

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ МЕТОДОМ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ

Костандян Артур Валериевич

руководитель, ООО «КСИМАТИК», РФ, Москва

Егоров Александр Фёдорович

д-р техн. наук, проф., Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, РФ, г. Москва

Сидоров Валерий Васильевич

канд. техн. наук, проф., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, РФ, г. Москва

IDETIFICATION AND LOCALISATION OF LEAKS IN PIPELINES USING THE PARTICLE FILTER METHOD

Arthur Kostandyan

Supervisor, LLC "KSIMATIK", Russia, Moscow

Aleksandr Egorov

Doctor of Technical Sciences, Professor, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Russia, Moscow

Sidorov Valery

Candidate of Technical Sciences, Professor, I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (RGU), Russia, Moscow

Аннотация. В статье рассмотрено использование метода фильтра частиц в качестве для оценки режимных параметров в промежуточных точках трубопровода с помощью имеющихся измерений в конечных точках. Разница показаний между оцененными состояниями и реальными измерениями в промежуточных точках используются для обнаружения и локализации утечек в трубопроводах транспортировки природного газа.

Abstract. The paper discusses the use of the particle filter method to estimate the mode parameters at intermediate points in a pipeline using available end-point measurements. The difference in readings between the estimated states and the actual measurements at intermediate points are used to detect and localize leaks in natural gas transmission pipelines.

Ключевые слова: трубопровод, утечки, фильтр частиц, оценка состояния, локализация утечек.

Keywords: pipeline, leak detection, particle filter, state estimation, leak localization.

Введение

Существующие методы обнаружения утечек в трубопроводах, основаны на внутреннем мониторинге и методах внешнего мониторинга [3, с. 340]. Внутренние методы контролируют параметры трубопровода, используя уже установленные датчики, с другой стороны, внешние методы работают по принципу физического обнаружения утечек.

Внешние методы обеспечивают более точное определение мест утечек, но они более дорогостоящие и в большинстве случаев не могут быть установлены на старых трубопроводах. Поэтому внешние методы не используются для непрерывного мониторинга.

Внутренние методы могут быть использованы для непрерывного мониторинга с меньшими затратами, но при этом большинство из них точно не определяют место утечки.

Внутренние методы подразделяются на две группы, основанные на моделях и данных. Для первой группы требуется динамическая модель потока в трубопроводе, состоящей из нелинейных дифференциальных уравнений [1, с. 193], [4, с. 673] и решение в «закрытой» (конечной) форме отсутствует, что, в какой-то степени, является недостатком.

Методология решения задачи обнаружения утечек в газопроводе

Методы, основанные на данных, также не могут локализовать место утечки, когда размер утечки мал (менее 5 процентов от номинального расхода).

Поскольку методы, основанные на данных статистического анализа, малоэффективны в переходных режимах по обнаружению и локализации небольших утечек, в статье рассматривается метод, основанный на модели переходных процессов в режиме реального времени.

Представленный подход решения проблемы обнаружения утечек сфокусирован на трубопроводах для транспортировки газожидкостных фаз. Эффективность предложенного метода показана на результатах моделирования обнаружения и локализации утечек.

Утечка обнаруживается путем сравнения оценочных (расчетных по модели) состояний фильтра частиц с имеющимися промежуточными измерениями давления.

На рис. 1 приведена укрупненная схема зондирования обнаружения утечек в трубопроводе.

Рисунок 1. Схема зондирования обнаружении утечек в трубопроводе

Для упрощения предполагается, что трубопровод работает в изотермическом режиме эксплуатации, при этом уравнениями энергии и температуры в данном изложении пренебрегаются.

В большинстве случаев измерения доступны на концах трубопровода. В случае рис. 1, давление, массовый расход и плотность как в узле 1 (p_1 , W_1 , d_1), так и в узле 7 (p_7 , W_7 , d_7) доступны.

Из 6 измерений необходимы, как минимум, 4 измерения на входе-выходе и 2 измерения в качестве граничных условий для уравнений неразрывности потока, с помощью которых будут сравниваться расчетные оценки модели фильтра частиц для обновления оцененных состояний.

Целью является использование фильтра частиц для оценки параметров транспортируемого природного газа, нефти, нефтепродуктов по трубопроводу - давления, массового расхода и . Например, пусть W_1 и p_7 - граничные условия, а p_1 и d_1 два доступных измерения. По модели фильтра частиц оцениваются остальные 17 неизвестных состояний транспортируемой среды по трубопроводу.

