

УДК [519.95+518.5].622.692.4

Пропонується метод ідентифікації аварійних ситуацій, пов'язаних з виникненням витоків газу на ділянках трубопроводу, заснований на математичному моделюванні нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи

Ключові слова: витік, ділянка трубопроводу, газотранспортна система

Предлагается метод идентификации аварийных ситуаций, связанных с возникновением утечек газа на участках трубопровода, основанный на математическом моделировании нестационарных неизоотермических режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы

Ключевые слова: утечка, участок трубопровода, газотранспортная система

It is proposed a method for identifying emergency situations when gas leaks appears on the pipeline segments, based on the mathematical modeling of nonstationary nonisothermal modes of the multi-threads linear sections of the gas-transport system

Keywords: leak, part of the pipeline, gas-transport system

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ АВАРИЙНОГО УЧАСТКА С УЧЕТОМ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

А.Д. Тевяшев

Академик УНГА, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*
Контактный тел.: (057) 702-14-36

И.Г. Гусарова

Кандидат технических наук, профессор*

А.В. Каминская

Инженер I — категории*

*Кафедра прикладной математики
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Стратегически важной задачей топливно-энергетического комплекса Украины является обеспечение надежного и безопасного транспортирования природного газа по многониточным линейным участкам (МЛУ) газотранспортной системы (ГТС), имеющие большую пространственную протяженность и разветвленность. От правильного функционирования МЛУ ГТС Украины зависит не только безопасность человека и окружающей среды, но и экономическая, политическая стабильность государства. С каждым годом надежность МЛУ ГТС Украины все сильнее и сильнее зависит от правильной эксплуатации, строгого соответствия технологическому процессу и своевременно выявления дефектов и ремонта объектов ГТС Украины. Выполнение выше сказанного не только позволит существенно сократить объемы потерь природного газа из ГТС, уменьшить объемы средств на ремонтно-восстановительные работы, снизить уровень воздействия на окружающую среду, но и избежать тяжелых катастрофических последствий аварий, вызванных физическим износом трубопроводов (коррозией, старением труб) или человеческим фактором.

С целью обеспечения безопасности на объектах МЛУ ГТС необходимо своевременное и реагирование диспетчерских служб на появление аварийных

ситуаций на МЛУ ГТС, что возможно достигнуть с помощью разработки методов идентификации аварийных участков, базирующихся на применении моделей нестационарных неизоотермических режимов работы (ННРР) МЛУ ГТС, основанных на общих законах газовой динамики и описывающие с высокой степенью точности физические процессы течения природного газа, и средств статистической обработки данных, получаемых с замерных узлов расположенных на объектах МЛУ ГТС.

Задача обнаружения аварийных ситуаций, связанных с возникновением утечек на однониточных линейных участках (ОЛУ) ГТС является актуальной, поскольку появление утечки на участках трубопровода (УТ) приводит к не обоснованным потерям природного газа, а также может привести к разрыву УТ и, следовательно, нанести как экологический, так и экономический ущерб.

В настоящее время существуют различные способы определения утечек. Все их можно разделить на несколько типов: традиционные, аппаратные и программные. К традиционным методам можно отнести визуальный осмотр трубопроводов, осуществляемый патрульными службами пешком вдоль трассы газопровода со специально обученными собаками, чувствительными к запаху веществ, проникающих из почвы на поверхность земли. К аппаратным относят

визуальные и акустические устройства, видеотепловизионное обследование, устройства для взятия проб газа для выявления уровня углеводородного пара в окрестности трубопровода, детекторы волн давления и другие.

В большинстве случаев программные методы используются для выявления утечек данные, полученные со SCADA-систем. Такие методы основаны на изменении расхода или давления газа, балансе массы или объеме газа, на основе динамической модели системы, статистическом анализе изменения давления газа. По сути методы, основанные на динамической модели системы, определяют утечку в результате несоответствия расчетных величин (полученных на основе моделирования процессов течения газа) и измеренных величин (полученных SCADA системами с замерных узлов). Однако все эти методы нуждаются в привлечение больших средств инвестирования и, следовательно, отечественные методы требуют дальнейшего совершенствования и развития.

В данной работе предлагается метод идентификации аварийных ситуаций на участках трубопровода ОЛУ ГТС, основанный на математическом моделировании ННРП МЛУ ГТС с привлечением средств математической статистики для обработки результатов измерения параметров газового потока.

2. Математическая модель и постановка задач моделирования

2.1. Математическая модель ННРП МЛУ ГТС

ГТС можно рассматривать как ориентированный граф, дугами которого являются УТ и запорной арматуры (ЗА), а вершинами графа – узлы соединения УТ и ЗА. Формально модель структуры МЛУ ГТС можно задать с помощью ориентированного графа $G(V, M)$, где V – множество узлов графа, M – множество дуг графа. Узлы графа представляют собой места соединения технологических элементов между собой. Множество дуг $M = M_1 \cup M_2$, где M_1 – множество дуг графа соответствующих УТ, M_2 – множество дуг графа соответствующих кранам. Множество узлов $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$, где V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 – множество входов МЛУ ГТС, множество промежуточных узлов, множество выходов МЛУ ГТС, множество входов и выходов всех кранов из M_2 .

Математическая модель нестационарных неизо-термических режимов транспорта газа МЛУ ГТС представляет собой взаимосвязанные квазилинейные системы дифференциальных уравнений в частных производных, полученные из общих законов механики сплошной среды – законов сохранения: количества движения (1), неразрывности потока (2), энергии (3), соответствующие i -ой дуге графа ($\forall i \in M_1$), описывающего МЛУ ГТС [1,2,5,6]:

$$\frac{\partial W^i}{\partial t} + (1 - \alpha^i S^i T^i \frac{(W^i)^2}{(P^i)^2}) \frac{\partial P^i}{\partial x} + 2\alpha^i S^i T^i \frac{W^i}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} + \beta^i S^i T^i \frac{W^i |W^i|}{P^i} + \frac{g}{\alpha^i S^i T^i} \frac{P^i}{dx} \frac{dh}{dx} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial P^i}{\partial t} + \alpha^i S^i T^i \frac{\partial W^i}{\partial x} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial T^i}{\partial t} + \alpha^i \gamma^i S^i T^i \frac{W^i}{P^i} \frac{\partial T^i}{\partial x} + \alpha^i S^i (\gamma^i - 1) \frac{(T^i)^2}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} + \frac{4K}{D^i} (\gamma^i - 1) \frac{T^i}{P^i} (T^i - T_{гр}) + g(\gamma^i - 1) \frac{W^i T^i}{P^i} \frac{dh}{dx} = 0, \tag{3}$$

