

На правах рукописи



УЛИКАНОВ РИМ РАМАЗАНОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ В
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-
ВОЛНОВОГО АНАЛИЗА**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: **Ковалева Лиана Ароновна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Коробков Геннадий Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Болдырева Ольга Юрьевна
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник лаборатории волновой динамики многофазных систем Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа

Защита диссертации состоится «17» октября 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.05 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук, доцент



Киреев В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов является стратегически важной отраслью экономики Российской Федерации. Большая часть нефти и нефтепродуктов (свыше 50%) транспортируется по магистральным нефтепроводам и нефтепродуктопроводам. Протяженность магистральных трубопроводов в России составляет более 67 тыс. км.

Одним из рисков, сопровождающих эксплуатацию магистрального трубопровода, является риск возникновения утечек жидких углеводородов. Учитывая, что своевременное обнаружение утечек жидких углеводородов напрямую влияет на размер экологических и экономических последствий, необходимо в возможно сжатые сроки определить факт возникновения данного события. Для этих целей разработаны различные автоматизированные системы по обнаружению утечек жидкости. При этом наиболее перспективным направлением развития данных систем является построение алгоритмов на базе математических моделей физических процессов, протекающих в трубопроводе. В момент возникновения утечки жидкости возникает волна динамического возмущения давления и расхода потока, которое распространяется вдоль оси трубопровода. Анализируя параметры волны динамического возмущения давления, можно определить координату места его возникновения.

Поэтому работы, направленные на исследование закономерностей изменения структуры фронта волны динамического возмущения давления, распространяющегося по трубопроводу, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями нестационарных процессов занимались многие отечественные ученые: Н. Е. Жуковский, Л. Аллиев, С. А. Чаплыгин, Л. С. Лейбензон, С. А. Христанович, И. А. Чарный, А. А. Сури, Н. А. Картвелишвили, Ю. Н. Гризодуб, М. А. Гусейнзаде, В. А. Юфин, С. А. Бобровский, Л. В. Полянская, М. Г. Сухарев, Е. В. Вязунов, Л. Г. Колпаков, В. В. Жолобов, М. В. Лурье, М. В. Лисанов, С. И. Сумской, А.С. Дидковская, Э.В. Галиакбарова.

Многие зарубежные ученые, так же занимались исследованиями нестационарных процессов, наиболее значимые работы были выполнены такими учеными как: А. Anderson, М. Arfaie, R. A. Baltzer, A. Bergant, M. H. Chaudhry, J. A. Fox, A. H. Gibson, C. Jaeger, J. P. Th. Kalkwijk, C. Kranenburg, N. J. Marsden, M. McGarry, G. A. Provoost, A. H. Shapiro, J. Siemons, A. R. Simpson, V. L. Streeter, J. P. Tullis, G. Z. Watters, D. J. Wood, E. B. Wylie. Эти исследования в значительной мере способствовали развитию моделей, методов и подходов исследования нестационарных процессов, однако остается актуальным вопрос дальнейшего развития математических моделей движения динамического возмущения применительно к реальным объектам трубопроводного транспорта жидких углеводородов.

Цель диссертационной работы

Повышение эффективности работы системы обнаружения утечек жидкости за счет использования алгоритма, построенного на принципе структурно-волнового анализа возникающих динамических возмущений давления.

Объект исследования

Магистральный трубопровод, имеющий источник динамического возмущения давления и оборудованный техническими средствами для регистрации технологических параметров его работы.

Предмет исследования

Возмущение давления и его структурное изменение в процессе распространения по магистральному трубопроводу.

Задачи исследования

1. Построение математической модели нестационарных процессов в магистральном трубопроводе. Получение решения для случая работы трубопровода с утечкой жидкости.

2. Разработка метода определения координаты местоположения возмущения давления. Валидация предложенного метода с результатами прямого численного моделирования работы трубопровода с утечкой жидкости.

3. Создание лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований нестационарных процессов при течении жидкости. Проведение экспериментов по определению местоположения источника возмущения.

4. Разработка программного обеспечения для определения местоположения утечек жидкости на основе предложенного метода.

5. Проведение промышленных испытаний и апробирование программного комплекса на действующем магистральном трубопроводе.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика определения местоположения источника возмущения.

2. Результаты численного моделирования динамического возмущения в магистральном трубопроводе с заданным источником возмущения.

3. Область применения предлагаемого метода.

4. Результаты экспериментальных исследований на стендовом оборудовании.

5. Результаты промышленных испытаний на действующем магистральном трубопроводе.

Научная новизна работы

1. На основании сформулированной математической модели получена зависимость изменения амплитуды скачка давления, вызванного утечкой жидкости, от пройденного расстояния;

2. Теоретически доказана возможность построения методики по определению координаты источника возмущения давления в магистральном трубопроводе, основывающейся на результатах структурно-волнового анализа возникающих динамических возмущений давления;

3. На данных математического моделирования показана работоспособность предлагаемой методики по определению координаты источника возмущения давления в магистральном трубопроводе. Обосновано минимально-достаточное количество средств измерения давления для работоспособности предлагаемого метода;

4. На экспериментальных данных, полученных с лабораторной установки определена область использования предлагаемой методики по определению координаты источника возмущения давления. Рассмотрено влияние амплитуды волны давления и чувствительности средств измерения на точность определения координаты источника возмущения давления.

Научная и практическая значимость работы

Научной значимостью результатов выполненной работы является: полученная зависимость изменения параметров динамического возмущения давления, вызванного утечкой жидкости, от пройденного им расстояния по трубопроводу, методика по определению координаты источника динамического возмущения давления. Данные результаты могут быть использованы в научном обосновании развития систем обнаружения утечек жидкости в магистральных трубопроводах, при этом практической значимостью является возможность построения систем гидравлической диагностики магистральных трубопроводов на предмет идентификации источников динамических возмущений давления.

Обоснованность и достоверность полученных результатов основывается на применении фундаментальных уравнений механики движения жидкости при математическом моделировании рассматриваемых процессов; физической и математической непротиворечивостью в рамках физических законов, а также согласовании с экспериментальными данными, полученными на стендовом оборудовании, и результатами промышленных испытаний.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

- 55 научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2004 г.)
- VIII Международной научной конференции (г. Уфа, 10-14 декабря 2018 г.)
- Секция ученого совета ООО «НИИ Транснефть» «Исследование гидравлики трубопроводного транспорта» 03 апреля 2018 г.
- Ученый совет ООО «НИИ Транснефть» 23 мая 2018 г.
- Ученый совет ООО «НИИ Транснефть» 28 августа 2023 г.
- Международная научно-практическая конференция «Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче» (г. Уфа 24-27 августа 2023 г.)
- Ученый совет ООО «НИИ Транснефть» 20 сентября 2023 г.

- XVII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2023» (г. Уфа 16-17 ноября 2023 г.)
- XII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в ТЭК проблемы и решения 21-24 мая 2024 г.

