

**УДК 622.691.4**

**М.М. Нзомоно**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

## **СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ПЕРЕКАЧКИ**

В данной статье исследуются и создаются способов и устройств обнаружения утечек из трубопроводов в нестационарном режиме откачки; анализируются перспективы внедрения и использования волоконно-оптических систем в качестве основного средства обнаружения утечек на объектах трубопроводного транспорта.

**Ключевые слова:** утечка; трубопроводов, наблюдение с воздуха, онлайн-свиной, Акустические методы, контроль давления, графоаналитический метод, Гидравлические методы, оптоволоконный кабель.

**М.М. Nzomono**

National University of Oil and Gas «Gubkin University»

## **SYSTEMS FOR DETECTING LEAKS FROM MAIN PIPELINES WHEN NON-STABLE PUMPING MODE**

This article investigates and creates methods and devices for detecting leaks from pipelines in a non-stationary pumping mode; analyzes the prospects for the introduction and use of fiber-optic systems as the main means of detecting leaks at pipeline transport facilities.

**Keywords:** leak; pipelines, aerial observation, online pigs, Acoustic methods, pressure control, grapho-analytical method, Hydraulic methods, fiber optic cable.

**Введение.** В трубопроводах, как правило, нарушение герметичности происходит из-за коррозии труб, вызывающей разрушение металла, образования сквозных отверстий и разрыва труб. Также стоит обратить внимание на качество сварных швов, так как их недобросовестное исполнение может привести к температурным удлинениям, а как следствие, к образованию места утечки.

В последнее десятилетие были представлены новые методы обнаружения утечек, подходящие для трубопроводных сетей. Хотя немногие из них применялись на практике, эти методы будут обсуждаться в этой статье, чтобы предоставить обзор методов обнаружения утечек. На основе теоретических исследований создано множество методов и систем обнаружения утечек: Наблюдение и мониторинг в автономном режиме; Методы на основе онлайн-свиной; Акустические методы; Гидравлические методы; применения дорогих волоконно-оптических кабелей-датчиков и спутниковых систем слежения. В настоящее время, несмотря на многообразие применяемых способов и методик, не существует универсального метода, способного достаточно точно определить местоположение утечки и при

этом не требующего больших затрат на реализацию и эксплуатацию. Каждый из существующих методов не лишен недостатков.

Таким образом, одной из задач эксплуатации трубопроводного транспорта является своевременное обнаружение утечек, возникших в результате утечек, и их местонахождение. В связи с этим особенно актуальны исследования, направленные на создание методов и устройств для обнаружения протечек трубопроводов [1,2].

Целью данной работы является изучение существующих методов обнаружения утечек на нефте- и газопроводах в нестационарном режиме откачки и анализ перспектив внедрения и использования волоконно-оптических систем в качестве основного средства обнаружения утечек в установках трубопроводного транспорта.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач, определяющих структуру работы, а именно:

- изучение методов обнаружения утечек, широко используемых в настоящее время на установках трубопроводного транспорта;
- анализ исследований, проведенных по волоконно-оптическому методу обнаружения утечек в трубах.

**Современное состояние трубопроводного транспорта.** Вопрос безопасности перемещаемых нефти и нефтепродуктов имеет большое значение для поставщиков и получателей. Актуальность проблемы возникает на участках трубопроводов и приемных точках нефтедобывающих компаний и нефтеперерабатывающих заводов до узлов присоединения магистральных трубопроводов. Участки этих трубопроводов могут располагаться как на территориях, принадлежащих одной из сторон, так и на отчужденных территориях. В любом из этих вариантов утечки возможны из-за аварий на трубопроводе или из-за несанкционированного подключения к трубопроводу.

Решением проблемы является построение организационно-технических систем контроля состояния целостности трубопровода. Решением вопроса служит построение организационно-технических систем для контроля за состоянием целостности трубопровода.

Строительство и эксплуатация магистральных и промысловых нефтегазопроводов осуществляется в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях, таких как возможное наличие многолетнемерзлых грунтов, горных ландшафтов, крупных водотоков и др. Эксплуатация трубопроводов в сложных условиях сопровождается расширением аналитических возможностей функциональной диагностики трубопроводов, наиболее важным элементом которой является обнаружение утечек на эксплуатационном участке трубопровода. Для контроля утечек обычно применяются такие методы, как Наблюдение и мониторинг в автономном режиме; Методы на основе онлайн-свиной; Акустические методы; Гидравлические методы; применения дорогих волоконно-оптических кабелей-датчиков и наблюдение с воздуха. Все они характеризуются той или иной степенью достоверности.

