

Алгоритм обнаружения и локализации утечек газа

Роберт Н. Хачатрян

Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА
e-mail robert@inter-as.co

Аннотация

Приведено краткое описание систем мониторинга и диспетчерского управления SCADA. Приведены некоторые основные формулы гидравлического расчета газопровода. Рассмотрен существующий аналитический метод обнаружений утечек и предложена его модификация для локализации утечек. А так же описана программа реализующая этот метод.

1. Введение

Рассматривается задача моделирования и мониторинга системы газоснабжения и актуальный для этой области вопрос качественного обнаружения и локализации утечек газа. Даже небольшие утечки могут причинить существенные экономические и экологические проблемы. Под утечкой понимается не только физическое повреждение трубы, но и возможное хищение газа. Выявление утечек без помощи информационных технологий осуществляется простой проходкой всего газопровода, что требует много рабочих ресурсов и времени. Развитие и внедрение информационных технологий в области газоснабжения дало возможность нового подхода к вопросу обнаружения утечек. Для надежного эксплуатации газотранспортной сети широко используются системы SCADA предназначенные для диспетчерского управления. Эти системы включают в себя измерительное оборудование установленное на контрольных точках трубопровода. Эти датчики непрерывно измеряют давление, температуру газа и другие параметры в установленных точках и передают в диспетчерскую. Современные методы обнаружения утечек делятся на два класса: инструментальный и аналитический. Наиболее точным является инструментальный способ. Но так как этот способ подразумевает наличие специальной аппаратуры, установленной вдоль всего трубопровода в дополнение к датчикам системы SCADA, то он является к тому же и наиболее дорогостоящим. Более доступным является аналитический метод, который прогнозирует возможные ситуации.. Его принцип работы основан на аналитических вычислениях по специальным формулам, используя фактические данные, замерянные непосредственно на участках трубопровода. Вышеупомянутый аналитический метод в качестве фактических данных может употреблять данные, полученные системой SCADA, в чем и заключается доступность этого метода. Необходимыми данными для вычислений являются давление газа, температура газа и количество газа, проходящего по трубе.

¹ The research is supported partly by INTAS: 04-77-7173 project, <http://www.intas.be> and State Principal Program of Armenia on Scientific Computations.

2. Системы SCADA

Под диспетчерским управлением и сбором данных SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) подразумевается сбор данных непосредственно с объекта наблюдения, передача этих данных по каналам связи в центральный пункт, где и производится обработка данных и принятие решений. Системы SCADA являются основным инструментом для автоматизированного управления сложными динамическими системами (процессами) в важных и критичных с точки зрения безопасности и надежности областях. Все современные SCADA-системы включают три основных структурных компонента (см. рис. 1):

Remote Terminal Unit (RTU) удаленный терминал, осуществляющий наблюдение (управление) над объектом в режиме реального времени. Спектр его реализаций широк от примитивных датчиков, осуществляющих съем информации с объекта, до специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управление в режиме реального времени. Конкретная его реализация определяется конкретным применением.

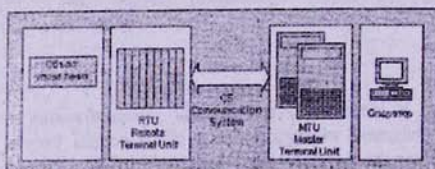


Рис. 1. Основные структурные компоненты SCADA-системы

Master Terminal Unit (MTU), Master Station (MS) диспетчерский пункт управления (главный терминал); осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого (квази-) реального времени; одна из основных функций обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой (HMI, MMI). В зависимости от конкретной системы MTU может быть реализован в самом разнообразном виде от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи до больших вычислительных систем (мэйнфреймов) и/или объединенных в локальную сеть рабочих станций и серверов.

Communication System (CS) коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на центральный интерфейс оператора-диспетчера и передачи сигналов управления на RTU.

3. Гидравлический Расчет газопроводов

При эксплуатации магистральных газопроводов контролю подлежат следующие основные показатели:

- Давление газа в начале и конце участка газопровода;
- Температура газа на входе и выходе участка газопровода;
- Количество газа на входе и выходе участка газопровода.

Для определения засоренности, места разрывов и, в частности, утечку газа, необходимо знать режим эксплуатации газопровода.