Личный вклад соискателя

Формулировка и реализация математической модели, анализ результатов осуществлены совместно с научным руководителем. Численная реализация моделей, экспериментальные и промышленные испытания, валидация на данных экспериментальных исследований, проверка по данным, полученным с промышленного объекта, расчеты, оформление результатов проведены самостоятельно.

Публикации

По теме работы опубликовано двенадцать научных трудов, в том числе три научных статьи в изданиях, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Получены патент и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав, которые изложены на 104 страницах текста, содержит 47 рисунков, 12 таблиц, списка использованных источников из 114 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.т.н. Ковалевой Л.А. и доценту кафедры прикладной физики к.ф.-м.н. Кирееву В.Н. за помощь при постановке задач, советы и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении работы раскрыта актуальность представляемой научной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены научные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна, практическая значимость.

В первой главе диссертации рассматриваются имеющиеся достижения техники и науки в области идентификации динамических возмущений давления. Наиболее технически развитой областью, в которой используются методы идентификации динамических возмущений давления, является область по поиску и определению координат утечек жидкости в трубопроводах. Связано это с тем, что утечки приводят к значительным экологическим и экономическим последствиям, в связи с чем в главе представлен анализ существующих методов обнаружения утечек жидкости из магистральных трубопроводов, патентное исследование в области алгоритмов и способов идентификации утечек жидкости в трубопроводах, анализ существующей теории гидродинамического расчета

неустановившихся процессов в трубопроводах, перекачивающих жидкие углеводороды.

Основные причины появления утечек являются: коррозия трубопроводов, природные явления, ошибка оператора, нарушения в ходе проведения ремонтно-эксплуатационных работ, а также несанкционированные врезки, которые, согласно официальным данным, становятся все более значительной проблемой.

Внедрение в нефтегазовые технологии микропроцессорной техники позволяет получать, накапливать и сохранять в течение практически неограниченного времени массивы производственных данных, к которым относятся не только текущие рабочие параметры оборудования, но и электронные базы данных диспетчерских служб. Современное программное обеспечение позволяет использовать функции математического моделирования для прогнозирования сложных технических параметров.

Большое количество входных параметров при анализе повышает затраты времени на обработку данных, усложняет экспертизу, делает оценку более трудоемкой и менее наглядной. В связи с этим целесообразна разработка программного продукта, позволяющего:

- сократить время на расчет количественных показателей надежности;
- совместить качественную и количественную методики оценки при определении степени надежности нефтегазовых объектов;
- автоматически производить проверку показателей надежности по сравнению с нормативными и выделять отклоняющиеся величины;
- прогнозировать изменение показателей;
- графически интерпретировать результат оценки;
- выводить на экран результаты анализа показателей и решение о степени надежности нефтегазовых объектов.

Таким образом, возникает необходимость в проведении анализа существующих методов обнаружения утечек жидкости из магистральных трубопроводов.

В настоящее время существует большое количество возможных систем классификации методов обнаружения утечек. Наиболее широкое распространение на практике нашла система классификации, подразделяющая системы обнаружения утечек (СОУ) на два вида: основанные на базе процессов, происходящих вне трубопровода (внешние) и в трубопроводе (внутренние).

В целом, внешние методы обнаружения позволяют определять места непосредственного возникновения утечек, а также выявлять утечки с малым расходом более точно, чем внутренние методы. Однако, их применение усложняется необходимостью прокладки кабелей или трубок к существующим трубопроводам. Большинство внешних методов не позволяет определять расход и величину утечек.

По результатам обзора СОУ показано, что в последнее время в области обнаружения утечек из трубопроводов наблюдается тенденция применения

более быстрых и точных датчиков давления, а также применение каналов связи с высокой пропускной способностью, что позволяет фиксировать не только факт повышения (или понижения) давления, но и характер изменения давления, в свою очередь позволяет разрабатывать и внедрять более совершенные методы обнаружения утечек использующие математические модели неустановившихся процессов в трубопроводах.

Для оценки технического уровня и тенденций развития СОУ выполнены патентные исследования.

Объектом поиска являлись методы и реализующие их аппаратно-технические решения. В данной области найдено 83 патента, которые проанализированы с учетом принятой классификации методов определения утечек на «внешние» и «внутренние».

Рассматривая тенденцию изменения количества патентов с течением времени, установлено, что развитие технологий по обнаружению утечек имеет свое начало с внешних методов, поэтому, на текущий момент наработок в этой области, более 60% патентов оформлено по внешним методам, при этом большая часть патентов оформлена на метод на основе распределенного волоконно-оптического датчика (МРВД).

Внутренние методы обнаружения утечек начали активно развиваться и внедряться в производство в начале 2000-х, так как данное время обусловлено завершающим этапом внедрения автоматизированных систем управления на объектах трубопроводного транспорта, а также телемеханизацией линейной части магистральных трубопроводов.

Анализируя количество оформленных патентов по внутренним методам обнаружения утечек, установлено, что большинство патентов оформлено на комбинированные методы обнаружения утечек использующие в своей основе законы механики движения жидкости по трубопроводам.

По результатам патентных исследований показано, что существующие технические решения имеют основные недостатки: высокая стоимость, значительное время идентификации, ложные срабатывания. Перспективным направлением развития методов обнаружения утечек является создание алгоритмов, основанных на результатах анализа динамических возмущений давления.

Рассмотрена теория и методы расчета одномерных, неустановившихся, изотермических течений слабо сжимаемых жидкостей, перекачиваемых по трубопроводам.

Неустановившиеся процессы в магистральных трубопроводах обусловлены различными причинами: технологическими переключениями на линейной части магистрального трубопровода (пуск-остановка насосных агрегатов, открытие-закрытие лупингов, резервных ниток, переход отбора продукта с одной группы резервуаров на другую, открытие-закрытие сбросов на нефтеперерабатывающие заводы, нефтехранилища, АЗС), изменением реологических свойств перекачиваемой жидкости, аварийными ситуациями (утечка жидкости в следствии разрушения стенки трубопровода, хищения нефти и нефтепродуктов) и т.п.

В 1899 г. Н.Е. Жуковский опубликовал работу «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах», где представлено подробное теоретическое исследование вопроса о гидравлическом ударе. В данной работе были описаны различные эксперименты, поставленные на московском водопроводе, которые подтвердили предложенную теорию.

Далее в 1913г. Л. Аллиев, решая упрощенные дифференциальные уравнения, получил зависимости, связывающие давление и скорость движения жидкости в сечениях трубопровода в предыдущий и последующий момент времени.

Исследования Н.Е. Жуковского, Л. Аллиев легли в основу теории нестационарных процессов, происходящих в трубопроводах. В последующем это стало основой, на которой базировались дальнейшие исследования известных ученых: С.А. Чаплыгина, Л.С. Лейбензон, С.А. Христанович, И.А. Чарный, А.А. Сурин, Н.А. Картвелишвили, Ю.Н. Гризодуб, М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфин, С.А. Бобровский, Л.В. Полянская, М.Г. Сухарев, Е.В. Вязунов, Л.Г. Колпаков, В.В. Жолобов, М.В. Лурье, М.В. Лисанов, С.И. Сумской и многих других.