где $\alpha^i = \frac{z^i g R}{S^i}$, $\beta^i = \frac{\lambda^i \alpha^i}{2D^i}$, $\gamma^i = \frac{C_p}{C_p - z^i g R}$, S^i – площадь поперечного сечения трубы (m^2), C_p – удельная теплоемкость газа ($Дж/(кг \cdot K)$), z^i – коэффициент сжимаемости газа, $W^i(x, t)$, $T^i(x, t)$, $P^i(x, t)$ – удельный массовый расход ($кг/(m^2 \cdot c)$), температура (K), давление ($Па$) газа, t – временная координата, x – пространственная координата, D^i – диаметр трубы, K – коэффициент теплопередачи от трубы к грунту, $T_{гр}$ – температура грунта, h – глубина залегания трубы, g – ускорение свободного падения.

Математическая модель режима работы линейного крана представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений сохранения энергии и местных потерь давления, описывающую режимы работы МЛУ ГТС через кран, и имеет следующий вид [2,3,6,9]:

$$P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t) - \zeta^i \frac{Rg}{2(S^i)^2} \frac{T^i(x^{++}, t) z^i}{P^i(x^{++}, t)} (G^i(x^+, t))^2, j \in M_1, \tag{4}$$

$$T^i(x^{++}, t) = T^i(x^+, t) - D_i (P^i(x^+, t) - P^i(x^{++}, t)), i \in M_2, \tag{5}$$

где ζ^i – коэффициент местного гидравлического сопротивления, z^1 – коэффициент сжимаемости на выходе крана, G^i – массовый расход газа ($кг/c$) на входе крана, D_i – коэффициент Джоуля-Томсона ($K/Па$), S^j – площадь поперечного сечения j -ой ($j \in M_1$) дуги, прилегающей к концу i -ой ($i \in M_2$) дуги, соответствующей крану.

Система нелинейных алгебраических уравнений, соответствующая условиям согласования параметров газового потока в промежуточном m -м узле ($m \in V_2 \cup V_3 \cup V_4$) графа, описывающего структуру МЛУ ГТС, имеет вид:

$$\sum_{j \in V_m^+} G^j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G^i(x^+, t), m \in V_2 \tag{6}$$

$$P_{yz}^m(t) = P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t), j \in V_m^+, i \in V_m^- \tag{7}$$

$$\sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ \cdot T^j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G^i(x^+, t))^- \cdot T^i(x^+, t)) = \tag{8}$$

$$= T_{cp}^m \cdot (\sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G^i(x^+, t))^-),$$

кроме того,

если $G^j(x^{++}, t) < 0$, то $T^j(x^{++}, t) = T_{cp}^m(t)$, $j \in V_m^+$,

если $G^i(x^+,t) > 0$, то $T^i(x^+,t) = T_{cp}^m(t)$, $i \in V_m^-$,

где x^+ , x^{++} – начало и конец i -ой дуги, V_m^+, V_m^- – множество индексов дуг, входящих и выходящих из m -го ($m \in V_2 \cup V_3 \cup V_4$) узла графа, $G^i(x,t)$, $T^i(x,t)$, $P^i(x,t)$ – массовый расход, давление и температура для i -ой дуги графа, $P_{yz}^m(t)$ – давление газа в m -м узле, $T_{cp}^m(t)$ – средняя температура вытекающего из m -го узла газа.

Начальное условие определяется заданием распределения параметров газового потока (удельного расхода, давления и температуры) в начальный момент времени, т.е.

$$W_i(x,0) = W_i^0(x), P_i(x,0) = P_i^0(x), T_i(x,0) = T_i^0(x), \quad (9)$$

где $x \in [x_i^+, x_i^{++}]$, $i \in M_1$, $W_i^0(x)$, $P_i^0(x)$, $T_i^0(x)$ – известные функции.

Граничные условия могут быть заданы различными способами.

Граничное условие I типа состоит в задании давления как функции времени

$$P_{yz}^m(t) = P^m(t), \quad (10)$$

где m – номер узла, в котором задано соответствующее условие, $P_{yz}^m(t)$ – давление газа для m -го узла, $P^m(t)$ – заданная функция.

Граничное условие II типа состоит в задании расхода в любой момент времени

$$G_v^m(t) = G^m(t), \quad (11)$$

где m – номер узла, в котором задано соответствующее условие, $G_v^m(t)$ – расход газа для m -го узла, $G^m(t)$ – заданная функция.

Граничное условие III типа состоит в задании температуры в любой момент времени

$$T_{yz}^m(t) = T^m(t), \quad (12)$$

где m – номер узла, в котором задано соответствующее условие, $T_{yz}^m(t)$ – температура газа для m -го узла, $T^m(t)$ – заданная функция.

Таким образом, задача математического моделирования и анализа ННРП МЛУ ГТС сводится к решению краевых задач (1)–(3), (4)–(5) и (6)–(8), описывающей ННРП МЛУ ГТС, с начальными условиями вида (9) и различными комбинациями граничных условий вида (10)–(12).

2.2. Задача обнаружения аварийных ситуаций, связанных с возникновением утечек на однопунктном линейном участке ГТС

Рассмотрим ОЛУ ГТС. Пусть $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – координаты замерных узлов (ЗУ). В каждом замерном узле измеряется избыточное давление газа $\tilde{P}_n(t)$, массовый расход газа $\tilde{G}_n(t)$, температура газа $\tilde{T}_n(t)$, где t – момент времени (дискретный), n – номер ЗУ, $n = 1, N$.

Задача ставится об установлении факта наличия утечки и определении оценок параметров утечки. Под параметрами утечки понимаем следующие величины: время начала, местоположение, суммарный объем и время окончания.

В соответствии с этим задачу можно сформулировать следующим образом.

Необходимо построить группы критериев обнаружения утечек, основываясь на данных, полученных системой сбора данных и данных, полученных на основе решения краевой задачи, описанной в п. 2.1. При решении краевой задачи получаем результаты расчета параметров газового потока (давление $P(x,t)$, массовый расход $G(x,t)$, температуру $T(x,t)$). После обработки оперативных данных, полученных системой сбора данных, и устранения случайных и систематических ошибок измерения, получаем значения давления, массового расхода, температуры (измеренные или оценки измерений) с n -го замерного узла (ЗУ) в момент времени t .