Чаще всего используются методы обнаружения утечек из первых трех групп. Эти методы основаны на плавной, а не непрерывной работе, и их основные недостатки заключаются в том, что они медленно обнаруживают утечки. Для непрерывного мониторинга трубопроводной системы были разработаны определенные методы, основанные на гидравлических моделях с использованием системных измерений в качестве граничных условий. Многие из этих методов обнаружения утечек все еще находятся в стадии разработки. Производительность систем, основанных на модельных методах обнаружения утечек, до сих пор была неудовлетворительной по многим причинам (3). Однако методы обнаружения утечек на основе моделей могут представлять будущее направление методов обнаружения утечек за счет улучшений в моделировании трубопроводов и измерениях системы.

**Офлайн наблюдение.** Один из самых простых способов поиска утечек - это регулярное патрулирование трубопровода путем визуальной проверки целостности трубопровода. Часто неофициальный мониторинг трубопроводов осуществляется пассивно людьми поблизости, которые могут уведомить оператора о проблеме с трубопроводом. Индикаторные газы, использующие нетоксичный газ с запахом (например, меркаптаны) или определенные электрически обнаруживаемые газы, могут вводиться в определенные газы или химические трубопроводы для повышения эффективности мониторинга. Эффективность этого метода сильно зависит от погодных условий и направления ветра (3,4). В дополнение к использованию трейсургаза, обученные собаки-слежки могут использоваться для определения мельчайших запахов жидкостей и утечек газов. Сообщается о нескольких успешных случаях, например, трем собакам-следователям удалось обнаружить 150 утечек на 150 км трубопровода за 9 дней. Однако некоторые исследования не оправдали ожиданий, особенно когда результаты требовались в экстренных условиях. Для некоторых нефте- и газопроводов вдоль трубопровода могут быть установлены системы внешнего зондирования для мониторинга окружающей среды за пределами трубопровода. Двумя наиболее распространенными внешними системами обнаружения являются системы контроля паров в кабеле и системы обнаружения жидкости. Эти системы обычно не могут обеспечить раннее предупреждение об утечке, если непроницаемый барьер, который позволяет накапливаться потерянному материалу, не размещен под или над трубопроводами (3,4).

**Онлайн-методы на основе свиней.** Трубопроводный скребок действует как поршень, свободно движущийся внутри трубопровода, уплотняя внутреннюю стенку с помощью ряда уплотнительных элементов. Различные скребки широко используются в нефтегазовой промышленности для ввода в эксплуатацию, очистки трубопроводов, заполнения, депарафинизации, измерения и мониторинга трубопроводов (4). Свиньям обычно требуются спроектированные спусковые и приемные суда для подачи их в трубопровод. Свиньи можно определять с помощью сигналов вдоль трубы или электронных систем слежения, установленных внутри

скребка. Сви́ньи обычно используются через регулярные промежутки времени для проверки внутреннего состояния труб. Анализируя данные, передаваемые со скребков, можно не только точно определить место утечки, но и регулярно отслеживать коррозию стенки трубы, ямок и характеристики сварных швов (6). скребковые базы впечатляют для контроля целостности трубопроводов, их применение ограничено большими трубами диаметром более 200 мм. Методы на основе сви́ньи вряд ли будут применяться в системах водоснабжения, где применение клапанов, колен, труб разного диаметра и фланцев труб ограничивает движение скребков. Даже в нефте- и газопроводах методы обнаружения утечек на основе сви́ньи должны работать с другими методами, чтобы обеспечить быстрое реагирование на отказ трубопровода, поскольку мониторинг по-прежнему представляет собой сложную задачу, а не процесс.