Многие зарубежные ученые также занимались исследованиями нестационарных процессов, наиболее значимые работы были выполнены такими учеными как: А. Anderson, М. Arfaie, R.A. Baltzer, A. Bergant, M.H. Chaudhry, J.A. Fox, A.H. Gibson, C. Jaeger, J.P.Th. Kalkwijk, C. Kranenburg, N.J. Marsden, M. McGarry, G.A. Provoost, A.H. Shapiro, J. Siemons, A.R. Simpson, V.L. Streeter, J.P. Tullis, G.Z. Watters, D.J. Wood, E. B. Wylie.

В 50-х годах прошлого века, в условия отсутствия высокоскоростных вычислительных машин, основным инструментом исследователя были графические методы расчета нестационарных процессов. Такие ученые как Л. Аллиев, А.А. Сурин, Ю.Н. Гризодуб, F.M. Wood, C. Jaeger, Л.М. Бержерон, М.М. Андрияшев, в своих работах широко применяли данный способ вычислений. После развития и распространения ЭВМ исследователи перешли к методам, использующим численные решения дифференциальных уравнений, описывающим нестационарные процессы, происходящие в трубопроводах.

Особо следует выделить работы Л.С. Лейбензона и И.А. Чарного, в которых сформулированы базовые/основные уравнения, использующиеся многими учеными для решения задач, связанных с движением жидкости в трубопроводах.

Вторая глава посвящена решению задачи движения скачка давления по трубопроводу и разработке методики поиска местоположения утечки жидкости в трубопроводе, путем анализа изменения характеристик динамического возмущения.

В процессе работы магистрального нефтепровода существует множество причин, приводящих к нарушению его герметичности. К числу наиболее распространенных причин относятся:

- Внешние механические повреждения трубопровода;

- Попытки хищения нефтепродуктов путем несанкционированного присоединения к трубопроводу отводов;
- Коррозия трубопровода (внутренняя и внешняя);
- Заводские дефекты металла труб и их соединений;
- Ошибки при эксплуатации трубопроводов;
- Стихийные природные явления, вызывающие механическое воздействие на трубопровод (землетрясения, наводнения, оползни и т.п.)

Установлено, что практический интерес представляет разработка методики по определению утечек жидкости с учетом существующей оснащённости трубопроводов. В качестве физической постановки задачи рассмотрен трубопровод длиной L произвольной конфигурации, осуществляющий перекачку жидкости на квазистационарном режиме работы, внутренний диаметр, реологические свойства жидкости, характеристики насосов, механические свойства стенки трубопровода не заданы и плавно изменяются во времени (Рис. 1).

Трубопровод оснащён датчиками давления в точках с координатами $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4$, которые фиксируют изменение давления $P_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$.

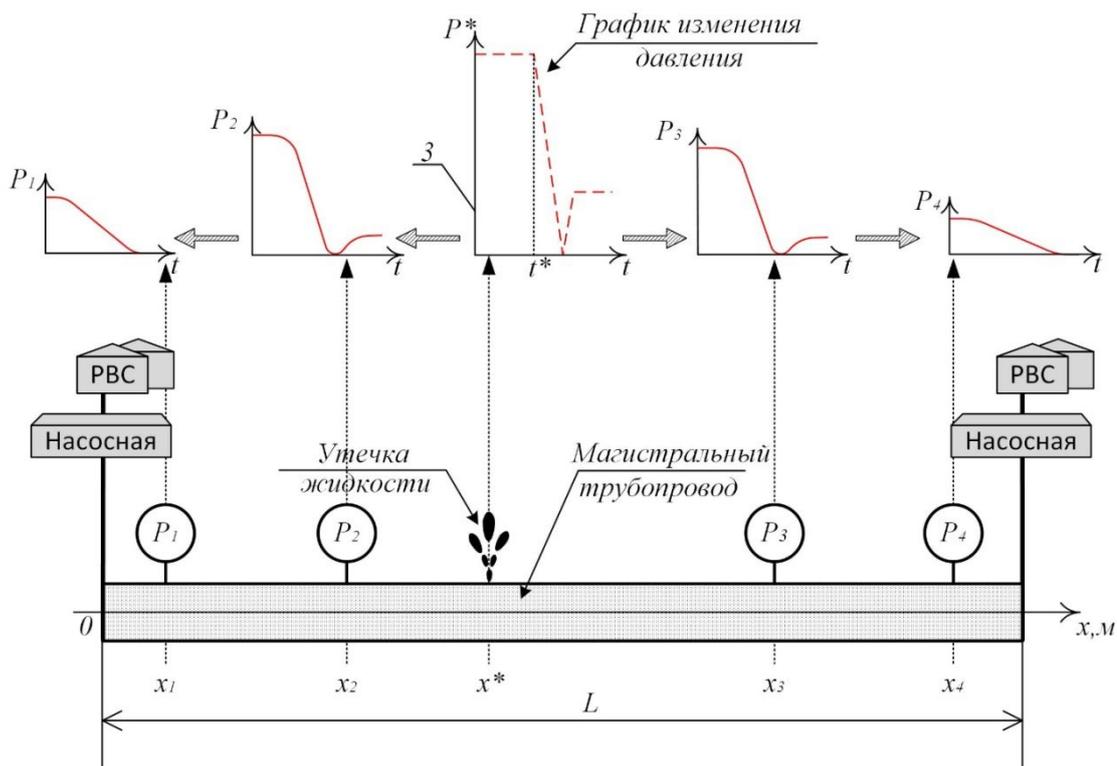


Рис. 1. Схема трубопровода с датчиками давления: Линии гидравлического уклона, соответствующие квазистационарному режиму работы, (1) - до образования утечки, (2) - после образования утечки, (3) - график изменения давления от времени, зафиксированный датчиками измерения давления $P_i(t)$ в момент образования утечки.

Вызывает интерес изменение скачка давления ΔP^* с течением времени на фронте волны динамического возмущения давления. Если мгновенное изменение скорости жидкости в начальный момент времени составляет Δv , то в трубопроводе возникает скачок давления $\Delta P^* = c\rho_0\Delta v$, распространяющийся навстречу невозмущенному течению. Величина ΔP^* скачка давления на фронте волны динамического возмущения давления непрерывно уменьшается. Вследствие действия сил трения частицы жидкости, проходящие через скачок, изменяют свою скорость не сразу на величину Δv , как в начальный момент времени, а все на меньшую величину, так что со временем скачок давления на фронте волны динамического возмущения давления уменьшается по величине и стремится к 0.