Основным преимуществом фильтра частиц является достаточно точная оценка неизвестного состояния, даже если модель является сильно нелинейной, а шум негауссовым.

Основное различие между методами прогнозирования по модели и оценки с помощью ФЧ заключается в том, что в случае ФЧ, прогнозируемые состояния обновляются с помощью доступных измерений. Таким образом, оценка параметров режима трубопроводной транспортировки методом фильтра частиц более достоверна и достоверна чем предсказанные по модели.

При большем количестве достоверных измерений (предположим, узлы 3 и 5), точность оценки состояния возрастает. На некоторых промежуточных узлах, в соответствии с технологией трубопроводной транспортировки углеводородной среды имеются измерения, например, давление на промежуточных насосных и клапанных станциях. Используя эти данные и возможности, фильтром частиц генерируются расчетные данные с меньшим интервалом разбиений по длине трубопровода. плотности в промежуточных узлах
При возникновении утечки изменяется профиль измерений в узлах 1 - 7. Фиксируя эти отклонения, утечка может быть обнаружена.

При возникновении утечки на участке, последующие участки трубопровода также покажут характер этого отклонения. Таким образом, сравнивая имеющиеся промежуточные измерения давления с оценкой ФЧ в промежуточных узлах, локализует участок утечки.

Фильтр частиц, как инструмент оценки профиля давления по длине трубопровода, функционирует в два этапа. На первом этапе предсказывает неизвестные состояния с помощью модели процесса. На втором этапе корректирует предсказанные состояния с помощью имеющихся измерений и восстанавливает начальное состояние для следующего узла трубопровода.

Дискретная модель используется для решения задачи фильтра частиц. При дискретизации

КФЛ является необходимым условием устойчивости явного численного решения некоторых дифференциальных уравнений в частных производных. Как следствие, во многих компьютерных симуляциях для получения корректных результатов, временной шаг должен быть меньше определённого значения.

Физически критерий КФЛ означает, что частица транспортируемого флюида за один шаг по не должна продвинуться больше, чем на один пространственный шаг . Или, иными словами, вычислительная схема не может корректно обсчитывать распространение физического возмущения, которое в реальности движется быстрее, чем вычислительная схема позволяет "отслеживать", то есть один шаг по пространству за один шаг по времени.

Выбор модели фильтра частиц

времени

Модель представлена ниже:

Дискретная форма модели имеет вид:

где: p – давление в трубопроводе, Па; C_{son} – скорость звука в транспортируемой среде в трубопроводе, м/с; A – площадь поперечного сечения трубопровода, м²; W – массовый расход жидкости, кг/с; f – коэффициент трения трубопровода; D – диаметр трубопровода, м; Δt – шаг по времени для выборки, с; $v = 1/d$ – удельный объем, м³/кг; d – плотность жидкости, кг/м³; g –
– угол возвышения от поверхности земли, градус; i –
количество узлов пространства; j – номер временного узла.

Сжимаемость газа моделировалась с помощью следующих уравнений [2, с. 965]:

гравитационное ускорение, м/с²;

где,

– модуль объемной упругости газа; V_0 , м³, объем газа при стандартном давлении p_0 ; $v_{i,j}$, м³,
объем газа при давлении $p_{i,j}$.

Дискретная модель с утечкой может быть записана в виде:

Рисунок 2. Принципиальная схема процесса моделирования

Результаты решения тестовой задачи

В соответствии со схемой моделирования, тестовая задача, рисунок 2, состоит из 100 узлов и 300 переменных: давление, массовый расход и плотность в каждом из этих узлов.

Граничными условиями являются массовый расход в узле 1 ($W_{1,j}$) и давление в узле 100 ($p_{100,j}$), два измерения - давление в узле 1 ($p_{1,j}$) и плотность в узле 1 ($d_{1,j}$). Предполагается, что 3 других измерения давления доступны в узлах 25, 50 и 75.

Было выявлено два значительных несоответствия между моделируемой системой труб и прогнозной моделью ФЧ.

Неравные начальные условия были первым несоответствием. Неопределенность параметров процесса была вторым несоответствием.