**Переходные методы демпфирования.** Когда переходный процесс распространяется по трубопроводу, переходный процесс затухает из-за трения трубы и утечек. Посредством исследования затухания, вызванного утечкой, по сравнению с затуханием переходных процессов в том же герметичном трубопроводе, утечки могут быть обнаружены. Этот эффект был применен для мониторинга целостности конвейера без перехвата в реальном времени с использованием псевдослучайных двоичных нарушений (7). Наличие утечки определялось по разрыву импульсной характеристики утечки вдоль трубопровода. Исследование чувствительности на основе метода характеристик показало, что затухание импульса в трубопроводе зависит от размера утечки и давления в трубопроводе. В частности, было получено линейное аналитическое решение для переходного процесса в трубопроводе с утечками (7). Аналитическое решение показало, что демпфирование, вызванное трением экспоненциального переходного процесса в трубопроводе, и это демпфирование, вызванное утечкой, приблизительно экспоненциально. Скорость затухания, вызванная утечкой, зависит не только от размера и местоположения утечки, но также от давления в трубопроводе, положения измерения переходного процесса и начального состояния переходного процесса (формы переходного процесса). На основе анализа раствора была разработана методика обнаружения утечек. Этот метод не требует строгого определения и моделирования граничных условий и переходных процессов в трубопроводе. Этот метод оказался успешным в обнаружении, локализации и количественной оценке утечки размером 0,2% из поперечного сечения трубопровода на основе численных и лабораторных экспериментов (7). Этот метод может быть применен к сети трубопроводов для обнаружения утечек, но маловероятно, что этот метод может определить местоположение утечек в сети (7).

**Метод искусственной нейронной сети.** Техника искусственной нейронной сети (ИНС), основанная на переходной модели трубопровода, была применена в системе обнаружения утечек сжиженного газа (8). Предполагалось, что эталонный трубопровод длиной 74 668 м и диаметром 0,203 м будет приводить в действие ИНС с использованием данных, сгенерированных переходной моделью на основе 1000

прогонов при различных условиях утечки и потока. Этот метод позволил обнаружить и локализовать утечки до 1% от общего потока приблизительно за 100 секунд на основе численных результатов. Однако при использовании этих измерений средняя ошибка обнаруженных утечек составила около 7000 метров для утечки 1% от общего потока и 1645 метров для утечки 10% от общего потока. Подобно проблемам, существующим в обратных методах, без точного моделирования переходных процессов в трубопроводной сети с использованием переходной модели информация об утечках может быть потеряна в процессе обучения.

**Волоконно-оптический метод обнаружения утечек.** Анализ достоинств и недостатков рассмотренных систем, а также отсутствие многопараметрической полноценной методологии актуализируют задачи разработки методов мониторинга утечек с использованием новых технологий. В связи с этим представляет интерес система геотехнического мониторинга трубопроводов с использованием волоконно-оптических систем, которые используются в Европе и позволяют получать данные о состоянии геотехнической системы «трубопровод - окружающая среда» в непрерывном автоматическом режиме по всей длине контролируемого объекта [9].

Для определения места утечки масла в трубопроводах очень удобно и эффективно использовать информацию о распределении температуры по оптическому волокну, расположенному на контролируемом объекте. Когда в нефтепроводе происходит утечка, температура почвы вокруг нее изменяется. Таким образом, отслеживая температуру среды в непосредственной близости от трубопровода, можно эффективно определять места утечек в нем.

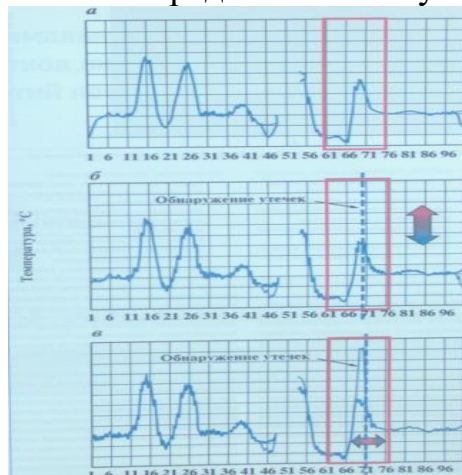


Рисунок 1 – График динамики изменения температуры в месте утечки

Этот двухэтапный процесс изменения температурного профиля определяется системой обработки сигналов как утечка.