В основе всех гидравлических расчетов лежит теоретическая формула расхода газа для установившегося изотермического режима течения [1]:

$$Q = C \cdot \frac{T_b}{P_b} \cdot \left(\frac{1}{f} \right)^{0.5} \cdot \left[\frac{(P_{in}^2 - P_{out}^2)}{G \cdot T_{avg} \cdot Z \cdot L} \right]^{0.5} \cdot D^{2.5} \quad (1)$$

Где:

Q - Расход газа-м³/день

C - Коэффициент единиц измерения (при указанных единицах измерений) = $574,7 \cdot 10^3$

T_b - Стандартная температура газа-°К (Кельвин)

P_b - Стандартное давление газа-кПа (килоПаскаль)

P_{in} - Входное давление-кПа

P_{out} - Выходное давление-кПа

G - Относительная плотность газа (плотность газа относительно воздуха)

T_{avg} - Средняя температура газа-°К

Z - Фактор сжимаемости

L - Длина трубы-м (метр)

D - Внутренний диаметр трубы-м

Существуют 2 широко используемых фактора трения:

1. f_f - фактор трения Фенинга

2. f_d - Фактор трения Дарси-Вайсбаха

Где $f_f = f_d/4$

Для полностью турбулентных областей фактор трения является постоянной, зависящей только от шероховатости трубы, и выражается следующим образом [1]:

$$\left(\frac{1}{f} \right)^{0.5} = 4 \cdot \log \left(3,7 \cdot \frac{D}{k} \right) \quad (2)$$

где k — коэффициент шероховатости внешней поверхности трубопровода

Основная формула устойчивого потока предполагает следующее:

- Оценка течения не зависит от времени
- Перемены температуры незначительны
- Нет перемен высоты относительно уровня моря
- Переход давления в скорость не вызывает значительных перемен кинетической энергии.
- Сжимаемость газа на протяжении всей трубы не меняется.

4. Метод баланса массы или объема.

Этот метод обнаружения утечек является аналитическим и основан на измерении массы или объема транспортируемого вещества в двух концах участка трубопровода.

Метод баланса масс базируется на принципе сохранения массы. Для трубопровода входной поток и исходящий поток трубы всегда могут быть измерены. Масса жидкости может быть оценена исходя из размеров трубы и измерений переменных характеристик потока, скорости, расхода, давления и температуры. Когда масса жидкости, исходящая из секции трубы менее чем оцененная масса, утечка определена. Это - самый широко распространенный используемый в настоящее время метод. Эта техника требует высокой точности инструментов измеряющих поток, переменные давления и температуры.

Ограничения метода:

- Метод Баланса Масс реагирует на утечку только после того, как волны давления, соответствующие утечке, достигнут обоих концов трубопровода и будут измерены. В зависимости от размера утечки это может занять длительное время.
- Это зависит от точности измерительной аппаратуры трубопровода на обоих концах трубы.

5. Алгоритм обнаружения утечек реализованный в системе SCADA и его модификация

На рисунке 2 представлен отрезок трубы на начале и конце которого нам известны расход газа, температура и давление. Алгоритм определяет величину утечки используя замеренные данные, такие как входная и выходная температура, входное и выходное давление и расход газа.

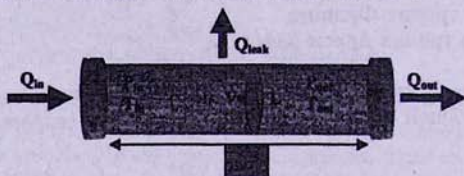


Рис. 2

Где

- Q — поток [m^3/h]
 P — давление [bar]
 T — температура [K]
 V — объем [m^3]

Для вычислений в алгоритме используется следующая формула:

$$Q'_{leak} = Q'_{in} - Q'_{out} + \frac{V}{\Delta t} \cdot \frac{T_s}{P_s} \cdot \left[\frac{P'_{in} + P'_{out}}{T'_{in} + T'_{out}} - \frac{P'^{t-\Delta t}_{in} + P'^{t-\Delta t}_{out}}{T'^{t-\Delta t}_{in} + T'^{t-\Delta t}_{out}} \right] \quad (3)$$

Где

- Δt — цикл времени
 $T_s = [273.15 \text{ K}]$
 $P_s = [1.01325 \text{ bar}]$

Для получения количества утечки в интервале времени t используются входные и выходные значения расхода газа в интервале t , входные и выходные значения давлений в интервале времени t и $t - \Delta t$, а также те же значения температур.