Система уравнений, представляющая математическую модель нестационарных процессов, происходящих в трубопроводе, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\lambda(Re, \varepsilon) \frac{1}{D} \frac{\rho_0 v^2}{2} - \rho_0 g \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

P - давление;

t – время;

ρ - плотность;

c – скорость распространения возмущения давления;

v - скорость;

x -координата;

λ - коэффициент гидравлического сопротивления;

Re – параметр Рейнольдса;

ε – эквивалентная шероховатость;

D – диаметр трубопровода;

g – ускорение свободного падения;

α – угол наклона оси трубопровода.

Начальные и краевые условия определяются исходя из имеющейся об объекте технологической информации о давлении и расходе в начале и конце трубопровода, распределение давление по длине трубопровода определяется зависимостью:

$$P_0^* = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x^* - \rho_0 g \Delta z \quad (2)$$

P_0^* - давление в месте нахождения источника возмущения;

P_H ; P_K –давление в начале и конце контролируемого участка трубопровода;

L – длина контролируемого участка трубопровода;

x^* - координата источника возмущения;

Δz – разность геодезических отметок.

Условия сопряжения определяются из характера протекающего процесса. Сечение трубопровода, имеющего утечку, характеризуется непрерывностью давления и разрывом непрерывности расхода и скорости. В следствии резкого изменения скорости потока формируется волна давления в

трубопроводе, объяснение этого явления дал профессор Н.Е. Жуковский который вывел формулу:

$$\Delta P^* = \rho c (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (3)$$

ΔP^* -изменение давления в трубопроводе, в месте образования утечки, амплитуда волны давления;

ϑ_1 -средняя скорость потока в трубопроводе до места возникновения утечки;

ϑ_2 -средняя скорость потока в трубопроводе после места возникновения утечки.

Решая систему дифференциальных уравнений в частных производных (1) с учетом начальных и краевых условий (2-3) методом «характеристик» и приняв $\gamma = \frac{\lambda v}{4cD}$ получим:

$$\Delta P(x) = \Delta P^* e^{-\gamma|x-x^*|}, \quad (4)$$

где γ - коэффициент затухания волны давления в реальной жидкости; $|x - x^*|$ - расстояние, пройденное волной давления от места утечки с координатой x^* .

Таким образом, используя зависимость (4) возможно решить задачу по определению местоположения утечки жидкости при известном $\Delta P(x)$.

Исследуем полученную функцию применительно к условиям задачи, для чего построим график функции (4) (Рис. 2), на котором имеется точка излома с координатами $(x^*; \Delta P^*)$, соответствующая месту возникновения утечки, причем $\Delta P^* \geq \Delta P(x)$ на интервале $x^* \in [0; L]$, что позволит однозначно идентифицировать местоположение утечки жидкости или местоположение иного другого возмущения давления в жидкости.

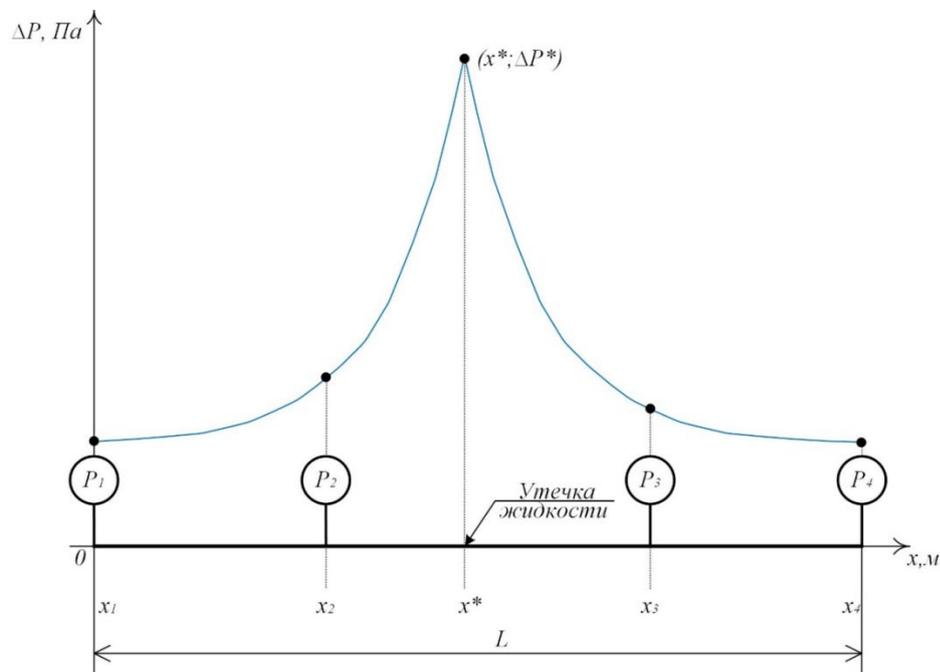


Рис. 2. График функции $\Delta P(x) = \Delta P^* e^{-\gamma|x-x^*|}$ для трубопровода.

Путем преобразования (4) получена зависимость по определению координаты места возмущения давления

$$x^* = x \pm \frac{\ln \frac{\Delta P(x)}{\Delta P^*}}{\gamma}, \quad x^* \in [0; L], \quad \Delta P^* \geq \Delta P(x), \quad (5)$$

при этом значение γ и $\Delta P(x)$ при решении практических задач возможно определить по показаниям датчиков давления.

Основной сложностью рассматриваемого случая является определение параметра ΔP^* , значение которого не задано, так как неизвестны ни геометрические параметры отверстия, через которое истекает жидкость, ни сопротивление (проницаемость) окружающей трубопровод среды.

Получена зависимость, позволяющая при известном γ и показаниях не менее двух датчиков давления P_1 и P_2 , расположенных по краям контролируемого участка, при $x_1 < x_2$, определить координату источника возмущения:

$$x^* = 0,5 \left(x_1 + x_2 - \frac{\ln \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}}{\gamma} \right) \quad (6)$$

Для случая неизвестного значения параметра γ найдено решение, использующее показания трех датчиков давления, два из которых расположены по краям участка.

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_1 - x^*)} \\ \Delta P_2 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_2 - x^*)} \\ \Delta P_3 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_3 - x^*)} \end{cases} \quad (7)$$

На первом этапе определяется взаимное расположение набора датчиков давления и возможного места утечки для этого определяются значения γ_{12} и γ_{23} по формулам

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= \frac{\ln \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right)}{x_1 - x_2} \\ \gamma_{23} &= \frac{\ln(\Delta P_3 / \Delta P_2)}{x_2 - x_3} \end{aligned} \quad (8)$$

В случае равенства полученных значений $|\gamma_{12}| = |\gamma_{23}|$ все три датчика давления находятся с одной стороны от места утечки, и определить ее местоположение невозможно. Можно только сказать, что место утечки находится справа ($\gamma_{12} > 0$) или слева ($\gamma_{12} < 0$) от набора используемых датчиков давления. Если $\gamma_{12} \neq \gamma_{23}$, то место утечки находится либо между датчиками 1 и 2, либо между датчиками 2 и 3. Определяется две возможные координаты места утечки

$$\begin{aligned} x_{12}^* &= \frac{1}{2} \left[x_1 + x_3 + \frac{\ln \left(\frac{\Delta p_3}{\Delta p_1} \right)}{\gamma_{12}} \right], \\ x_{23}^* &= \frac{1}{2} \left[x_1 + x_3 + \frac{\ln(\Delta p_3 / \Delta p_1)}{\gamma_{23}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

В том случае, если вычисленное значение x_{12}^* лежит в интервале $[x_2, x_3]$, то координата точки утечки $x^* = x_{12}^*$, а коэффициент затухания $\gamma =$

$|\gamma_{12}|$. В противном случае, x_{23}^* будет принадлежать интервалу $[x_1, x_2]$ и следует положить $x^* = x_{23}^*$ и $\gamma = |\gamma_{23}|$.