Считаем, что случайные ошибки измерений распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, а систематическими ошибками измерений давления и температуры можно пренебречь, влияние же систематической ошибки измерений массового расхода учитываются, оно оценивается и устраняется [7].

Фильтрация оперативных данных позволяет снизить уровень случайных ошибок.

Полученные оценки позволяют построить критерий принятия решений о наличии утечек на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ [7]:

$$K = R \wedge P \wedge M,$$

где $M = M_0 \wedge M_1 \wedge \dots \wedge M_m$ – логическая переменная, полученная по методу расчета динамического баланса на последовательных интервалах $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, ..., $[t_m, t_{m+1}]$ по оценке дисбаланса на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, $P = P_0 \wedge P_1 \wedge \dots \wedge P_k$ – логическая переменная, полученная по методу знаков приращений расходов на последовательных интервалах $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, ..., $[t_k, t_{k+1}]$ на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, $R = R_0 \wedge R_1 \wedge \dots \wedge R_l$ – логическая переменная, полученная по методу знаков приращений давления на последовательных интервалах $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, ..., $[t_l, t_{l+1}]$ на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, m, k, l – параметры, численные значения которых зависят от длительности утечки и технических требований к системе определения утечек, и определяются в результате настройки системы.

Задача определения оценок параметров утечки сводится к следующему. При определении координаты точки места утечки X известно, что X разбивает i -ю ($i \in M_1$) дугу графа, на котором утечка произошла, на две дуги:

– дуга i_1 ($i_1 \in M_1$) графа, соответствующая участку трубопровода до местоположения утечки $[X_{n_1}, X]$;

– дуга i_2 ($i_2 \in M_1$) графа, соответствующая участку трубопровода 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.

Постановка оптимизационной задачи для получения оценки местоположения утечки на УТ ОЛУ ГТС между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ в момент времени t ($t \in [t_{нач}; t_{кон}]$) ставится следующим образом.

Необходимо найти местоположение утечки X на дуге графа, соответствующей УТ ОЛУ ГТС между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ в момент времени t ($t \in [t_{нач}; t_{кон}]$), позволяющее минимизировать целевую функцию вида:

$$\begin{aligned}
 F(X) = & \sum_{t_{\text{нач}} \leq t \leq t_{\text{кон}}} \left(\frac{1}{\hat{\sigma}_{Q_{0n}}} \left(\hat{Q}_{0n}(t) - \hat{Q}_{0n}(X,t) \right) \right)^2 + \\
 & + \frac{1}{\hat{\sigma}_{P_{n+1}}} \left(\hat{P}_{n+1}(t) - \hat{P}_{n+1}(X,t) \right)^2 + \\
 & + \frac{1}{\hat{\sigma}_{T_{n+1}}} \left(\hat{T}_{n+1}(t) - \hat{T}_{n+1}(X,t) \right)^2 \rightarrow \min_{X_n \leq X \leq X_{n+1}}
 \end{aligned} \quad (13)$$

при следующих ограничениях (ММ ННРР ОЛУ ГТС с утечкой на участке трубопровода $[X_n, X_{n+1}]$):

- система дифференциальных уравнений вида (1) – (3) для i -ой дуги ($i \in M_1$) при $x \in [X_n; X]$, $t \in [t_{\text{нач}}; t_{\text{кон}}]$;
- система дифференциальных уравнений вида (1) – (3) для i -ой дуги ($i \in M_1$) при $x \in [X; X_{n+1}]$, $t \in [t_{\text{нач}}; t_{\text{кон}}]$;
- условия согласования параметров газового потока в точке X :

$$P_n(X,t) = P_{n+1}(X,t), \quad T_n(X,t) = T_{n+1}(X,t),$$

$$Q_{0n}(X,t) = Q_{0n+1}(X,t) + Q(t), \quad t \in [t_{\text{нач}}; t_{\text{кон}}];$$

– начальные условия:

$$P(x, t_{\text{нач}}) = \hat{P}^{(\text{нач})}(x), \quad Q_0(x, t_{\text{нач}}) = \hat{Q}_0^{(\text{нач})}(x),$$

$$T(x, t_{\text{нач}}) = \hat{T}^{(\text{нач})}(x), \quad x \in [X_n, X_{n+1}];$$

– граничные условия:

$$P(X_n, t) = \hat{P}_n(t),$$

$$T(X_n, t) = \hat{T}_n(t),$$

$$Q_0(X_{n+1}, t) = \hat{Q}_{0n+1}(t), \quad t \in [t_{\text{нач}}; t_{\text{кон}}],$$

где $\hat{Q}_{0n}(X,t)$, $\hat{P}_{n+1}(X,t)$, $\hat{T}_{n+1}(X,t)$ – расчетные значения параметров газового потока (объемный расход, давление и температура) в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ соответственно, полученные на основе вышеизложенной ММ ННРР МЛУ ГТС с утечками, при условии, что местоположение утечки X , $Q(t)$ – величина утечки, $Q_{0n}(X,t)$, $P_n(X,t)$, $T_n(X,t)$ – значения параметров газового потока в конце УТ $[X_n; X]$, $Q_{0n+1}(X,t)$, $P_{n+1}(X,t)$, $T_{n+1}(X,t)$ – значения параметров газового потока в начале УТ $[X; X_{n+1}]$, $\hat{Q}_{0n}(X,t)$ – оценка измерений приведенного объемного расхода в n -м ЗУ, $\hat{P}_{n+1}(X,t)$, $\hat{T}_{n+1}(X,t)$ – результаты измерений давления и температуры в $(n+1)$ -м ЗУ, $\hat{\sigma}_{Q_{0n}}$, $\hat{\sigma}_{P_{n+1}}$, $\hat{\sigma}_{T_{n+1}}$ – дисперсии всех измерений параметров газового потока, X – местоположения утечки X на дуге графа, соответствующей УТ ОЛУ ГТС между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, X_n – начало i -ой дуги ($i \in M_1$), соответствующее n -му ЗУ, X_{n+1} – конец i -ой дуги ($i \in M_1$), соответствующее $(n+1)$ -му ЗУ.