Рассмотренный выше алгоритм определяет приближенно величину утечки газа на участке газопровода, так как не учитывает сжимаемость газа. Таким образом, алгоритм удовлетворительно работает только для газопроводов, находящихся под низким давлением, что не характерно для магистральных газопроводов газотранспортной системы Р.А., давление газа в которых иногда достигается 20 – 25 атм. В этих условиях, величина утечки, определяемая алгоритмом приводит к значительному расхождению с действительной величиной утечки. Вследствие влияния фактора сжимаемости газа, относительная погрешность определения величины утечки этим алгоритмом может достичь 30 – 35%.

Учитывая фактор сжимаемости природного газа, уравнение для определения объема утечки можно выразить следующим образом:

$$Q'_{leak} = Q'_{in} - Q'_{out} + \frac{V}{\Delta t} \cdot \frac{T_s}{P_s} \cdot \left[\frac{P'_{in} + P'_{out}}{T'_{in} + T'_{out}} - \frac{P'^{t-\Delta t}_{in} + P'^{t-\Delta t}_{out}}{T'^{t-\Delta t}_{in} + T'^{t-\Delta t}_{out}} \right] \cdot \frac{1}{Z'_{avg}} \quad (4)$$

Модифицированное уравнение с достаточной точностью определяет величину утечки газа в газопроводах, находящихся при любых физических условиях: давления, температуры, других параметров природного газа. Точность метода определяется инструментальной точностью определения параметров газа в системе SCADA, а также методической погрешностью определения коэффициента сжимаемости.

Недостатком методики является отсутствие возможности локализации места предполагаемой утечки, так как предполагается выделение только тех участков сети, границы которых оснащены средствами измерения расхода, давления и температуры системы SCADA.

На практике актуальным является не только определение величины утечки на участке магистрального газопровода, оснащенного оконечными станциями измерения потока газа, а также выявление возможного места утечки. Постоянный мониторинг работы участка магистрального газопровода в системе SCADA позволяет выявить и место утечки.

Для этого используется следующий метод. Участок газопровода условно разбивают на небольшие участки l (см. рис. 3), в пределах которых и ведется поиск места возможной утечки.

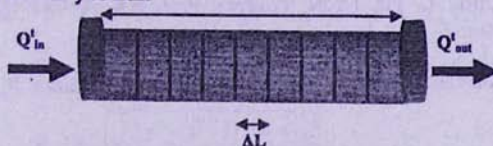
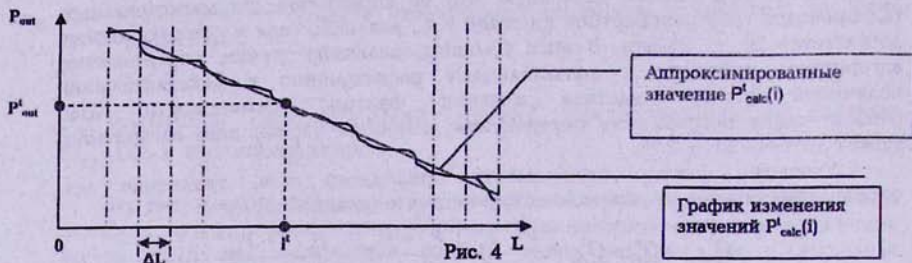


Рис. 3

Предполагая, что утечка произошла на расстоянии $n \cdot \Delta l = l$, где $n = 1...N$ (N - число разбиения участка газопровода длиной L) по уравнению вычисления расхода $Q_{calc}(l)$ рассчитывают значения выходного давления P_{calc}^t на конце газопровода, которое зависит от n , при условии постоянства параметров газа за интервал времени t . Далее, изменяя n от 1 до N , получают N значений $P_{calc}^t(1), ..., P_{calc}^t(N)$.

Откладывая на графике (см. рис. 4) вычисленные значения $P_{calc}^t(l)$ на момент времени t , получаем дискретный график изменения ожидаемой величины выходного давления в зависимости от l - места возможной утечки от начала участка газопровода. Аппроксимируя эти значения можно получить непрерывный график изменения P_{calc}^t :



Отложив на оси координат фактическое значение P_{out}^t , измеренное в системе SCADA на момент времени t и продолжив его до пересечения с графиком P_{calc}^t получим значение l^t , которое соответствует месту возможной утечки природного газа на момент времени t .