Полностью блок-схема алгоритма определения местоположения утечки при использовании показаний трех датчиков давления приведена на Рис. 3.

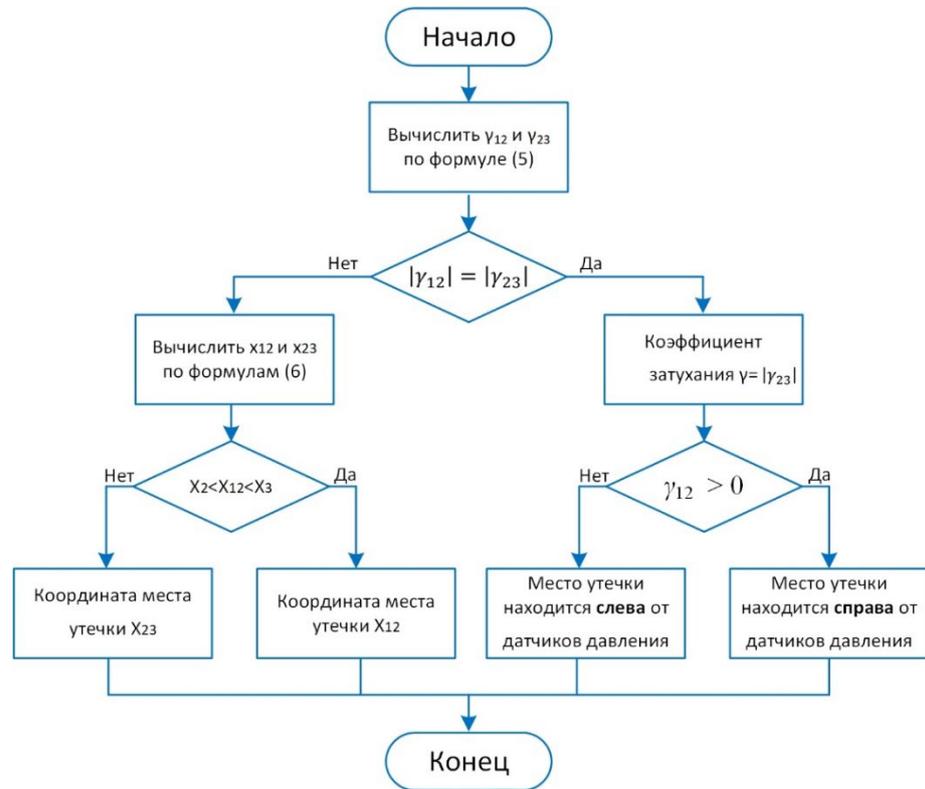


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения местоположения утечки с помощью трех датчиков давления.

Выполнена проверка разработанной методики путем сопоставления с результатами прямого численного моделирования работы трубопровода с утечкой жидкости в программном комплексе (ПК) Cassandra.

Утечка жидкости задавалась путем резкого открытия линий различных диаметров. Полученные в результате моделирования графики изменения давления, которое зафиксировали датчики давления, представлены на Рис. 4.

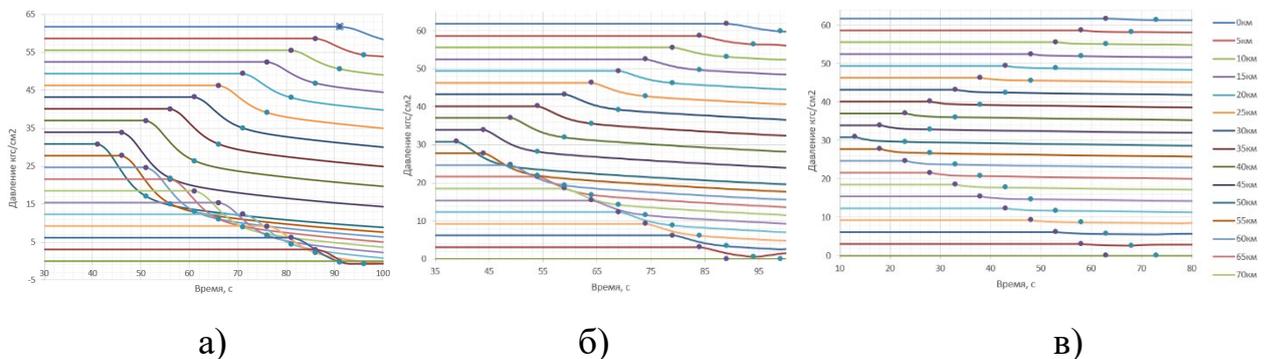


Рис. 4. Динамика изменения давления в модельном трубопроводе при утечке через заданное отверстие различного диаметра: а - $d=150\text{мм}$, б - $d=100\text{мм}$, в - $d=50\text{мм}$)

На основании полученных данных сформирована поверхность образованная множеством линий гидравлических уклонов построенным по показаниям датчиков давления во время движения волны пониженного давления от места утечки, изображенная на Рис. 5. Данное представление множества линий гидравлического уклона предложено для наглядного отображения процесса зарождения и распространения волн давления без использования отдельных промежуточных «кадров» движения волны, что позволит наблюдать картину движения возмущения целостно.