Приведенный к стандартным условиям объемный расход газа $\hat{Q}_{0n}(x,t)$ в n -ом ЗУ в момент времени t ($t \in [t_{\text{нач}}; t_{\text{кон}}]$), определяется следующим образом:

$$\hat{Q}_0(x,t) = \frac{\hat{G}(x,t)}{\rho_0},$$

где $\hat{G}(x,t)$ – массовый расход, $\rho_0 = \rho_0(x,t)$ – приведенная (к стандартным условиям) плотность газа.

Решение оптимизационной задачи (13) с ограничениями сводится к решению задач моделирования ННРР МЛУ ГТС и выбора из полученных решений оптимального, что дает однозначное значение местоположения утечки на УТ ОЛУ ГТС.

В момент возникновения утечки волны возмущения давления и расхода распространяются в обе стороны со скоростью звука в газе. Время прихода этих волн в n -й и $(n+1)$ -й ЗУ определяется следующим образом.

Оценивается степень связи стационарности изменений физических параметров в некоторой точке УТ ОЛУ ГТС по изменению массового расхода. Поскольку любое существенное изменение давления или температуры на входах или выходах ОЛУ ГТС приводит к существенному изменению массового расхода.

Для проверки квазистационарности режима работы ОЛУ ГТС на интервале времени $[t_1, t_2]$ используется метод отношения правдоподобия, предназначенный для выявления скачка в поведении процесса:

$$\max_{1 \leq r \leq K} S_n^{(r,K)}(\hat{G}_n^0, \hat{v}_n(r)) < \beta_n, \quad (14)$$

где

$$S_n^{(r,K)}(\hat{G}_n^0, v_n) = v_n \cdot \sum_{k=r}^K (\tilde{G}_n(t_k) - \hat{G}_n^0 - \frac{v_n}{2});$$

$$\hat{v}_n(r) = \frac{1}{K-r+1} \cdot \sum_{k=r}^K (\tilde{G}_n(t_k) - \hat{G}_n^0);$$

$\tilde{G}_n(t_k)$ – результат измерения массового расхода в n -м ЗУ в момент времени t_k ; \hat{G}_n^0 – оценка среднего значения процесса до начального момента времени t_1 ; β_n – некоторое пороговое значение критерия, численное значение которого получается в результате настройки системы обнаружения утечки.

Численное значение параметра r , при котором выражение (14) достигает максимума, соответствует моменту времени t_n прихода фронта волны возмущения на n -й ЗУ.

Фиксируя моменты времени прихода фронта волны в n -й и $(n+1)$ -й ЗУ, можно получить грубую оценку времени начала $t_{\text{нач}}$ утечки:

$$t_{\text{нач}} = \frac{1}{2} \cdot \left(t_n + t_{n+1} - \frac{L_{n,n+1}}{c} \right),$$

где c – скорость распространения звука в газе (устанавливается экспериментально), t_n – время прихода волны в n -й ЗУ, t_{n+1} – время прихода волны в $(n+1)$ -й ЗУ, $L_{n,n+1}$ – длина УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ.

Функция интенсивности утечки $Q(t)$ в момент времени t может быть оценена следующим образом:

$$\hat{Q}(t) = \hat{Q}_n(t + \Delta t_n) - \hat{Q}_{n+1}(t + \Delta t_{n+1}), \quad t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}],$$

где $t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$ – время начала и окончания утечки на УТ, $\hat{Q}_n(t)$, $\hat{Q}_{n+1}(t)$ – косвенные измерения (оценки) приведенного объемного расхода в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, полученные на основе результатов прямых измерений, $\Delta t_n = t_n - t_{\text{нач}}$, $\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_{\text{нач}}$.

3. Методы решения

3.1. Метод расчета ННРП МЛУ ГТС

При расчете ННРП МЛУ ГТС для каждой конкретной задачи исходный граф МЛУ ГТС преобразуем в моделируемый граф и в соответствии с предлагаемым методом строим расчетный граф. В работе метод расчета ННРП МЛУ ГТС основан на применении конечно-разностного метода. Система одномерных дифференциальных уравнений в частных производных математической модели (ММ), описывающей ННРП по УТ, аппроксимируется неявной конечно-разностной схемой, определенной на четырехточечном или пятиточечном шаблоне. Наиболее полная информация по данным схемам представлена в [1]. Здесь приведен пятиточечный шаблон рис. 1.

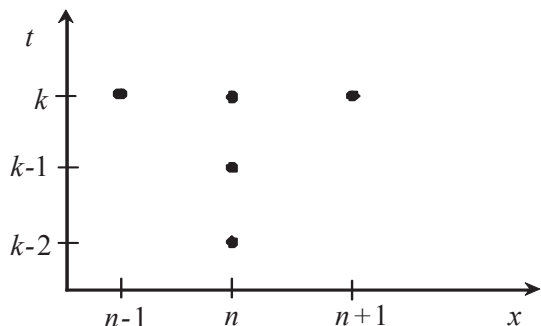


Рис. 1. Пятиточечный шаблон

В соответствии с приведенным шаблоном (рассматривается равномерная пространственно-временная сетка), система дифференциальных уравнений (1)–(3) аппроксимируется следующими соотношениями:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}_n^k = \frac{3\varphi_n^k - 4\varphi_n^{k-1} + \varphi_n^{k-2}}{2\Delta t}, n = \overline{0, N},$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x}_n^k = \begin{cases} \frac{\varphi_1^k - \varphi_0^k}{\Delta x}, n = 0, \\ \frac{\varphi_{n+1}^k - \varphi_{n-1}^k}{2\Delta x}, n = \overline{1, N-1}, \\ \frac{\varphi_N^k - \varphi_{N-1}^k}{\Delta x}, n = N. \end{cases}$$

где $\varphi^i = (W^i(x, t), P^i(x, t), T^i(x, t))$.

В результате аппроксимации получается система нелинейных алгебраических уравнений, которая содержит $3(N+1)$ уравнение и $3(N+1)$ переменных. Данная система линейризуется методом Ньютона. Система дополняется разностными аналогами уравнений модели крана и условий согласования.

Поскольку структура модели крана представлена в виде двухполюсника, имеющего один вход и один выход, то кран рассматриваем как множество V_4 , являющееся множеством всех входов f-го крана, и множество V_5 , являющееся множеством всех выходов f-го крана, а длиной дуги (из множества M_2) пренебрегаем. При этом условия согласования в m-м узле ($m \in V_4$), являющимся входом f-го крана, ($f \in M_2$) имеют следующий вид:

$$P^j(x^{++}, t) = P_H^f(t), W^j(x^{++}, t)S^j = G_{кр}^f(t),$$

$$T^j(x^{++}, t) = T_H^f(t), \tag{15}$$

где x^{++} – конечная координата соответствующего j-го участка, прилегающего к входу f-го крана, S^j – площадь поперечного сечения трубы этого участка, $W^j(x, t), P^j(x, t), T^j(x, t)$ – удельный массовый расход, давление и температура газа j-го участка, $G_{кр}^f(t)$ – массовый расход газа через f-й кран.