Определение места измерения температуры основано на технологии, аналогичной той, что используется в радиолокационных установках (рефлектометрия). Лазерные импульсы запускаются в волокно, и характеристики рассеянного света регистрируются как функция времени. Учитывая скорость света,

температуру волокна можно рассчитать как функцию расстояния (температурный профиль). Пространственное разрешение таких измерений определяется длительностью импульса (например, 10 наносекундных импульсов задают точность измерения расстояния 1 метр). Благодаря высокой скорости света, распределение температуры в кабеле длиной несколько километров можно измерить за 1 секунду.

Преимущества данного метода:

- оптическое волокно работоспособно в широком диапазоне температур (от -50 °С до +80 °С);
- выдерживает напряжение на разрыв свыше 75 МПа;
- волоконный кабель абсолютно не чувствителен к электромагнитным возмущениям;
- не подвержен коррозии;
- рассчитан на срок службы свыше тридцати лет;
- прокладка кабеля в качестве чувствительного элемента возле трубопровода намного проще и дешевле по сравнению с установкой большого количества точечных датчиков;
- позволяют определить температуру с точностью до 1 °С.

Недостатки данного метода:

- для восстановления связи при обрыве линии требуется замена всего поврежденного участка, сращиванию волноводы не подлежат, таким образом, ремонтные работы серьезно удорожаются;
- не обнаруживает тип воздействия;
- не обнаруживает утечки, расположенные симметрично кабелю за трубопроводом;
- волоконно-оптический кабель является лакомством для полевых мышей.

**Заключение.** В ходе данной работы были рассмотрены существующие способы обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах при нестационарном режиме перекачки и проведен анализ перспектив внедрения и использования волоконно-оптических систем в качестве основного средства обнаружения утечек на объектах трубопроводного транспорта.

Для достижения цели данной работы были решены следующие задачи:

- изучены методы обнаружения утечек, в настоящее время широко применяющихся на объектах трубопроводного транспорта;
- проведен анализ проведенных исследований волоконно-оптического и другие метода обнаружения утечек из нефте- и нефтепродуктопроводов.

Из проанализированной информации мы можем сделать вывод о том, что системы обнаружения утечек являются необходимым компонентом трубопроводной системы. В настоящее время не существует универсального метода обнаружения утечек, но одним из наиболее перспективных направлений являются волоконно-оптические системы, также являющиеся многофункциональным методом коммуникации вдоль действующих трубопроводов.

### Список литературы

1. Шестаков Р.А. Отбор нефти из магистрального нефтепровода как частная задача параметрической диагностики. Постановка задачи // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 2. – С.55-59.
2. Шестаков Р.А. Разработка методики параметрической диагностики технологических участков магистральных нефтепроводов: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Шестаков Роман Алексеевич. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2019. – 155 с.
3. Блэк, П. (1992). «Обзор технологии обнаружения утечек в трубопроводе». Трубопроводные системы, Б. Коулбек и Э. Эванс, ред., Kluwer Academic Publishers, 287–297.
4. Фернесс, Р.А., и Reet, Ж.Д. (1998). «Методы обнаружения утечек в трубопроводе». Полезные правила для трубопровода Справочник, EW McAllister, ed., Gulf Publishing Company, Хьюстон, Техас, 476-484
5. Абдулин, А.Р. Об эффективности контроля утечек нефти на магистральных нефтепроводах / А.Р. Абдулин, А.Н. Куваев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2000. – № 6. – С. 44-45.
6. Бритиш Газ. (1994). «Бритиш Газ использует ультразвуковой аппарат для оценки целостности трубопроводов». Трубопровод и газ Журнал, 221 (12), 40-42.
7. Лиу, С.П. и Тиан, Дж. (1995). «Подходы к моделированию нестационарных течений и обнаружению утечек». Журнал энергетики ресурсы Technology, ASME, 117, 243-248.
8. Белсито, С., Ломбарди П., Андреусси, П., и Банерджи, С. (1998). «Обнаружение утечек в трубопроводах сжиженного газа искусственные нейронные сети.» Aiche Journal, 44 (12), 2675-2688.
9. Шестаков Р.А., Ганеева Л.К., Ганеева Л.К. Анализ волоконно-оптических методов обнаружения утечек в трубопроводах // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 2. – С.56-64.

### Сведения об авторах

**Нзомоно Маканга Мэркюр** – бакалавр в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, г. Москва, email: mercurenzomono@gmail.com

### About the authors

**Mercure Makanga Nzomono** – Bachelor in National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, email: mercurenzomono@gmail.com