Неопределенность параметров процесса моделировалась наложением гауссовского белого шума на параметры процесса.

В данном исследовании трубопровод моделировался с помощью комбинации уравнений (3), (4) и (5). В качестве рабочей среды для моделирования был выбран природный газ. Таким образом, физико-химические свойства были использованы в уравнениях (3) и (4).

В реальности массовый расход не является постоянным в условиях отсутствия утечек, для простоты предполагаем его постоянным с некоторым наложенным шумом. Аналогичные упрощения были сделаны для давления и плотности. В представленной имитационной модели не рассматриваются непредсказуемые или внезапные изменения.

Установлено, что коэффициент трения (f) является наиболее важным параметром настройки имитационной модели для сходимости расчетного профиля давления с реальным (истинным). Относительно большая шероховатость предполагается для рассмотрения старых трубопроводов, которые обычно часто встречаются в реальности.

На моделируемые данные налагается шум, которые будут использоваться в качестве измерений и граничного значения.

ФЧ используется для оценки неизвестных параметров состояния. Для проверки эффективности ФЧ рассматриваются узлы 25, 50 и 75.

Неиспользованные измерения давления в узлах 25, 50 и 75 используются для обнаружения и локализации утечки. Есть два тестовых случая: а) утечка была введена в узле 40, выборочное время 450 секунд. и б) утечка была введена в узле 75 при времени выборки 450 секунд).

Отклонение определяется как отношение разности между измеренными и оцененными фильтром частиц к величине измеренной, в процентах. При отклонении между расчетным значением и реальным измерением, не превышающий заданный допустимый порог, утечка отсутствует.

Это отклонение больше в районе места утечки. Таким образом, координата утечки находится

между двумя узлами с большими значениями отклонения.

Сравнение осуществляется как по давлению, так и по скорости утечки – сравнением массовых расходов в конечном узла. Как правило, массовый расход доступен в конечном узле газопровода.

Были проведены расчеты профилей давления, массового расхода и плотности. Было смоделировано в общей сложности 500 образцов по времени с частотой выборки 1 с. Таким образом, общее время моделирования составило 500 с.

В данном разделе рассматривается моделируемый участок магистрального газопровода длиной 34 км, с диаметром 1400 мм.

На выходе КЦ1 давление природного газа на входе в газопровод $P_{вх} = 6,9$ МПа в конце газопровода $P_{вых} = 5,54$ МПа на входе в КЦ2. Для целей моделирования трубопровод был разделен на 100 равных участков (100 узлов).

Принципиальная схема процесса моделирования представлена на рис. 2.

Моделирование проводилось при полной загрузке газопровода в соответствии с исходными данными и оргниченными по загрузке режимом.

Рисунок 3. Результаты моделирования по узлам газопровода при полной загрузке

В таблице представлены расчетные режимные параметры в конце газопровода с утечкой и без утечки в зависимости от уклона.

Таблица 1.

Изменение режимных параметров в конце газопровода в зависимости от уклона

№№	Уклон,	P, МПа	Q, м³/с	W, кг/с
----	--------	--------	---------	---------

	градус	без утечки	с утечкой	без утечки	с утечкой	без утечки	с
1	0	5,6	5,26	762,31	701,36	571,73	
2	1	5,62	5,27	830,95	769,90	623,21	
3	2	5,63	5,29	894,60	833,53	671,00	
4	3	5,64	5,30	954,34	893,13	715,75	

Заключение

В статье представлено применение фильтра частиц для обнаружения утечек в трубопроводах. Результаты моделирования показывают, что фильтр частиц хорошо отражает динамику реальной системы и может служить в качестве программного обеспечения - «мягкого» («виртуального») датчика реальной системы.

Предложенная система может эффективно обнаруживать утечки. Хотя локализация утечки еще не является точной, она может, по крайней мере, изолировать минимально возможный участок трубопровода, в котором предположительно имеется утечка.

Список литературы:

1. Geiger, G. (2006). State-of-the-art in leak detection and localization. Oil Gas European Magazine, 32(4), 193.
2. Hayward, A.T.J. (1967). Compressibility equations for liquids: a comparative study. British Journal of Applied Physics, 18(7), 965.
3. Stafford, M., Williams, N., and Britain, G. (1996). Pipeline leak detection study. HSE Books.
4. Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. Control Engineering Practice, 9(6), 673-682.