Условия согласования в m-м узле, ($m \in V_5$), являющимся выходом f-го крана, ($f \in M_2$) имеют следующий вид:

$$P^i(x^+, t) = P_K^f(t), W^i(x^+, t)S^i = G_{кр}^f(t),$$

$$T^i(x^+, t) = T_K^f(t), \tag{16}$$

где x^+ – начальная координата i-го участка, прилегающего к выходу f-го крана, S^i – площадь поперечного сечения трубы i-го участка, $W^i(x, t), P^i(x, t), T^i(x, t)$ – удельный массовый расход, давление и температура газа i-го участка.

С учетом условий согласования (15),(16) после применения метода Ньютона на k – ом временном слое на r – ой итерации для уравнения модели режима работы f-го крана записываются соответствующие им невязки следующим образом (индекс крана f для удобства опущен) [9]:

$$\Psi_{0,2_{кр}}^{k,r,j} = P_{N_j}^{k,r,j} - P_0^{k,r,i} - \zeta \frac{Rg}{2(P_0^{k,r,j})^2} \frac{T_0^{k,r,i} Z_0^{k,r,i}}{P_0^{k,r,i}} (G_{N_j}^{k,r,j})^2,$$

$$\Psi_{0,3_{кр}}^{k,r,j} = T_{N_j}^{k,r,j} - T_0^{k,r,i} - D_j(P_{N_j}^{k,r,j} - P_0^{k,r,i}),$$

Условия согласования (6)–(8) в соответствии с разработанным методом линейрируются, получаем соответственно:

$$\sum_{j \in V_m^+} S_j \delta W_{N_j}^{k,s,j} = \sum_{i \in V_m^-} S_i \delta W_i^{k,s,i}, m \in V_2 \tag{17}$$

$$\delta P_{N_j}^{k,s,j} = \delta P_i^{k,s,i}, j \in V_m^+, i \in V_m^-. \tag{18}$$

Полученная линейная алгебраическая система является переопределенной. В работах [1,2,5,6,9] подробно излагалась суть метода, который сводит переопределенную систему линейных алгебраических уравнений к определенной за счет линейризованных условий согласования (17)–(18). В итоге преобразованная система линейных алгебраических уравнений решается относительно векторов поправок к неизвестным методом Гаусса с выбором главного элемента.

На каждом шаге итерационного процесса после нахождения параметров газового потока на каждом временном слое в соответствии с формулой (8) вычисляем среднюю температуру газа в узлах МЛУ ГТС.

3.2. Методы идентификации аварийного участка

Для получения достоверных оперативных данных, полученных с ЗУ SCADA-системами, производится предварительная статистическая обработка результатов измерений. Она позволяет оценить систематические и случайные погрешности измерений. Проводит-

ся проверка данных на достоверность, оцениваются и отбрасываются результаты, содержащие пропуски в данных, выполняется фильтрация данных с целью уменьшения случайной ошибки, и оцениваются систематические ошибки результатов измерений. Сбор и обработка данных производится с целью значительного уменьшения случайной составляющей результата измерений. Для устранения систематических ошибок выполняется калибровка измерительных датчиков и применяются математические методы оценивая систематических ошибок. Первичная обработка измерений наиболее полно описана в различных источниках [4, 7,8].

Метод расчета задачи обнаружения аварийных ситуаций, связанных с возникновением утечек на ОЛУ ГТС. В случае утечек на ОЛУ ГТС, не связанных с полным разрывом УТ, обнаружить утечку становится крайне сложной задачей. Такие утечки могут протекать от нескольких дней до нескольких месяцев, что приводит к потерям природного газа на ОЛУ ГТС и, следовательно, к ущербу экономическому и экологическому.

Рассматривается несколько методов обнаружения аварийных УТ.

Следующие методы относятся к методам идентификации аварийных участков ОЛУ ГТС (наиболее полное описание методов представлено [7,8]).

а) Метод расчета динамического баланса. Уравнение динамического баланса на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ для заданного интервала времени $[t_1, t_2]$ имеет вид [7,8]:

$$M_n^{(3Y)}(t_1, t_2) - M_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) + M_{n,n+1}^{(TP)}(t_1) - M_{n,n+1}^{(TP)}(t_2) - M_{n,n+1}^{(YT)}(t_1, t_2) = 0$$

где $M_n^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $M_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2)$ – массы природного газа, прошедшего соответственно через n -й и $(n+1)$ -й ЗУ за интервал времени $[t_1, t_2]$; $M_{n,n+1}^{(TP)}(t_1)$, $M_{n,n+1}^{(TP)}(t_2)$ – массы природного газа, аккумулированного внутри трубопровода между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ соответственно в моменты времени t_1 и t_2 ; $M_{n,n+1}^{(YT)}(t_1, t_2)$ – масса потерь природного газа на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ за интервал времени $[t_1, t_2]$.

Масса газа, прошедшего через вход или через выход 1-го УТ за интервал времени $[t_1, t_2]$, определяется по формуле:

$$M_l^{(3Y)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} G_l(t) dt, \quad l = n, n+1.$$

Массу газа, аккумулированного на l -м УТ в момент времени t_i ($i=1, 2$), определяется по следующей формуле [3]:

$$M_{n,n+1}^{(TP)}(t_i) = \frac{\Delta \cdot S}{R_b} \int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{P(x, t_i)}{z(x, t_i) T(x, t_i)} dx,$$

где S – площадь поперечного сечения УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, R_b – универсальная газовая постоянная воздуха ($R_b = 287 \text{ нм} / (\text{кг} \cdot \text{К})$), Δ – относительная плотность газа по воздуху, $P(x, t)$, $T(x, t)$, $z(x, t)$ – давление, температура, коэффициент сжимаемости газа на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ соответственно.