Для каждого цикла измерения t определяется место возможной утечки l^t .

$$l^1, ..., l^M$$

Усредняя полученные значения за некоторое $t = M$ (например сутки 24 часа), получим среднее значение:

$$l_{avg} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M l^i, \quad (5)$$

Которое и будет искомым значением месторасположения утечки газа.

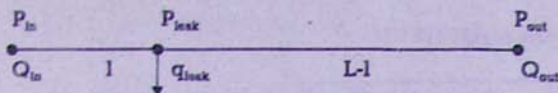
6. Вывод формулы для определения P_{calc}^t

Рассмотрим следующую ситуацию:

Имеем трубу длины L . На l -том участке имеется утечка q_{leak} . Нам известны следующие данные:

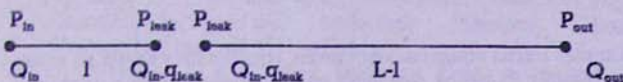
$$P_{in}, Q_{in}, q_{leak}, Q_{out}, L, l.$$

Используя эти данные выведем формулы для нахождения P_{out} , зависящую от q_{leak} и l .



$$Q = C \cdot \frac{T_b}{P_b} \cdot \left(\frac{1}{f}\right)^{0.5} \cdot \left[\frac{(P_{in}^2 - P_{out}^2)}{G \cdot T_{avg} \cdot Z \cdot L}\right]^{0.5} \cdot D^{2.5} \text{ - Общая формула расчета } Q_{calc}$$

Разделим весь участок трубы на 2 части:



Посчитаем для этих частей Q_{calc1} и Q_{calc2} .

По принципу среднего значения и используя E , $Q_{calc1,2}$ можно получить из следующего соотношения.

$$Q_{calc1} = \frac{Q_{in} + Q_{in} - q_{leak}}{2 \cdot E} = \frac{2 \cdot Q_{in} - q_{leak}}{2 \cdot E} \quad (6)$$

$$\text{Обозначим } 2 \cdot Q_{in} = a \quad q_{leak} = q \Rightarrow Q_{calc1} = \frac{a - q}{2 \cdot E} \quad (7)$$

Соответственно Q_{calc2} есть:

$$Q_{calc2} = \frac{Q_{in} - q_{leak} + Q_{out}}{2 \cdot E} = \frac{b - q}{2 \cdot E} \quad \text{где } Q_{in} + Q_{out} = b \quad (8)$$

Q_{calc1} приравняем к результату подстановки в общую формулу.

$$\frac{a - q}{2 \cdot E} = C \cdot \frac{T_b}{P_b} \cdot \left(\frac{1}{f}\right)^{0.5} \cdot \left[\frac{(P_{in}^2 - P_{leak}^2)}{G \cdot T_{avg} \cdot Z \cdot l}\right]^{0.5} \cdot D^{2.5} \quad (9)$$

$$(a - q)^2 = 4 \cdot E^2 \cdot C^2 \cdot \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^2 \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{(P_{in}^2 - P_{leak}^2)}{G \cdot T_{avg} \cdot Z \cdot l} \cdot D^5 \quad (10)$$

$$(a - q)^2 = \frac{(P_{in}^2 - P_{leak}^2)}{l} \cdot k \quad \text{где } k = 4 \cdot E^2 \cdot C^2 \cdot \frac{T_b^2}{P_b^2} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{D^5}{G \cdot T_{avg} \cdot Z} \quad (11)$$

Выразим отсюда P_{leak} :

$$P_{leak} = \sqrt{P_{in}^2 - \frac{l \cdot (a - q)^2}{k}} \quad (12)$$

Используя выражение для Q_{calc2} , найдем P_{out}

$$(b - q)^2 = \frac{(P_{leak}^2 - P_{out}^2)}{L - l} \cdot k \quad (13)$$

$$P_{out} = \sqrt{P_{leak}^2 - \frac{(L - l) \cdot (b - q)^2}{k}} \quad (14)$$

Преобразуем полученное выражение:

$$P_{out} = \sqrt{P_{in}^2 - \frac{I((a-q)^2 - (b-q)^2) + L(b-q)^2}{k}} \quad (15)$$

По этой же формуле вычисляется P_{calc}^1 .