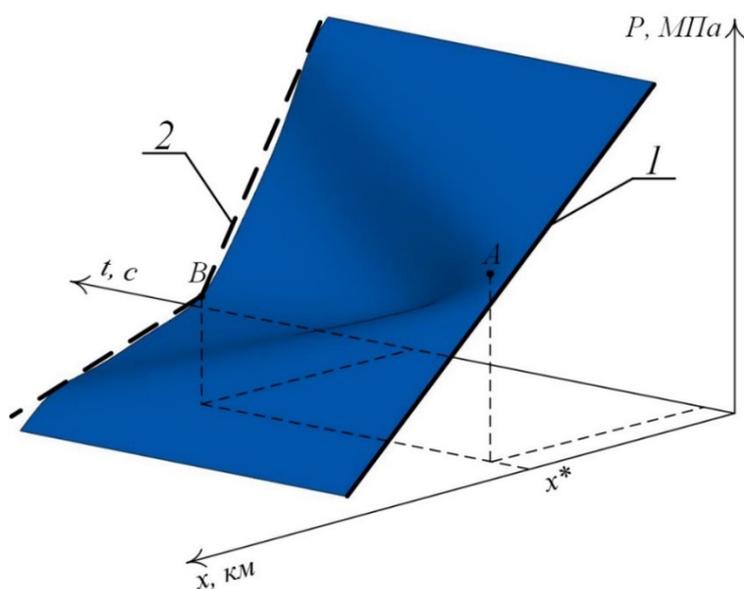


Рис. 5. Поверхность, образованная множеством линий гидравлического уклона

Произведено опробование методики на данных математической модели магистрального трубопровода с утечками жидкости различной интенсивности: 9%, 45%, 80% от номинальной производительности трубопровода. Установлено, что относительная погрешность определения координаты места утечки по предложенной методике составляет менее 1%. Показано, что при увеличении количества средств измерений давления, погрешность определения местоположения источника возмущения снижается с 0,62% до 0,39% при увеличении числа датчиков от 3 до 8, соответственно.

В третьей главе для проверки и подтверждения предложенного метода по определению координаты места возникновения утечек жидкости, было произведено опробование на данных, полученных на экспериментальной лабораторной установке ООО «НИИ Транснефть». Стенд предназначен для моделирования следующих технологических операций и явлений, возникающих при эксплуатации магистрального трубопровода:

- Самотечный участок (с возможностью изменения профиля трубопровода);
- Последовательная перекачка нефтепродуктов;

- Утечки и исследование методов их обнаружения;
- Гидравлический удар в трубопроводе;
- Течения многофазных жидкостей;
- Процесс вытеснения нефти/нефтепродукта инертным газом;
- Процесс накопления воды в низких точках профиля при перекачке нефти/нефтепродуктов;
- Вынос воды при различных углах наклона трубы;
- Вынос газа при различных углах наклона трубы;
- Последовательное и параллельное соединение насосных агрегатов.

В составе размещенного в одном помещении стенда предусмотрено несколько блоков, изображенных на Рис. 6, каждый из которых предназначен для определенной цели:

1) Блок с изменяемой геометрией (БИГ) — для моделирования процессов самотечного течения жидкости, вытеснения жидкости сжатым воздухом или инертным газом, а также выноса газа при различных углах наклона трубопровода;

2) Блок накопления и выноса воды (БНВВ) — для исследования процессов накопления и выноса воды при различных углах наклона трубопровода;

3) Блок нестационарных процессов (БНП) — для моделирования утечек жидкости из трубопровода и исследования методов их обнаружения, моделирования и исследования движения волн давления по трубопроводам (гидравлического удара);

4) Блок четырех насосных агрегатов (БЧНА) — для моделирования режимов работы трубопровода с различными вариантами подключения насосных агрегатов;

5) Блок последовательной перекачки (БПП) — для исследования процессов смесеобразования при последовательной перекачке различных жидкостей, в том числе и процессов дополнительного смесеобразования при остановке последовательной перекачки и влияния тупиковых отводов;

6) Блок емкостей (БЕ) — для приема, хранения и отпуска модельных жидкостей.

7) Межблочное оборудование предназначено для обеспечения работы систем блоков.

Блок для исследования нестационарных процессов (Рис. 7) представляет собой конструктивно заверченный, отдельно стоящий исследовательский модуль.

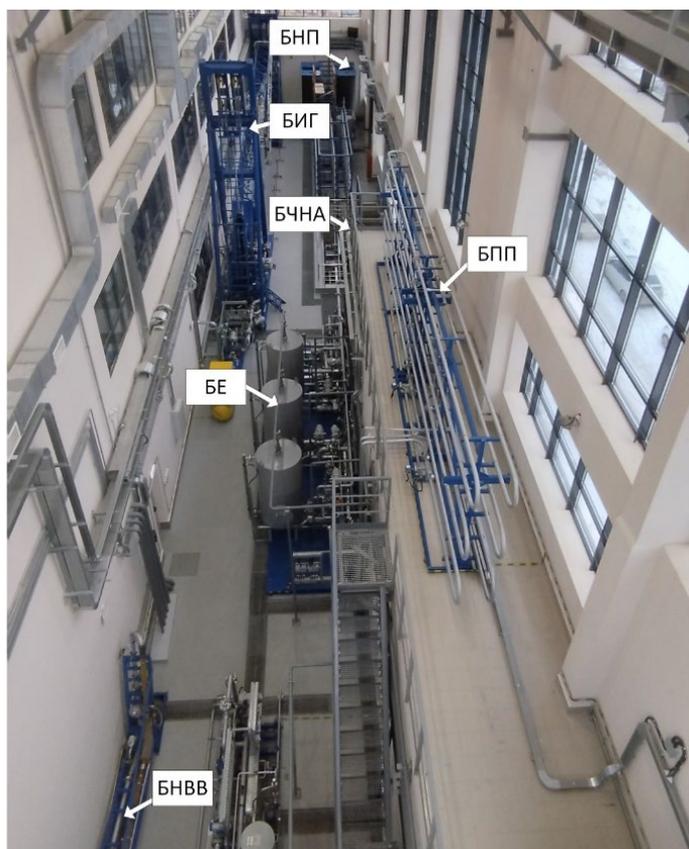


Рис. 6. Общий вид стенда ООО «НИИ Транснефть» (БНП — блок нестационарных процессов; БИГ — блок с изменяемой геометрией; БЧНА — блок четырех насосных агрегатов; БПП — блок последовательной перекачки; БЕ — блок емкостей; БНВВ — блок накопления и выноса воды.)



Рис. 7. Общий вид блока нестационарных процессов (501 — емкость 1 000 л; Н1 — циркуляционный центробежный насос; РР1 — регулятор расхода; ИС — исследовательская секция, длиной 1 139 м; РТГ1, РТГ2, РТГ5 — преобразователи давления; РР1, РР2 — преобразователи расхода; ПМ1 — массовый расходомер; ЭМ1 — электромагнитный клапан.)

Для выполнения исследований была собрана конфигурация блока, моделирующая работу трубопровода с одной утечкой жидкости, технологическая схема представлена на Рис. 8.