Результаты измерений параметров газового потока с ЗУ, позволяют рассчитать численные оценки масс $\hat{M}_n^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $\hat{M}_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $\hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_1)$, $\hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_2)$, а также средне квадратичное отклонение (СКО) данных оценок – $\hat{\sigma}_{M_n^{(3Y)}}(t_1, t_2)$, $\hat{\sigma}_{M_{n+1}^{(3Y)}}(t_1, t_2)$, $\hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}(t_1)$, $\hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}(t_2)$ соответственно.

Оценка дисбаланса и СКО данной оценки рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{M}_{n,n+1}(t_1, t_2) &= \hat{M}_n^{(3Y)}(t_1, t_2) - \hat{M}_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) + \hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_1) - \hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_2), \\ \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}}^2(t_1, t_2) &= \hat{\sigma}_{M_n^{(3Y)}}^2(t_1, t_2) + \hat{\sigma}_{M_{n+1}^{(3Y)}}^2(t_1, t_2) + \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}^2(t_1) + \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}^2(t_2). \end{aligned}$$

Оценка дисбаланса определяется как:

$$\hat{M}_{n,n+1}(t_1, t_2) = M_{n,n+1}^{(YT)}(t_1, t_2) + \Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) + \xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2),$$

где $\Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ – систематическая ошибка дисбаланса, обусловленная систематической ошибкой результатов измерений массового расхода и выражается формулой

$$\Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) = (t_2 - t_1) \cdot (\Delta_{W_n} - \Delta_{W_{n+1}}); \quad (19)$$

$\xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ – случайная ошибка величины дисбаланса, обусловленная суммарным влиянием случайных ошибок результатов измерений физических параметров газового потока в ЗУ, где $\xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) \sim N(0, \sigma_{M_{n,n+1}^{(YT)}}^2(t_1, t_2))$.

Оценку систематической ошибки дисбаланса $\hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ можно рассчитать по формуле (19) при известных оценках систематических ошибок измерений массового расхода $\hat{\Delta}_{W_n}$ и $\hat{\Delta}_{W_{n+1}}$. Или в случае, когда систематические ошибки измерений массового расхода неизвестны, то в качестве оценки систематической ошибки дисбаланса $\hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ можно выбрать среднее значение дисбаланса в серии экспериментов по расчету баланса на последовательных интервалах времени при отсутствии утечек.

Критерий отсутствия утечек на УТ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ на интервале времени $[t_1, t_2]$ имеет вид:

$$M_1 = \left| \hat{M}_{n,n+1}(t_1, t_2) - \hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) \right| \leq k \cdot \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}}(t_1, t_2), \quad (20)$$

где $k > 0$ – пороговое значение критерия, которое определяется в результате настройки системы обнаружения утечек.

Если условие (20) выполняется, то булевская переменная $M_1 = 0$, а если не выполняется, то $M_1 = 1$, то есть на интервале времени $[t_1, t_2]$ появилась утечка.

Если утечка происходила в течение последовательности интервалов времени $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, ..., $[t_n, t_{n+1}]$, то значение логической переменной $M = M_1 \wedge M_2 \wedge \dots \wedge M_n$ будет равно единице, где M_1, M_2, \dots, M_n вычисляются по критерию (20).

Численное значение n зависит от технических требований к системе обнаружения утечек и определяется в результате настройки системы.

Оценка массы потерь природного газа в результате утечки на интервале времени $[t_1, t_2]$ оценивается по формуле:

$$\widehat{M}_{n,n+1}^{(yt)}(t_1, t_2) = \widehat{M}_{n,n+1}(t_1, t_2) - \widehat{\Delta M}_{n,n+1}^{(yt)}(t_1, t_2).$$

б) Метод знаков приращений расходов. Является прямым методом обнаружения утечек. Суть метода заключается в следующем. Если на интервале времени $[t_1, t_2]$ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ происходит утечка с расходом $Q_0^{(yt)}(t)$, то количество природного газа, прошедшего через n -й ЗУ увеличивается, а через $(n+1)$ -й ЗУ – уменьшается. При этом объем потерь газа равен

$$V_0^{(yt)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} Q_0^{(yt)}(t) dt,$$

а количества ЦП, прошедшего через n -й и $(n+1)$ -й ЗУ за интервал $[t_1, t_2]$, могут быть оценены по формуле

$$\widehat{V}_{0l}^{(3y)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \widehat{Q}_{0l}(t) dt, \quad l = n, n+1,$$

где $\widehat{Q}_{0l}(t)$ – оценка приведенного объемного расхода в l -м ЗУ в момент времени t , полученная на основе прямых измерений параметров газового потока в соответствующем ЗУ.

В квазистационарном режиме с утечкой имеем

$$\widehat{V}_{0n}^{(3y)}(t_1, t_2) - \widehat{V}_{0n+1}^{(3y)}(t_1, t_2) \approx V_0^{(yt)}(t_1, t_2).$$

В нестационарных режимах, вызванных возникновением, изменением интенсивности или окончанием утечки, имеет место следующее неравенство:

$$0 < \widehat{V}_{0n}^{(3y)}(t_1, t_2) - \widehat{V}_{0n+1}^{(3y)}(t_1, t_2) < V_0^{(yt)}(t_1, t_2).$$

На основании этого неравенства построена индикаторная функция наличия утечки, достаточно устойчивая к уровню помех и характеру режима работы МЛУ ГТС:

$$P_1 = \text{sgn}[\widehat{V}_{0n}^{(3y)}(t_1, t_2) - \widehat{V}_{0n+1}^{(3y)}(t_1, t_2)], \tag{21}$$

где функция $\text{sgn}(x)$ имеет вид:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0, \\ 0, & \text{если } x \leq 0. \end{cases}$$

Логическая переменная P_1 принимает значение 1 при наличии утечки, а при ее отсутствии $P_1 = 0$.

Если утечка длилась в течение последовательности интервалов времени $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_k, t_{k+1}]$, то значение логической переменной $P = P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_k$ будет равно единице, где P_1, P_2, \dots, P_k вычисляются в соответствии с (21).

Численные значения k и длительности интервалов $[t_k, t_{k+1}]$ зависят от технических требований к системе обнаружения утечек и определяются в результате настройки системы.

в) Метод знаков приращений давлений. Является косвенным методом обнаружения

утечек и основан на сравнении результатов расчета параметров газовых потоков на основе ММ ННРР МЛУ ГТС с результатами измерений этих параметров.

Пусть в момент времени t имеем результаты измерений $\widehat{P}_n(t), \widehat{W}_n(t), \widehat{T}_n(t)$ с n -го ЗУ и результаты измерений $\widehat{P}_{n+1}(t), \widehat{W}_{n+1}(t), \widehat{T}_{n+1}(t)$ с $(n+1)$ -го ЗУ.

Проводим расчет ММ ННРР МЛУ ГТС (по методу, рассмотренному в пункте 3.1) для получения оценок параметров газового потока

$$\widehat{P}(x, t), \widehat{Q}_0(x, t), \widehat{T}(x, t), \quad x \in [X_n, X_{n+1}].$$

В качестве начальных условий выберем результаты расчета ММ ННРР МЛУ ГТС в момент времени $t-1$: $\widehat{P}(x, t-1), \widehat{Q}_0(x, t-1), \widehat{T}(x, t-1)$, $x \in [X_n, X_{n+1}]$, а в качестве граничных условий измерения параметров в момент времени t : $\widehat{P}_n(t), \widehat{Q}_{0n+1}(t), \widehat{T}_n(t)$, где приведенный объемный расход газа на $(n+1)$ -м ЗУ вычисляется как $\widehat{Q}_{0n+1}(t) = \frac{\widehat{G}_{n+1}(t)}{\widehat{\rho}_{0n+1}(t)}$.

Вычисляем значение индикаторных функций

$$D_0 = \text{sgn}(\widehat{P}(x_{n+1}, t) - \widehat{P}_{n+1}^t), \tag{22}$$

$$Q_0 = \text{sgn}(\widehat{Q}_{0n}^t - \widehat{Q}_0(x_n, t)). \tag{23}$$

Индикатором наличия утечки является значение булевой переменной $R_0 = D_0 \wedge Q_0 = 1$. То есть, если на интервале времени $[t_1, t_2]$ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ происходит утечка, то, начиная с некоторого момента времени $t_0 \in [t_1, t_2]$, аргументы функций (22), (23) будут положительными и логически переменные D_0 и Q_0 принимают значения, равные 1.

Если утечка происходила в последовательные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_l$, то и значение булевой переменной $R = R_0 \wedge R_1 \wedge R_2 \wedge \dots \wedge R_l$ будет также равно единице.

4. Пример

Разработанное программное обеспечение, основанное на обработке статистических данных, получаемых с датчиков, обеспечивает надежное средство идентификации аварийных участков трубопровода. Проводится непрерывный процесс сбора, обработки и анализа информации и генерируется сигнал об утечке газа, при ее возникновении.

Методы математической статистики позволяют проверить предположения о наличии или отсутствии утечек природного газа из УТ ОЛУ ГТС.

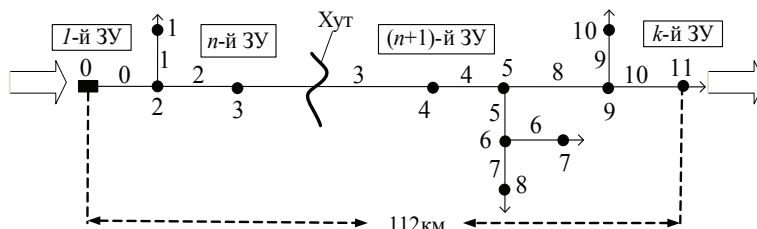


Рис. 2. Структура ОЛУ ГТС

На основании рассмотренных в работе методов обнаружения утечек разработана система обнаружения утечек. Рассмотренные методы идентификации аварийных участков, подтвердили свою работоспособность на различных тестовых примерах.

В качестве тестового примера рассматривался УТ ОЛУ ГТС между соседними n-м и (n+1)-м ЗУ, расстоя-

ние между которыми составило 112км. газа $P(t)=8,4\text{МПа}$, $T(t)=40^{\circ}\text{C}$ и на выходе – расход $q(t)=102,266\text{ млн.м}^3\text{ в сут.}$, $t \geq 0\text{ мин.}$

Для идентификации аварийного участка были применены методы, рассмотренные в данной работе. Графики изменения давления, расхода и температуры в соседних n-м и (n+1)-м ЗУ при утечке представлены на рис. 3.

