

УДК 621.37/.39

И.Г. Гусарова, Е.В. Авилова

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ЭФФЕКТИВНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ УТЕЧКИ ИЛИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ОТБОРА ГАЗА

*Утечки и несанкционированные отборы газа могут привести к аварийным ситуациям, причиняющим как экологический, так и экономический ущерб. Помимо своевременного распознавания факта возникновения утечки или несанкционированного отбора газа в трубопроводной сети, одной из наиболее актуальных задач является разработка эффективного метода идентификации места события. В работе описывается численный метод определения местоположения утечки, основанный на сведении исходной задачи к оптимизационной задаче, и ее последующем решении с использованием математического моделирования нестационарного неизотермического режима транспорта газа по участку трубопровода с утечкой на нем (или с несанкционированным отбором). Метод показывает высокое быстродействие.*

**Ключевые слова:** газотранспортная система, утечка газа, несанкционированный отбор, участок трубопровода, задача оптимизации, моделирование, нестационарный неизотермический режим.

### Введение

Украина располагает значительными запасами энергетических ресурсов и мощным топливно-энергетическим комплексом, который является базой развития экономики, инструментом проведения внутренней и внешней политики. Роль страны на мировых энергетических рынках во многом определяет ее геополитическое влияние. В то же время, вопросы обеспечения энергетической безопасности Украины в целом и бесперебойного энергоснабжения отдельных её регионов являются приоритетными направлениями государственной политики.

Стратегически важной задачей топливно-энергетического комплекса Украины является обеспечение надежного и безопасного транспортирования природного газа по многониточным линейным участкам газотранспортной системы. Одной из наиболее актуальных задач обеспечения надежного транспорта газа является своевременное распознавание факта возникновения тех или иных событий в состоянии трубопроводной сети: засорения трубопроводов; утечки или несанкционированного отбора газа; разрыва трубопровода, а также идентификация места события.

Предположим, что на рассматриваемом участке магистрального газопровода выявлена утечка (несанкционированный отбор) газа, а также определена ее величина. Серьезной проблемой (особенно для подземных трубопроводов) является идентификация места аварии (разрыва, утечки газа) для проведения ремонтных работ.

В литературе известны множество методов определения утечек природного газа на участке трубопровода [3 – 7]. Все они относятся к двум группам: базирующиеся на анализе воздействия утечки на

окружающую среду и на параметры газового потока. Анализ вышеизложенных методов показал, что целесообразным представляется метод, основанный на результатах моделирования нестационарных неизотермических режимов работы односторонних линейных участков газотранспортной системы (ЛУ ГТС) совместно с результатами измерений SCADA-системами параметров газового потока с замерных узлов (ЗУ), расположенных на ЛУ ГТС.

**Цель статьи:** постановка задачи определения местоположения утечки или несанкционированного отбора на участке трубопровода между двумя замерными узлами, на которых располагаются приборы расчетного учета природного газа, и выбор эффективного метода ее решения. При этом факт утечки (отбора) считается установленным, а ее величина – известной.

### Формальная постановка задачи

Рассматривается задача получения оценки местоположения  $X$  утечки (несанкционированного отбора) газа на участке трубопровода (УТ) между  $n$ -м и  $(n+1)$ -м замерными узлами. При определении координаты точки  $X$  известно, что  $X$  разбивает линейный участок, на котором утечка произошла, на два участка – до местоположения утечки  $[X_n, X]$  и после местоположения утечки  $[X, X_{n+1}]$ . Время возникновения утечки  $t_{нач}$  и ее интенсивность  $Q(t)$  в момент времени  $t \in [t_{нач}, t_{кон}]$  считаем определенными.

В качестве критерия рассматриваемой задачи можно использовать сумму квадратичных невязок рассогласования расчетных и замеренных параметров газового потока в узлах  $X_n$  и  $X_{n+1}$  [2].