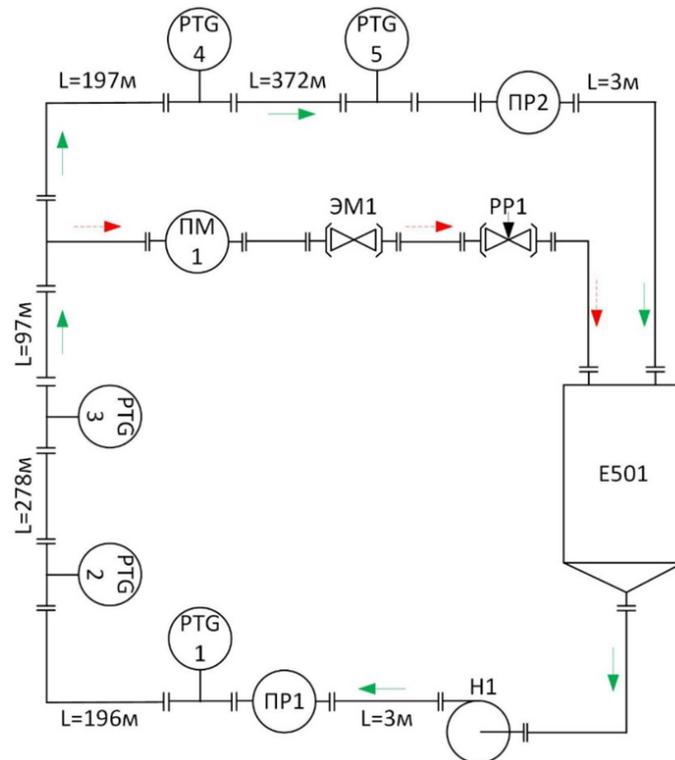


Рис. 8. Технологическая схема лабораторной установки.

В результате проведенного эксперимента получены графики изменения давления (Рис. 9), на которых наблюдается характерный для утечки жидкости фронт волны пониженного давления.

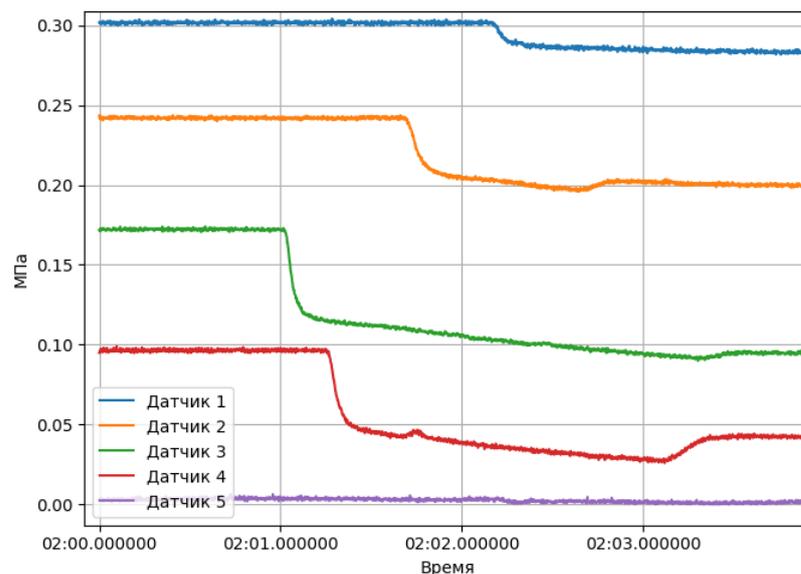


Рис. 9. Результаты измерения давления для возмущения с амплитудой давления в месте возмущений $\Delta P^* = 0,12$ МПа

На Рис. 10 точками показаны амплитуды возмущения давления, зафиксированные датчиками для различных интенсивностей утечки в трех сериях испытаний по шесть повторений. Точки большего размера соответствуют среднему арифметическому значению.

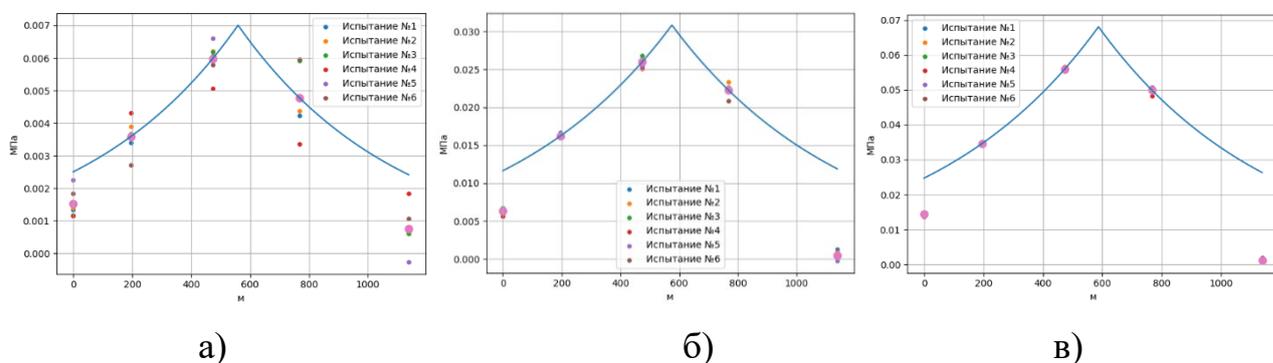


Рис. 10. Результаты трех серий испытаний. Амплитуда волны: а — 0,01 МПа; б — 0,04 МПа; в — 0,12 МПа

По полученным данным составлена и решена система уравнений (7), получена функция, описывающая изменение скачка давления. График данной функции изображен на Рис. 10 сплошной линией, точка перелома данной функции — место возникновения возмущения. График полученной функции удовлетворительно описывает экспериментальные точки, за исключением точек, принадлежащих датчикам давления, которые расположены на концах трубопровода РТГ1 и РТГ5. Это связано с интерференцией волны давления, что накладывает ограничения на применение предлагаемого метода.

Таким образом, полученными в данной главе результатами экспериментальных исследований подтверждено, что фронт волны давления распространяется в обе стороны трубопровода от места возникновения возмущения, интенсивность которого убывает и несущественно зависит от направления течения жидкости.

Установлено, что ближайший датчик давления к источнику возмущения всегда первым фиксирует возмущение с максимальной амплитудой.

Подтверждена работоспособность предложенной методики по определению координаты местоположения источника возмущения, погрешность определения координаты возмущения не превысила 1,5%.

Установлено, что точность определения координаты источника возмущения зависит от значения амплитуды волны давления и чувствительности средств измерения.

Полученные экспериментальные данные показали возможность построения системы диагностики состояния трубопровода по анализу структуры динамического возмущения.

В четвертой главе на основе предложенной методики разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс

обработки информации, поступающей с датчиков давления с предварительной их обработкой.

Реализованное приложение, обладает следующим функционалом (Рис. 11):

- Загрузка и вывод исходных данных в формате .csv;
- Предобработка исходных данных;
- Обработка зашумленного сигнала с помощью взвешенного скользящего среднего;
- Возможность изменять параметры расчетов;
- Вывод промежуточных результатов;
- Построение графиков исходного зашумленного сигнала;
- Построение графиков обработанного сглаженного сигнала;
- Построение графика производных на каждом датчике давления;
- Вызов справки;
- Вывод результата – километра, на котором произошла утечка.