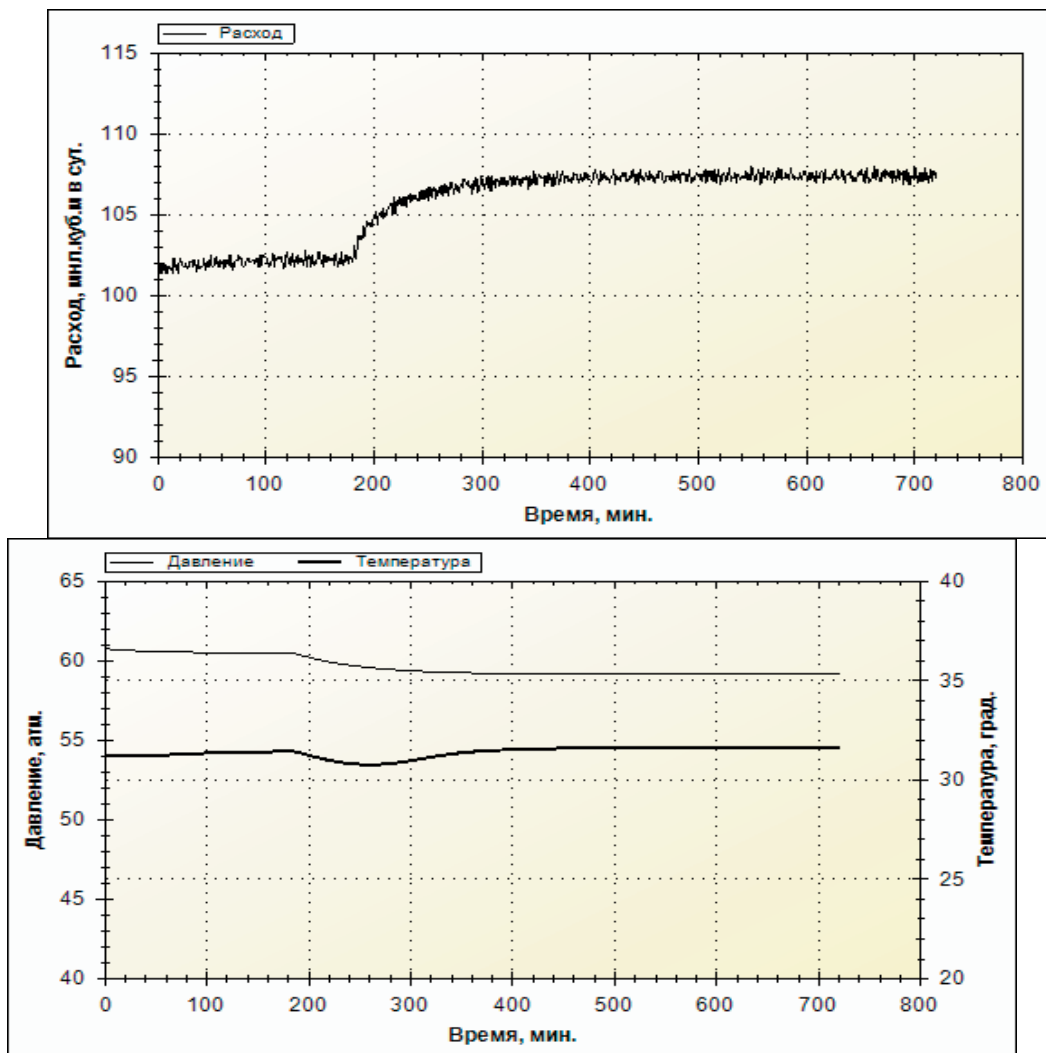


Рис. 3. Графики изменения давления, расхода и температуры в соседних n-м и (n+1)-м ЗУ соответственно при утечке

ние между которыми составило 112км.

Для расчета ННRP ОЛУ ГТС в качестве начального условия принимаем стационарное течение газа с давлением $P=84.636\text{ атм.}$, температурой $T=40^{\circ}\text{C}$ и суммарным расходом природного газа равным $102,266\text{ млн.м}^3/\text{сут.}$ на входе в ОЛУ ГТС. Внутренний диаметр трубы – 1400 мм, толщина стенок $h=10\text{ мм}$, шероховатость труб – 0,03 мм, удельная теплоемкость газа $C_p = 0.655952\text{ ккал}/(\text{кг.}^{\circ}\text{C})$, относительная плотность газа по воздуху $\Delta = 0,604707$, температура грунта на глубине заложения газопровода $t_{гр} = 10^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплопередачи от газа к грунту $K = 1,4\text{ ккал}/(\text{м}^2.\text{ч.}^{\circ}\text{C})$. В качестве граничных условий на входе в ОЛУ ГТС задавались давление и температура

Утечка произошла на 46,7 км от начала участка. Интенсивность утечки была постоянна и составляла $5,1133\text{ млн.м}^3\text{ в сут.}$ (5% от общего расхода).

Местоположение утечки определялось в результате решения оптимизационной задачи (13) с ограничениями. Фактическая погрешность оценки места утечки составила 0,2км.

5. Выводы

Научная новизна – впервые предложен метод идентификации аварийных ситуаций и получения оценок параметров утечек природного газа, отличающийся от известных методов использованием разработанно-

го метода расчета нестационарных неизотермических режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы, и, позволяющий своевременно обнаружить аварийный участок трубопровода и тем самым снизить возможный ущерб от аварий, а также прогнозировать безопасные режимы работы многониточных линейных участков газотранспортной системы.

В работе реализован метод обнаружения утечек на основе совместного расчета ННРР МЛУ ГТС и методов статистической оценки параметров газового потока (методы расчета статистического, динамического баланса, методов знаков приращения расходов и давления).

Проведенные экспериментальные исследования по определению параметров величины и местопо-

ложения утечки на участке ОЛУ ГТС позволяют определить утечку в размере 1% - 2% от пропускной способности ОЛУ ГТС, погрешность определения местоположения утечки составляет до 200 м.

Практическая значимость – предложенные в работе методы идентификации аварийных участков ОЛУ ГТС позволяют обеспечить непрерывный мониторинг и своевременное выявление величины и объема утечки на ОЛУ ГТС.

Обнаружение аварийных ситуаций позволяет существенно сократить время на локализацию аварийного УТ, уменьшить затраты на ремонтно-восстановительные работы, уменьшить негативное влияние на окружающую среду и способствует более долговечному функционированию ГТС.

Литература

1. Тевяшев, А.Д. Математическая модель и метод расчета нестационарных режимов в линейных участках магистральных газопроводах [Текст] / А.Д. Тевяшев, И.Г. Гусарова, А.В. Каминская // Научно-технический журнал «Радиоэлектроника и информатика». – 2007. – №2(37). – С. 144-150.
2. Боярская, Ю.В. Учет моделей технологического оборудования при расчете неустановившихся режимов транспорта газа в многониточном магистральном газопроводе [Текст] / Ю.В. Боярская, И.Г. Гусарова, А.Д. Тевяшев, А.В. Каминская // Вестник Харьковского национального университета. Серия «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». Выпуск 11. Сборник научных трудов. – Харьков, 2009. – № 847. – С.25-39.
3. Сарданашвили, С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа) [Текст] / С.А. Сарданашвили. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. – 577 с.
4. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб, пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 10-е изд., стер. – М: Высш. шк., 2004. – 479с.
5. Тевяшев, А.Д. Эффективный метод и алгоритм расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа в газотранспортной сети произвольной структуры [Текст] / А.Д. Тевяшев, И.Г. Гусарова, А.В. Чуркина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – 2/3 (20). – С. 45-52.
6. Каминская, А.В. Численный анализ нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы при различных режимах работы запорной арматуры [Текст] / А.В. Каминская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 6/3 (42). – С. 21-25.
7. Тевяшев А.Д., Интеллектуальная система обнаружения криминальных отборов из продуктопроводов [Текст] / А.Д. Тевяшев, К.В. Кобылинский // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2006. – №1(64). – С. 6-18.
8. Стандарт організації України СОУ 11.2-30019775-095:2006. Магістральні конденсатопроводи. Визначення систематичних похибок вимірювання масової витрати та густини стабільного конденсату. Метод. [Текст] / Тевяшев А.Д., Киба О.І., Кобилінський К.В., Котелевцев О.В., Лук'янчик В.І., Михайлів В.Й., Пристай О.Л., Сандул С.В., Синюк Б.Б., Струпов А.М. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 40с.
9. Тевяшев, А.Д. Учет динамики работы запорной арматуры при моделировании нестационарных режимов транспорта газа в магистральных газопроводах [Текст] / А.Д. Тевяшев, И.Г. Гусарова, А.В. Каминская // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2009. – № 147. – С. 104-113.