Таким образом, постановка оптимизационной задачи для получения оценки местоположения утечки  $X$  формулируется следующим образом [4]: необходимо найти местоположение утечки  $X$  на участке между  $n$ -м и  $(n+1)$ -м ЗУ в момент времени  $t$ , позволяющее минимизировать целевую функцию вида

$$F(X) = \sum_{t_{\text{нач}} \leq t \leq t_{\text{кон}}} \left( \frac{1}{\hat{\sigma}_{Q_{0n}}^2} (\hat{Q}_{0n}(t) - Q''_{0n}(X, t))^2 + \frac{1}{\hat{\sigma}_{P_{n+1}}^2} (\tilde{P}_{n+1}(t) - P''_{n+1}(X, t))^2 + \frac{1}{\hat{\sigma}_{T_{n+1}}^2} (\tilde{T}_{n+1}(t) - T''_{n+1}(X, t))^2 \right) \rightarrow \min_{\substack{X_n \leq X \leq X_{n+1} \\ X \in \Omega}}, \quad (1)$$

где  $Q''_{0n}(X, t)$ ,  $P''_{n+1}(X, t)$ ,  $T''_{n+1}(X, t)$  – расчетные значения параметров газового потока (объемный расход, давление, температура) в  $n$ -м и  $(n+1)$ -м ЗУ соответственно, получаемые из решения задачи при условии, что местоположение утечки –  $X$ ,  $\hat{\sigma}_{Q_{0n}}(t)$  – оценка измерений приведенного объемного расхода в  $n$ -м ЗУ,  $\tilde{P}_{n+1}(t)$ ,  $\tilde{T}_{n+1}(t)$  – результаты измерений давления и температуры в  $(n+1)$ -м ЗУ,  $\hat{\sigma}_{Q_{0n}}^2$ ,  $\hat{\sigma}_{P_{n+1}}^2$ ,  $\hat{\sigma}_{T_{n+1}}^2$  – дисперсии всех измерений параметров газового потока.

В момент возникновения утечек, а особенно несанкционированных отборов, режимы транспорта газа являются нестационарными неизотермическими [4].

Для общего случая нестационарный неизотермический режим транспорта газа (ННРТГ) по участку трубопровода, представляющему собой цилиндрическую трубу постоянного диаметра, описывается квазилинейной системой дифференциальных уравнений (КСДУ) в частных производных гиперболического типа, полученной из общих законов механики сплошной среды законов сохранения: количества движения, неразрывности потока, энергии [1].

Область ограничений  $\Omega$  представляет собой КСДУ в частных производных, описывающие ННРТГ по участкам трубопровода до утечки  $[X_n, X]$  и после утечки  $[X, X_{n+1}]$ , связанные между собой условиями согласования в точке  $X$  местоположения утечки (отбора).

Утверждение об унимодальности целевой функции (1), основанное на характере изменения значений параметров газового потока на концах участка в зависимости от близости к ним точки утечки (отбора), позволяет воспользоваться при решении рассматриваемой оптимизационной задачи

минимизации методами прямого поиска, в частности, методом золотого сечения.

Решение может быть получено путем сведения данной задачи к решению задачи моделирования ННРТГ на линейном участке, состоящем из двух участков трубопровода с отбором между ними, и выбора из полученных решений оптимального [4].

### Математическая модель ННРТГ по линейному участку трубопровода при условии утечки

Математическая модель ННРТГ по линейному участку при условии утечки представляет собой две взаимосвязанные КСДУ в частных производных, каждая из которых описывает ННРТГ по участкам трубопровода до утечки  $[X_n, X]$  и после утечки  $[X, X_{n+1}]$  [4]:

$$\frac{\partial \varphi_m}{\partial t} + B^m(x, t, \varphi_m(x, t)) \frac{\partial \varphi_m}{\partial x} = \Phi^m(x, t, \varphi_m(x, t)),$$

где  $\varphi_m(x, t) = (W^m(x, t), P^m(x, t), T^m(x, t))$ ;

$W^m(x, t)$ ,  $P^m(x, t)$ ,  $T^m(x, t)$  – удельный массовый расход, давление и температура на  $m$ -м УТ,  $m = 1, 2$ .

Для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных используется метод, основанный на применении метода конечных разностей (метода сеток), суть которого состоит в сведении этой системы к некоторой системе нелинейных алгебраических уравнений. Аппроксимация уравнений систем проведена по неявной конечно-разностной схеме, определенной на четырехточечном шаблоне.

Граничные условия задаются в начале первого участка и конце второго участка.

Граничные условия состоят в следующем:

I типа – в задании давления как функции времени  $P = P(t)$ ,

II типа – в задании массового расхода как функции времени  $G = G(t)$  ( $G = W \cdot S$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения трубы),

III типа – в задании температуры как функции времени  $T = T(t)$ .

Частным случаем является задание давления и температуры в начале первого участка, а также массового расхода в конце второго участка:

$$P^1(0, t) = P^1(t), \quad T^1(0, t) = T^1(t),$$

$$G^2(L_2, t) = G^2(t),$$

где  $P^1(t)$ ,  $T^1(t)$ ,  $G^2(t)$  – заданные функции.

