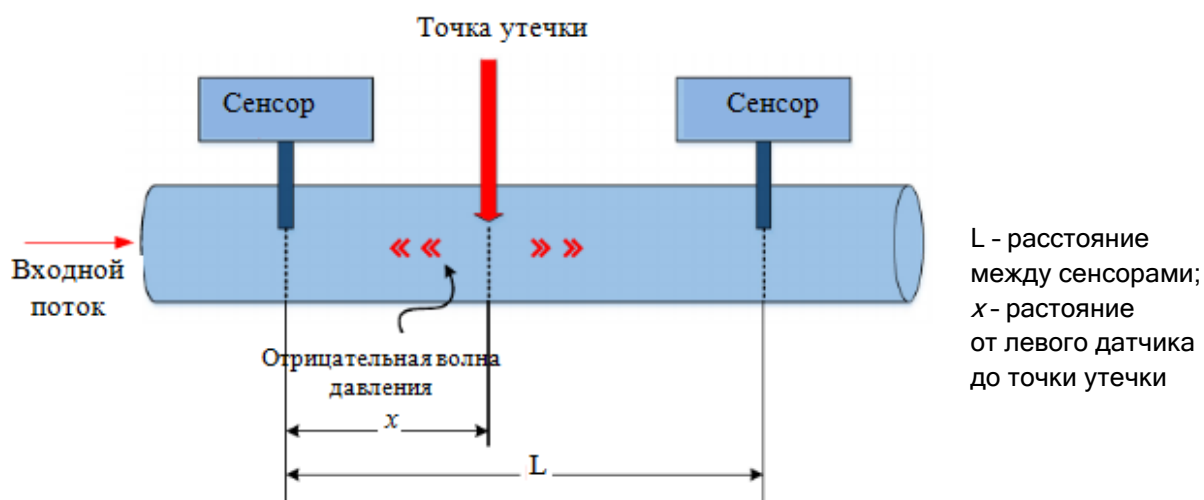


Рисунок 1. Иллюстрация принципа работы метода отрицательной волны давления

Задача 2 формулируется похожим образом. Допустим, что осуществляется строительство нескольких газопроводов, в которых из-за различия давления в этих трубопроводах планируется устанавливать датчики давления с различным интервалом L . Требуется определить оптимальную взаимосвязь между L и скоростью передвижения газа в трубах (или давлением газа в трубе), при которой достигается максимальная величина x .

Предлагаемое решение

Представим предлагаемое решение вышеуказанной дуальной задачи с использованием метода безусловной вариационной оптимизации.

Прежде всего, рассмотрим принимаемое ограничительное условие. Будем считать, что в отношении функциональной зависимости $U = f(L)$ можно принять следующее дуальное решение:

(a) функция $f(L)$ является линейной растущей функцией типа

$$f_1(L) = U_{01} + k_1L; \quad (4)$$

(b) функция $f(L)$ является линейной убывающей функцией типа

$$f_2(L) = U_{02} + k_2L. \quad (5)$$

При этом существует следующее ограничение

$$\int_0^{L_{max}} f_i(L)dL = C; C = const; i = \overline{1, 2}. \quad (6)$$

Физически ограничение (6) объясняется заданным ресурсом энергии, затрачиваемой на поддержание необходимого давления в трубопроводе.

Рассмотрим вопросы формирования критерия оптимизации для решения сформулированной задачи. Прежде всего, отметим, что ограничительное условие (6) предполагает наличие модели секций трубопровода, в которых датчики давления устанавливаются с интервалом L_k , где $k = \overline{1, n}$; n – количество

секций в магистральном трубопроводе. При этом

$$L_j = L_k + (j - i) \cdot \Delta L, \quad (7)$$

где $\Delta L = const$;
 $j = \overline{1, n}$.

Следовательно, множество

$$L = \{L_k\} \quad (8)$$

является упорядоченным множеством.

Для дискретного случая аналог условия (6) имеет вид

$$\sum_{k=1}^n f_i(L_k) = C_g \quad (9)$$

$$C_g = const.$$

Условно считаем, что при достаточно большом n достигается приближительное равенство

$$C_g \approx C. \quad (10)$$

Таким образом, переход от дискретной модели (9) к непрерывной модели (6) вполне корректен, т.к. любой определенный интеграл может быть вычислен с помощью составления определенной суммы трапеций по методу Симпсона.

Основной функционал оптимизации с учетом выражения (3) определим следующим образом:

$$F_1 = \int_0^{L_{max}} \frac{1}{2v} [L(v - U) + \Delta t(v^2 - U^2)]dL. \quad (11)$$

С учетом искомой функции $U = f(L)$ выражение (11) примет следующий вид:

$$F_1 = \frac{1}{2v} \int_0^{L_{max}} [L(v - f(L)) + \Delta t(v^2 - f^2(L))]dL. \quad (12)$$

Используя выражения (6) и (12) составим функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \frac{1}{2v} \int_0^{L_{max}} [L(v - f(L)) + \Delta t(v^2 - f^2(L))] dL + \left[\int_0^{L_{max}} f(L) dL - C \right], \quad (13)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера-Лагранжа, решение оптимизационной задачи должно удовлетворять следующему условию:

$$\frac{d\{L(v - f(L)) + \Delta t(v^2 - f^2(L))\}}{df(L)} = 0. \quad (14)$$

С учетом условия (14) получаем

$$-L - 2\Delta t f(L) + \lambda = 0. \quad (15)$$

Из выражения (15) находим

$$f(L) = \frac{\lambda - L}{2\Delta t}. \quad (16)$$

С учетом выражений (6) и (16) имеем

$$\int_0^{L_{max}} \frac{\lambda - L}{2\Delta t} dL = C. \quad (17)$$

Из выражения (17) получим

$$\frac{\lambda L_{max}}{2\Delta t} - \frac{\lambda L_{max}^2}{4\Delta t} = C. \quad (18)$$

Из выражения (18) вычислим λ

$$\lambda = \frac{2C \cdot \Delta t}{L_{max}} + \frac{L_{max}}{4\Delta t}. \quad (19)$$

С учетом выражений (16) и (19) получим

$$f(L) = \frac{C}{L_{max}} + \frac{L_{max}}{4\Delta t} - \frac{L}{2\Delta t}. \quad (20)$$

Таким образом, при решении (20) целевой функционал (13) достигает экстремума. Нетрудно показать, что этот экстремум является максимумом, т.к. производная (15) по $f(L)$ дает отрицательную величину.

Обсуждение результатов

Как видно из полученного решения (20), с ростом L показатель U должен уменьшаться. Следовательно, в секциях магистрального трубопровода, где межсенсорный интервал большой, давление в трубе должно быть уменьшено для достижения максимальной величины F_0 .

Кроме этого, как видно из выражения (20), $f(L)$ имеет определенный минимум от L_{max} .

Имеем

$$\frac{df(L)}{dL_{max}} = -\frac{C}{L_{max}^2} - \frac{1}{4\Delta t}. \quad (21)$$

Из (21) находим условие минимума $f(L)$ от L_{max}

$$L_{max} = 2\sqrt{C\Delta t}. \quad (22)$$

Таким образом, при условии (22) величину $f(L)$ можно выбрать в наименьшем значении, т.е. оптимальное значение давления в соответствующей секции трубы может иметь наименьшую величину.

Выводы

1. Сформулирована задача оптимизации метода отрицательной волны давления для определения места утечки из трубопровода.

2. Решение задачи методом безусловной вариационной оптимизации показало, что в секциях магистрального трубопровода, где межсенсорный интервал выше, давление в трубе следует снизить, чтобы можно было достичь максимального значения средней по секциям трубопровода величины детектируемого расстояния до утечки.

3. Определено условие, при котором давление в соответствующей секции трубопровода может иметь минимальное значение.

Список литературы

1. Carrano R., Passos D., Magalhaes L., Albuquerque C. Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16.

References

1. Carrano R., Passos D., Magalhaes L., Albuquerque C. Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, Vol. 16,

Issue 1. P. 181-194. DOI: 10.1109/SURV.2013.052213.00116.

2. Jawhar I., Mohamed N., Shuaib K. A Framework for Pipeline Infrastructure Monitoring Using Wireless Sensor Networks // 2007 Wireless Telecommunications Symposium. Pomona, California, USA. 2007. P. 1-7. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4563333> (accessed 23.07.2019). DOI: 10.1109/WTS.2007.4563333.

3. Stoianov I., Nachman L., Madden S., Tokmouline T., Csail M. PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring // Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Cambridge, Massachusetts, USA. 2007. P. 264-273. DOI:10.1145/1236360.1236396.

4. Sivathanu Y. Technology Status Report on Natural Gas Leak Detection in Pipelines. West Lafayette: En'Urga Inc, 2003. 10 p.

5. Folga S.M. Natural Gas Pipeline Technology Overview. Lemont: Argonne National Laboratory, 2007. 68 p.

6. Hauge E., Aamo O.M., Godhavn J.-M. Model Based Pipeline Monitoring with Leak Detection // 7th IFAC Symp. on Nonlinear Control Syst. NOLCOS'2007. Pretoria, South Africa. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/228400669_Model_based_pipeline_monitoring_with_leak_detection (accessed 23.07.2019).

Issue 1, pp. 181-194 DOI: 10.1109/SURV.2013.052213.00116.

2. Jawhar I., Mohamed N., Shuaib K. A Framework for Pipeline Infrastructure Monitoring Using Wireless Sensor Networks. 2007 Wireless Telecommunications Symposium. Pomona, California, USA, 2007, pp. 1-7. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4563333> (accessed 23.07.2019). DOI: 10.1109/WTS.2007.4563333.

3. Stoianov I., Nachman L., Madden S., Tokmouline T., Csail M. PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring. *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Cambridge, Massachusetts, USA, 2007, pp. 264-273. DOI:10.1145/1236360.1236396.

4. Sivathanu Y. *Technology Status Report on Natural Gas Leak Detection in Pipelines*. West Lafayette, En'Urga Inc, 2003. 10 p.

5. Folga S.M. *Natural Gas Pipeline Technology Overview*. Lemont, Argonne National Laboratory, 2007. 68 p.

6. Hauge E., Aamo O.M., Godhavn J.-M. Model Based Pipeline Monitoring with Leak Detection. *7th IFAC Symp. on Nonlinear Control Syst. NOLCOS'2007. Pretoria, South Africa*. 2007. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228400669_Model_based_pipeline_monitoring_with_leak_detection (accessed 23.07.2019).

Авторы

• Гусейнли Эльмир Имран оглы
Докторант Государственного института водных проблем
Азербайджанская Республика, AZ 1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: elmir-huseynov_91@mail.ru

• Эминов Рамиз Ахмед оглы, канд. техн. наук
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Доцент кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа»
Азербайджанская Республика, Az1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: Eminovramiz@mail.ru

• Абдурагимов Сахиб Гусейнбала оглы, канд. техн. наук
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»
Азербайджанская Республика, Az1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: Sahib_matematik@mail.ru

The Authors

• Huseynli Elmir I.
Doctorant of State Research Institute of Water Problems
20, Azadliq ave., Baku, Republic of Azerbaijan, AZ 1010
e-mail: Elmir-Huseynov_91@mail.ru

• Eminov Ramiz A., Candidate of Engineering Sciences
Azerbaijan State Oil and Industry University
Assistant Professor of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department
20, Azadlig ave., Baku, Az1010, Republic of Azerbaijan
e-mail: Eminovramiz@mail.ru

• Abdurahimov Sahib G., Candidate of Engineering Sciences
Azerbaijan State Oil and Industry University
Assistant Professor of Transportation and Storage of Oil and Gas Department
20, Azadlig ave., Baku, Az1010, Republic of Azerbaijan
e-mail: Sahib_matematik@mail.ru