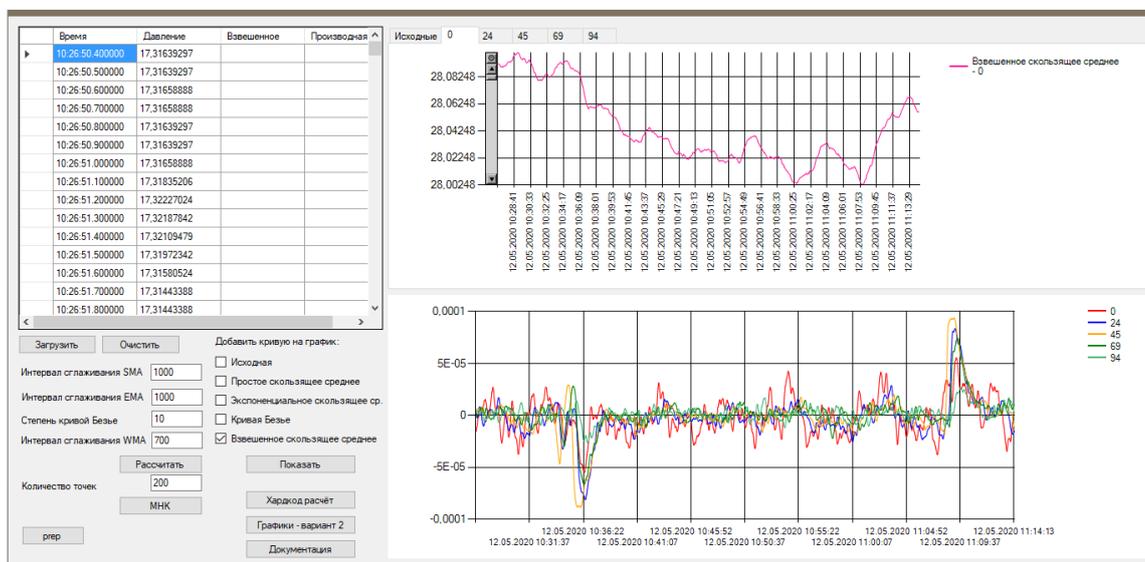


Рис. 11. Основной интерфейс программного обеспечения

Опробование программного обеспечения выполнено на трубопроводе «Воскресенск — Прибой». Утечка задавалась на 45-м км с интенсивностью 1,8% от номинальной производительности трубопровода.

В результате промышленного эксперимента, утечка определена в точке 44,4 км, относительная погрешность составила - 1,3%, что соответствует действующим нормам проектирования систем обнаружения утечек.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Проведен обзор имеющихся технических решений и выявлено, что существующие технические решения имеют следующие основные недостатки: высокая стоимость, значительное время идентификации, ложные срабатывания. Установлено, что перспективным направлением развития методов обнаружения утечек является создание алгоритмов, основанных на

результатах структурно-волнового анализа динамических возмущений давления.

2. На основе математической модели, описывающей нестационарные процессы в трубопроводе, получена зависимость изменения амплитуды скачка давления от пройденного расстояния. Разработана методика определения координаты источника возмущения в магистральном трубопроводе по данным, получаемым с датчиков давления.

3. Путем прямого численного моделирования изучаемого процесса в ПК Cassandra показана работоспособность предложенного способа. Установлено, что при увеличении количества средств измерений давления, погрешность определения местоположения источника возмущения снижается с 0,62% до 0,39% при увеличении числа датчиков от 3 до 8, соответственно.

4. Реализована экспериментальная установка длиной 1139 м по исследованию нестационарных процессов течения жидкости. Проведено моделирование работы трубопровода с утечками различной интенсивности. Установлено, что точность определения координаты источника возмущения зависит от значения амплитуды волны давления и чувствительности средств измерения. Определена область применения предлагаемой методики.

5. Разработано программное обеспечение, произведено опробование методики на действующем промышленном объекте, погрешность определения координаты утечки жидкости составила 1,3%, что соответствует действующим нормам проектирования систем обнаружения утечек.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах:

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Уликанов Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Анализ фронта волны давления для определения местоположения утечки жидкости в трубопроводе // Вестник Башкирского университета. 2023. Т.28, №1. С. 4-9.

2. Уликанов Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Моделирование процесса распространения возмущения в трубопроводе, вызванного утечкой перекачиваемой жидкости // Процессы в геосредах. 2023. №3. С. 2089-2094.

3. Уликанов Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Экспериментальное исследование динамических возмущений давления в цилиндрических трубах, заполненных жидкостью // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т.10, №1. С.88-103.

Статьи в научных изданиях, входящих в РИНЦ:

4. Уликанов Р.Р., Пшенин В.В., Садыкова А.Р. К вопросу обнаружения утечек в неизотермических трубопроводах, работающих с периодическими

остановками // Научно-технические технологии в решении проблем нефтегазового комплекса: материалы VIII Международной научной конференции, Уфа, 10-14 декабря 2018г. Ч. 1. / отв. редактор К. Ш. Ямалетдинова. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. – С. 295-296.

5. Уликанов Р.Р., Черных А.Д. Способ определения утечек жидкости в трубопроводах // Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче: материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 24-27 августа 2023 г.

6. Уликанов Р.Р., Ижбулдин Т.А. Повышение точности и чувствительности системы обнаружения утечек за счет применения WAVELET – преобразований // Трубопроводный транспорт – 2023: материалы XVIII Международной научно-практической конференции, Уфа 16-17 ноября 2023 г.

7. Уликанов Р.Р., Ижбулдин Т.А. Оптимизация трафика технологической информации магистральных трубопроводов за счет применения алгоритма Хаффмана // материалы XII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в ТЭК проблемы и решения 21-24 мая 2024 г.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Уликанов Р.Р., Воронов А.Г., Амерханов А.А., Симонов И.С., Чионов А.М., Аминев А.Н., Мазгаров А.Н., Петренко С.В. Стационарный RTTM (real-time transient model) модуль СОУ // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019619909.

2. Гладких А.М., Воронов А.Г., Амерханов А.А., Симонов И.С., Чионов А.М., Аминев А.Н., Самусенко А.М., Уликанов Р.Р. Модуль принятия решений СОУ // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019660026.

3. Гладких А.М., Воронов А.Г., Амерханов А.А., Симонов И.С., Чионов А.М., Аминев А.Н., Самусенко А.М., Уликанов Р.Р., Мухамадиев Р.Р., Мазгаров А.Н., Петренко С.В., Дыкало А.А., Бенидовский И.А., Писковацкий Н.В., Кремьянский И.С. Программный модуль системы обнаружения утечек // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020611777.

4. Мухамадиев Р.Р., Воронов А.Г., Амерханов А.А., Симонов И.С., Чионов А.М., Мазгаров А.Н., Петренко С.В., Уликанов Р.Р. Модуль контроля баланса нефти СОУ // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019619809.

Патенты:

1. Патент № 2395748 Российская Федерация, МПК F16L 55/00, F16L 55/128, F16L 55/18. Устройство для перекрытия трубопровода: № 2006108424/06: заявл. 17.03.2006: опубл. 27.07.2010 / Р.Р.Уликанов; заявитель Р.Р.Уликанов. – 4с.; ил.