Начальное распределение задается как

$$W^m(x,0) = W_0^m(x),$$

$$P^m(x,0) = P_0^m(x),$$

$$T^m(x,0) = T_0^m(x),$$

где  $x \in [0, L_m]$ ;  $L_m$  – длина участка;  $W_0^m(x)$ ,  $P_0^m(x)$ ,  $T_0^m(x)$  – заданные функции,  $m = 1, 2$ .

Данные системы взаимосвязаны системой алгебраических уравнений, определяющих условия согласования в образовавшемся узле  $X$ :

$$P^1(L_1, t) = P^2(0, t),$$

$$T^1(L_1, t) = T^2(0, t),$$

$$G^2(0, t) = G^1(L_1, t) - G(t), \quad t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}],$$

где  $G(t) = Q(t) \cdot \rho_0(t)$ ,  $\rho_0(t)$  – плотность газа при стандартных условиях.

### Метод решения оптимизационной задачи

Одним из самых известных методов прямого поиска является метод золотого сечения.

Золотым сечением называется такое разбиение отрезка на две неравные части, что отношение длины всего отрезка к длине большей части отрезка равно отношению длины большей части к длине меньшей части отрезка.

Согласно рассматриваемому методу, исследуемый отрезок  $[a, b]$  делится в пропорции золотого сечения в обоих направлениях, то есть выбираются две точки  $\alpha$  и  $\beta$  такие, что:

$$\frac{b-a}{b-\alpha} = \frac{b-a}{\beta-a} = \varphi,$$

где  $\varphi = 1 + \sqrt{5}/2 \approx 1,62$  – пропорция золотого сечения (рис. 1).



Рис. 1. Деление отрезка в пропорции золотого сечения

Приведем алгоритм решения оптимизационной задачи (1) с использованием предлагаемого подхода.

Рассмотрим  $(k + 1)$ -ую итерацию метода. При этом исходим из того, что отрезок локализации утечки  $[X_+^{(k)}, X_{++}^{(k)}]$  уже найден (для  $k = 0$  принимаем

$$[X_+^{(k)}, X_{++}^{(k)}] = [X_n, X_{n+1}]:$$

1. Производится деление участка  $[X_+^{(k)}, X_{++}^{(k)}]$  в пропорции золотого сечения точками

$$X_1^{(k)} = X_{++}^{(k)} - \frac{1}{\varphi} l^{(k)},$$

$$X_2^{(k)} = X_+^{(k)} + \frac{1}{\varphi} l^{(k)},$$

где  $l^{(k)} = X_{++}^{(k)} - X_+^{(k)}$  – длина отрезка  $[X_+^{(k)}, X_{++}^{(k)}]$ ;

2. Осуществляется моделирование ННРТГ для участка  $[X_n, X_{n+1}]$  при условии, что утечка находится в точке  $X_m^{(k)}$ ,  $m = 1, 2$ ;

3. На основе значений параметров газового потока, полученных в результате выполнения пункта 2, вычисляется значение целевой функции (1);

4. Производится сравнение значений  $F(X_1^{(k)})$  и  $F(X_2^{(k)})$ . Точка, которой соответствует меньшее значение целевой функции, определяет участок для дальнейшего исследования. Так, если значение  $F(X_1^{(k)})$  является минимальным, то в качестве участка, в котором будет производиться локализация утечки, выбирается участок  $[X_+^{(k)}, X_2^{(k)}]$ . Если длина участка не превышает заранее заданной точности расчета, алгоритм прекращает работу, в противном случае осуществляется возврат к п.2.

Согласно данному подходу на каждом шаге алгоритма из рассмотрения исключается меньшая часть отрезка, образованная его делением в пропорции золотого сечения одной из точек  $X_m^{(k)}$ ,  $m = 1, 2$ .

Таким образом, каждая итерация сокращает длину отрезка локализации в

$$\varphi = (1 + \sqrt{5}) / 2 \text{ раз.}$$

Указанная оценка дает возможность сделать вывод о сходимости метода золотого сечения со скоростью геометрической прогрессии, знаменатель которой равен

$$q = 2 / (1 + \sqrt{5}).$$

Предложенный алгоритм был реализован в математическом пакете Mathematica 8.0. Ряд проведенных численных экспериментов позволяет утверждать, что данный метод дает возможность идентифицировать местоположение утечки с заданной точностью и показывает высокое быстродействие.

В табл. 1 представлены результаты работы программы, осуществляющей поиск утечки (отбора) на линейном участке трубопровода длиной 56 км.

Таблиця 1

Результаты работы алгоритма определения местоположения утечки (отбора)

Точность, м	Кол-во итераций	Время работы программы, мин	Погрешность, м
100	14	0,91	7,24966
50	15	0,95	7,24966
20	17	1,06	2,44227
10	18	1,13	1,25972
5	20	1,23	0,15432
1	23	1,4	0,15432
0,1	28	1,67	0,00328

### Выводы

Произведена постановка задачи определения оценки местоположения утечки на УТ. Построена математическая модель нестационарного неизотермического режима транспорта газа по УТ с отбором, представляющая собой взаимосвязанные квазилинейные системы дифференциальных уравнений в частных производных. Выбран численный метод решения поставленной оптимизационной задачи – метод золотого сечения, произведен анализ его работы. Данный анализ показал эффективность выбранного метода с точки зрения точности получаемого решения и высокого быстродействия.

### Список литературы

1. Гусарова И.Г. Метод анализа существенно нестационарных неизотермических режимов транспорта

газа по системе магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Гусарова Ирина Григорьевна. – Х., 1991. – 189 с.

2. Сарданавили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа) / С.А. Сарданавили – М. : ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. – 577 с.

3. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В.Е. Селезнев, В.В.Алешин, Г.С. Клишин. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 488 с.

4. Тевяшев А.Д. Метод идентификации аварийного участка с учетом модели нестационарных режимов работы газотранспортной системы / А.Д. Тевяшев, И.Г. Гусарова, А.В. Каминская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 1/3 (55). – С. 38-46.

5. Liu M. Fast leak detection and location of gas pipelines based on an adaptive particle filter / M. Liu, S. Zang, D. Zhou // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. – 2005. – Vol. 15. – P. 541-550.

6. Sivathanu Y. Natural Gas Leak Detection in Pipelines [Электронный ресурс] / Y. Sivathanu // A Technology Status Report for the U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. – Режим доступа : [http://prod75-intel1.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Status\\_Assessments/scanner\\_technology\\_0104.pdf](http://prod75-intel1.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Status_Assessments/scanner_technology_0104.pdf).

7. Whaley R.S. Tutorial on Software Based Leak Detection Techniques [Электронный ресурс] / R.S. Whaley, R.E. Nicholas, J.D. Van Reet // PSIG Pipeline Simulation Interest Group. – Режим доступа : <http://h2oleak.it/getFile.php?id=19>.

Поступила в редколлегию 4.02.2015

Рецензент: канд. физ.-мат.наук, доц. В.М. Задачин, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков.

### ЕФЕКТИВНИЙ ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ВИТОКУ АБО НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ВІДБОРУ ГАЗУ

І.Г. Гусарова, О.В. Авілова

Витоки та несанкціоновані відбори газу можуть призвести до аварійних ситуацій, що заподіюють шкоду довкіллю і економічні збитки. Крім своєчасного розпізнавання факту виникнення витоку або несанкціонованого відбору газу у трубопроводній мережі, одним з найбільш актуальних завдань є розробка ефективного методу ідентифікації місця події. У роботі описується чисельний метод визначення місцезнаходження витоку, заснований на зведенні вихідної задачі до оптимізаційної задачі, і її розв'язанні з використанням математичного моделювання нестационарного неизотермического режиму транспорту газу по ділянці трубопроводу з витоком на ньому (або з несанкціонованим відбором). Метод показує високу швидкодію.

**Ключові слова:** газотранспортна система, витік газу, несанкціонований відбір, ділянка трубопроводу, задача оптимізації, моделювання, нестационарний неизотермічний режим.

### THE EFFICIENT NUMERICAL METHOD OF LOCATING GAS LEAKAGE OR UNSANCTIONED SIPHONING OF GAS

I.G. Gusarova, O.V. Avilova

Gas leaks and unsanctioned siphoning of gas can cause major incidents resulting in both economic losses and environmental damage. As knowing about the existence of a leak is not always enough to launch a corrective action, it is crucial to develop efficient method of locating the leak. The objective of this paper is to describe the numerical method of finding leakage position location, which is based on reduction of the original problem to the optimization problem and resolving it using mathematical modeling of nonstationary nonisothermal modes of gas flow in linear sections of the gas-transport system with gas leaks (or unsanctioned siphoning of gas). The method has high operation speed.

**Keywords:** gas transmission system, gas leakage, unsanctioned siphoning of gas, pipeline segment, optimization problem, modeling, nonstationary nonisothermal mode.