7. Программа

Используя вышеописанный метод обнаружения утечек, создана программа на языке VisualBasic 6. Программа состоит из одной основной или родительской формы и пяти вспомогательных или дочерних форм (см. рис. 5)

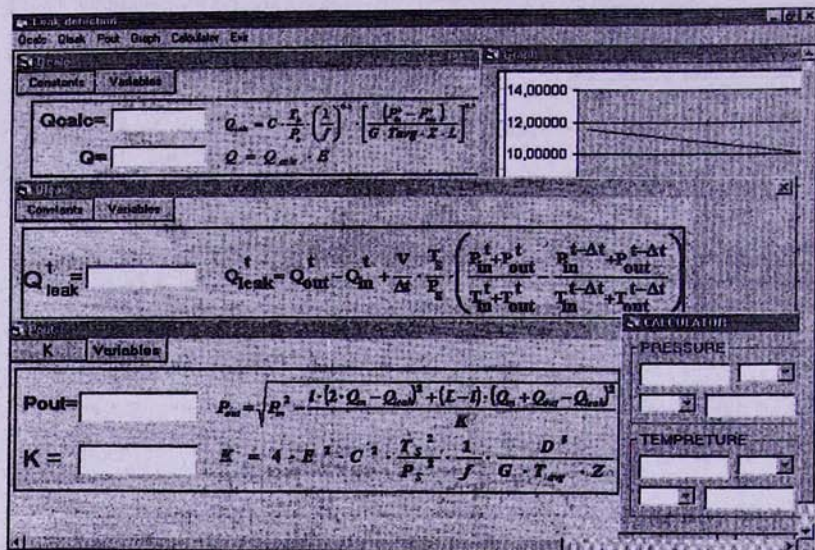


Рис. 5

Формы Q_{calc} , Q_{leak} , P_{out} работают по соответствующим им формулам. Эти три формы связаны между собой т.е. данные из одной формы могут быть переданы на другую форму. Все введенные и вычисленные данные сохраняются в таблице Excel, откуда они могут быть легко отредактированы. Форма Calculator создана для быстрого перехода от одной единицы измерения давления или температуры к другой. Последняя форма это графическая форма отображающая изменения P_{out} в зависимости от расстояния утечки от начала отрезка трубопровода. Все пять форм доступны из меню программы, расположенного в верхней части родительской формы.

Литература

- [1] "Pipelines /Planning and Economics", Geop(Gas Engineering and Operating Practice Series)
- [2] Dunkler A.E., "Gas – Liquid Flow in Pipelines", The university of Houston
- [3] Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.Ф., "Типовые Расчеты при Проектировании и Эксплуатации Газопроводов", Москва "НЕДРА" 1982.
- [4] Scott L.S., Barrufet M.A., "Worldwide Assesment of Industry Leak Detection Capabilities for Single and Multiphase Pipelines", Department of Petroleum Engineering Texas A&M University.
- [5] Westhoff M.A., "Using Operating Data at Natural Gas Pipelines", Colorado Interstate Gas Company.
- [6] Danesh Ali, "Discussion of Elevation of Inclined-Pipe, Two-Phase Liquid Holdup and Pressure Loss Correlations Using Experimental Data"
- [7] Nicholas R.E., "Leak Detection and Location Sensitivity Analysis", Pipeline engineering 92, PD-Vol. 46, Asme.
- [8] Техническое описани системы SCADA АрмРосгазпрома, 2004
- [9] "Системы диспетчерского управления сбора данных (SCADA-системы)", <http://ankey.ru/tech/scada/intro.htm>

Արտահոսքի հայտնաբերման և լուկալացման ալգորիթմ

Ռ. Խաչատրյան

Ամփոփում

Բերված է մոնիտորինգի և դիսպեչերական կառավարման SCADA համակարգերի համառոտ նկարագիրը: Ներկայացված են զագատարի հիդրավիկ հաշվարկի համար օգտագործվող հիմնական բանաձևերը: Հետազոտված է արտահոսքը հայտնաբերելու գոյություն ունեցող ամալիտիկ մեթոդներից մեկը և առաջարկված է նրա ձևափոխությունը՝ արտահոսքի վայրը որոշելու համար: Նաև նկարագրված է այդ մեթոդը իրականացնող ծրագիրը: