

На правах рукописи



ШЕСТАКОВ РОМАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ
НЕФТЕПРОВОДОВ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз
и хранилищ» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Научный руководитель: **Поляков Вадим Алексеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Китаев Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», профессор
кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»

Зверев Федор Сергеевич
кандидат технических наук,
ООО «НИИ Транснефть», заведующий
лабораторией химических реагентов

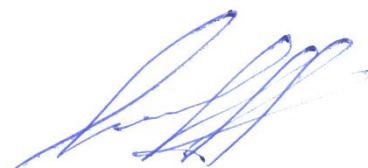
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ухтинский государственный
технический университет»

Защита состоится «26» сентября 2019 г. В 16:00 часов в ауд. 502 на заседании диссертационного совета Д 212.200.06 при ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» по адресу г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, к. 1, 119991.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина». Объявление о защите диссертации и автореферат размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» <https://www.gubkin.ru/> и направлены на размещение в сети Интернет Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по адресу <http://vak3.ed.gov.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Леонович
Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из важных аспектов нефтегазовой отрасли нашей страны является транспортировка нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. Магистральные трубопроводы относятся к стратегически важным объектам, а сам процесс транспортировки нефти и нефтепродуктов является важной составной частью промышленной, экономической, экологической и национальной безопасности.

Одной из основных угроз для состояния защищенности и бесперебойной работы нефтепроводов являются утечки нефти из магистральных трубопроводов, а также несанкционированные врезки, поэтому компании, эксплуатирующие трубопроводы, прилагают немало усилий для обеспечения их безопасной эксплуатации. Значительные средства расходуются на охрану трубопроводов, текущее обслуживание, диагностику и ремонт. Поэтому для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта и защиты от несанкционированных врезок необходимо совершенствование и разработка новых систем непрерывного дистанционного контроля технического состояния трубопроводов с функциями обнаружения и локализации утечек.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время проблематикой обнаружения и локализации утечек и несанкционированных врезок (УНВ) занимается большое число ученых как в нашей стране, так и во всем мире. Каждый из существующих методов обнаружения утечек обладает своей спецификой, достоинствами и недостатками. Проблематике обнаружения утечек посвящены работы многих известных ученых и специалистов, а именно В.Н. Антипьева, А.В. Бабкова, Е.В. Вязунова, В.Б. Галеева, А.К. Галлямова, А.А. Гольянова, А.Г. Гумерова, А.С. Джарджиманова, Л.А. Дымшица, К.А. Забелы, Ф.С. Зверева, Ю.Д. Земенкова, Л.Б. Кублановского, С.Е. Кутукова, Б.М. Лапшина, Л.С. Лейбензона, М.В. Лурье, Т.Е. Мамоновой, В.Е. Попадько, В.А. Саенко, Р.Н. Столярова, И.А. Чарного, К.В. Черняева, А.С. Шумайлова, Gerhard

Geiger и др.

На текущий момент разработано большое количество методов обнаружения утечек, работающих по различным принципам. Анализ показал, что каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, но нет ни одного универсального метода, который отвечал бы современным требованиям.

Цели и задачи работы

Целью работы является разработка методики параметрической диагностики утечек и несанкционированных врезок при стационарном режиме перекачки как на нефте- и нефтепродуктопроводах постоянного внутреннего диаметра, так и переменного.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ нормативных документов и исследований в области обнаружения и локализации УНВ – определение условий эксплуатации, неконтролируемых действующей системой обнаружения утечек (СОУ) и предлагаемыми в литературе методами.

2. Разработка методики обнаружения УНВ – разработка методики решения трех задач: определения факта, координаты и расхода УНВ, расширяющей контролируемую область эксплуатации по сравнению с действующей СОУ.

3. Опытно-экспериментальное подтверждение разработанной методики – разработка методики проведения опытнo-экспериментальной оценки полученных теоретических результатов.

4. Разработка рекомендаций к практическому применению – разработка предложений по совершенствованию нормативной базы в области СОУ и создание вычислительного инструментария для численной реализации разработанных методик.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы представляет собой комплекс из последовательности решенных задач:

1. Математически доказано, что:

- разработанные на текущий момент методы обнаружения УНВ являются частными постановками общей задачи обнаружения УНВ;
- для расширения области контроля необходимо расширить постановку задачи определения факта, координаты и расхода УНВ;
- расширение постановки задачи требует расширения набора контролируемых параметров – параметров режима перекачки и трубопровода.

Возникает необходимость расширения параметрических методов обнаружения УНВ. Выбран набор параметров для дальнейшего исследования – параметры режима перекачки и трубопровода.

2. На основе математического решения и анализа функциональной взаимосвязи между исследуемыми параметрами разработаны методики решения задач определения факта, координаты и расхода УНВ:

– методика обнаружения УНВ на трубопроводе постоянного внутреннего диаметра, оснащенного пунктами замера давления на линейной части, позволяющая обнаружить и локализовать УНВ с расходом, не фиксируемым приборами замера расхода на концах участка,

$$\{D_{\text{вн}} = \text{const}\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}; \quad (1)$$

– методика обнаружения УНВ на трубопроводах переменного внутреннего диаметра, на котором отсутствуют пункты замера давления на линейной части (раскладка труб по толщине стенки, различный сортамент и уменьшение толщины стенки в процессе эксплуатации),

$$\{D_{\text{вн}} \neq \text{const}\} \cup \{Q_o \text{ фиксируется}\} \cup \{\text{нет КИП по } P\}; \quad (2)$$

– методика обнаружения УНВ на трубопроводах переменного внутреннего диаметра, оснащенных пунктами замера давления на линейной части,

$$\{D_{\text{вн}} \neq \text{const}\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}. \quad (3)$$

3. Разработана методика опытно-экспериментальной оценки теоретических результатов.

4. Разработаны рекомендации к практическому применению авторских методик и вычислительный инструментарий для их численной реализации.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены условия эксплуатации, неконтролируемые современными методами СОУ – определены направления совершенствования параметрических методов обнаружения и локализации УНВ на трубопроводах переменного внутреннего диаметра для различных по расходу УНВ.

2. Разработана методика обнаружения и локализации УНВ, расширяющая область контроля и представляющая собой комплекс из трех самостоятельных методик в соответствии с (1)÷(3). Выведены теоретические формулы для локализации УНВ и алгоритмы определения расхода в УНВ по каждой методике.

3. Разработана методика проведения опытно-экспериментального подтверждения полученных теоретических результатов (апробирована в АО «Черномортранснефть»).

4. Руководство к практическому применению разработанных методик обнаружения УНВ. Программный комплекс для технологических расчетов нефтепроводных систем, в котором реализованы математические алгоритмы разработанных методик обнаружения и локализации УНВ.

Методология и методы исследования

Методология заключается в использовании комплекса, состоящего из теоретического исследования, численной реализации полученных теоретических решений и экспериментального исследования.

Применялся комплексный подход, который включает в себя анализ и обобщение современной теории и опыта в области обнаружения и локализации утечек и несанкционированных врезок, опытно-экспериментальные исследования, численные методы, методы математического моделирования, законы гидромеханики, а также принципы объектно-ориентированного

программирования. Обработка опытно-экспериментальных данных проводилась при помощи программно-вычислительного комплекса, разработанного автором.

Положения, выносимые на защиту

В процессе проведения исследований получены следующие результаты:

1. Постановка исследовательской задачи – технология определения набора параметров и диапазонов их изменения, необходимых для совершенствования параметрических методов обнаружения УНВ.
2. Комплексная методика обнаружения УНВ, состоящая из трех самостоятельных методик для условий (1)÷(3).
3. Методика проведения опытно-экспериментальной оценки теоретических исследований на основе фактических данных эксплуатации действующего МН и подтверждение результатов теоретических исследований на основе данной методики.
4. Руководство к практическому применению разработанных методик обнаружения УНВ в условиях (1)÷(3). Программный комплекс для технологических расчетов нефтепроводных систем, в котором реализованы математические алгоритмы разработанных методик обнаружения и локализации УНВ.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность полученных результатов обоснована и подтверждена использованием научных методов исследований и математического аппарата обработки полученных результатов, а также опытно-экспериментальным подтверждением.

Основные материалы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: XIV научно-техническая конференция молодежи ОАО «Черномортранснефть» 2013, г. Новороссийск, 2013; VII Международная научно-практическая конференция молодых ученых «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ТЕХНИКИ 2014», г. Уфа, 2014; VII Международная научно-практическая конференция «Надежность и безопасность магистрального

трубопроводного транспорта», г. Новополоцк, Республика Беларусь, 2014; Конференция: Научно-техническая конференция молодежи ОАО «ГИПРОТРУБОПРОВОД», г. Москва, 2014; IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕФТЬ И ГАЗ - АТР 2015», г. Владивосток, 2015; V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Экологические проблемы нефтедобычи», г. Уфа, 2015; VIII Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники», г. Уфа, 2015; XIII Международная учебно-научно-практическая конференция «ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ – 2018», г. Уфа, 2018.

Публикации

По тематике диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, двух приложений и списка литературы, включающего 165 наименований. Работа изложена на 155 страницах, содержит 44 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследований, обозначена научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ нормативных и представленных в литературе методов обнаружения и локализации УНВ, который выявил множество используемых методов решения задачи УНВ, основанных на различных принципах и использующих измерения различных параметров.

Для определения области эксплуатации, неконтролируемой действующими нормами и предложенными в литературе методами, была разработана авторская поэтапная классификация существующих методов.

Первый этап. Классификация по принципу решения задачи обнаружения

УНВ – волновые методы, методы, основанные на измерении параметров режима штатными измерительными приборами, пропуск специальных внутритрубных снарядов, внешние методы контроля, волоконно-оптические методы, исследованиями в области которых проводили В.Н. Антипьев, А.В. Бабков, Е.В. Вязунов, А.К. Галлямов, А.А. Гольянов, Л.А. Дымшиц, Ф.С. Зверев, Ю.Д. Земенков, С.Е. Кутуков, Б.М. Лапшин, М.В. Лурье, Т.Е. Мамонова, Р.З. Нагаев, В.Е. Попадько, Р.Н. Столяров, А.С. Шумайлов и др.

Второй этап. Необходимо разделить существующие методы по степени влияния на режим перекачки – методы, требующие полной остановки перекачки на контролируемом участке, требующие понижения режима перекачки и не влияющие на режим перекачки. На основе чего были выбраны для исследования параметрические методы обнаружения УНВ, которым посвящены работы В.Н. Антипьев, А.А. Гольянова, А.Г. Гумерова, Ф.С. Зверева, Ю.Д. Земенкова, М.В. Лурье, Т.Е. Мамоновой, А.С. Шумайлова.

Третий этап. Классификация параметрических методов обнаружения УНВ по измеряемым параметрам – давлению, расходу на концах трубопровода и давлению по длине трубопровода.

Выполненная классификация определила направления дальнейшего исследования – цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе решается первая задача диссертационной работы – определение условий эксплуатации, неконтролируемых параметрическими методами СОУ и предлагаемыми в литературе.

Основой решения является математическое исследование общей задачи отвода из основной нитки части транспортируемого потока по присоединенному ответвлению с целью определения общего количества постановок задачи обнаружения УНВ на нефте- и нефтепродуктопроводах постоянного внутреннего диаметра и профиля (рисунок 1).

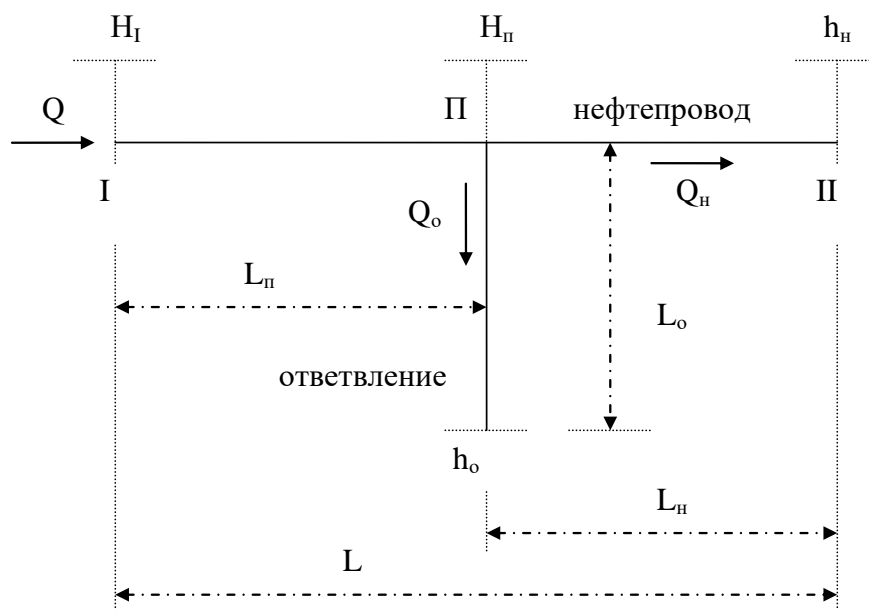


Рисунок 1 – Трубопроводная система с ответвлением для отвода части транспортируемой нефти от основного нефтепровода

Решение задачи в общей постановке требует задания (варьирования) 8 переменных с последующим определением 5 остальных из решения системы уравнений. То есть, общее число возможных постановок задачи отвода части транспортируемого продукта по присоединенному ответвлению (в том числе проектирование ответвления) равно

$$C_{13}^8 = \frac{13!}{8! \cdot (13 - 8)!} = 1287.$$

Из определенного ранее числа постановок общей задачи расчета ответвления необходимо выделить общую задачу обнаружения УНВ путем определения задаваемых и искомых параметров:

известными и постоянными являются 4 параметра

$$\{Q, H_I, L, D_{\text{вн}}\} = \{Q\} \cup \{H_I\} \cup \{L\} \cup \{D_{\text{вн}}\}, \quad (4)$$

переменными – 9 параметров

$$\{Q_o, Q_H\} \cup \{H_{II}, h_o, h_H\} \cup \{L_o, L_{II}, L_H\} \cup \{D_{\text{вн}}\}. \quad (5)$$

Таким образом, значения 4 переменных из набора (5) необходимо задать, а 5 переменных определить из решения системы уравнений. Следовательно, общее число постановок задачи (4)÷(5)

$$C_9^4 = \frac{9!}{4! \cdot (9 - 4)!} = \frac{9!}{4! \cdot 5!} = 126.$$

Кроме этого, для повышения эффективности параметрических методов обнаружения УНВ при фактических условиях эксплуатации необходимо расширить первичный вариант общей задачи наличием на исследуемом нефтепроводе вставки отличного от основной нитки диаметра.

Присутствие одной вставки диаметра $D_{\text{вн вс}}$ увеличивает число возможных схем нефтепроводной системы с присоединенным ответвлением (рисунок 2) и, следовательно, число уравнений и переменных по сравнению первоначальной задачей (рисунок 1). Число уравнений баланса напоров увеличивается до пяти – три уравнения на участке с ответвлением и два уравнения на участках без ответвления.

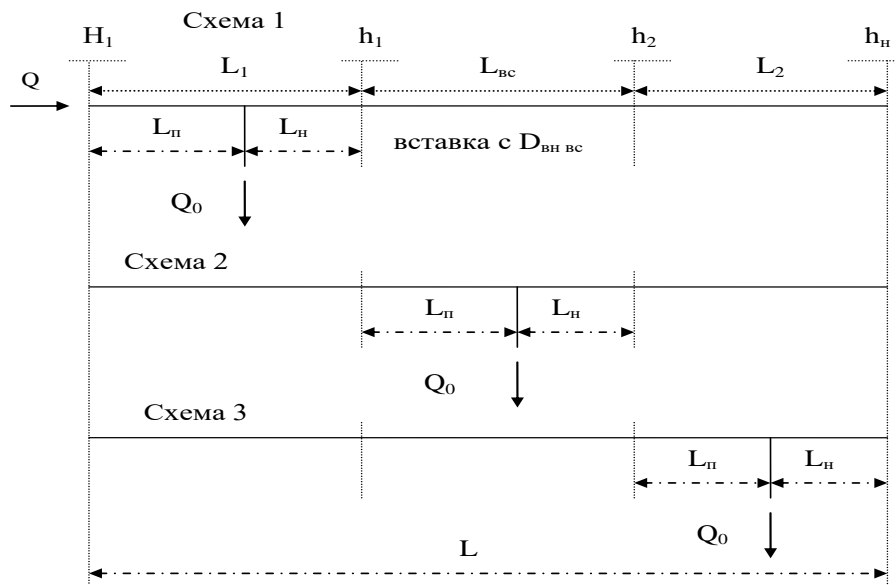


Рисунок 2 – Варианты схемы трубопроводной системы с ответвлением

В общей задаче формализуется системой 8 уравнений с 19 переменными. Следовательно, решение задачи требует задания (варьирования) 11 переменных с последующим определением 8 остальных из решения системы уравнений. В связи с этим, общее число возможных постановок задачи при наличии вставки на основной нитке нефтепровода равно

$$C_{19}^{11} = \frac{19!}{11! \cdot (19 - 11)!} = 75582.$$

Наличие вставки на основной нитке нефтепровода принципиально (в 58,7 раза) увеличивает число постановок общей задачи расчета режима перекачки при

отводе части нефти из нефтепровода по сравнению с первоначальной задачей (рисунок 1).

Из определенного ранее числа постановок общей задачи расчета ответвления необходимо выделить общую задачу обнаружения УНВ путем определения задаваемых и искомых параметров. Таким образом, значения семи переменных являются задаваемыми (варьируемыми) и 8 определяются из решения системы уравнений. Общее число постановок задачи равно

$$C_{15}^7 = \frac{15!}{7! \cdot (15 - 7)!} = 6435.$$

Следовательно, наличие вставки на основной нитке МН увеличивает число постановок задачи расчета режима перекачки при несанкционированных отборах транспортируемого продукта по сравнению с первоначальной задачей в 51 раз.

Для осуществления работы параметрических методов обнаружения УНВ используют замеры технологических параметров – давления и расхода на заданном участке трубопровода. Поэтому принципиальным аспектом совершенствования решения задачи УНВ является определение диапазонов изменения контролируемых параметров – давления и расхода.

Анализа нормативной базы показал, что метрологические характеристики контрольно-измерительных приборов (КИП) имеют следующие пределы диапазонов изменения погрешности измеряемых параметров – порядок точности измерительной аппаратуры –

$$\left\{ \frac{Q_o}{Q} \leq 0,01 \right\} \cup \{ \Delta P \leq 0,002 \text{ [МПа]} \} \cup \left\{ \frac{\Delta P}{P} \leq 0,001 \right\}. \quad (6)$$

Следовательно, для обнаружения малой УНВ

$$\frac{Q_o}{Q} \leq 0,01 \quad (7)$$

необходимо использовать не только значения давлений на концах, но и по длине контролируемого участка. Поэтому рассматриваем методы, удовлетворяющие условию (7). При этом условии неприменимы методы, основанные на измерении расхода – метод сравнения расходов, метод линейного баланса, метод сравнения скорости изменения расходов.

На основании исследований постановок общей задачи УНВ и диапазонов изменения контролируемых параметров выявлены постановки задач для параметрических методов обнаружения УНВ:

$$\{D = const\} \cup \{Q_o \text{ фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}; \quad (8)$$

$$\{D = const\} \cup \{Q_o \text{ фиксируется}\} \cup \{\text{нет КИП по } P\}; \quad (9)$$

$$\{D = const\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}; \quad (10)$$

$$\{D = const\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{нет КИП по } P\}; \quad (11)$$

$$\{D \neq const\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}; \quad (12)$$

$$\{D \neq const\} \cup \{Q_o \text{ не фиксируется}\} \cup \{\text{нет КИП по } P\}; \quad (13)$$

$$\{D \neq const\} \cup \{Q_o \text{ фиксируется}\} \cup \{\text{наличие КИП по } P\}; \quad (14)$$

$$\{D \neq const\} \cup \{Q_o \text{ фиксируется}\} \cup \{\text{нет КИП по } P\}. \quad (15)$$

Из сформулированных условий эксплуатации можно сделать выводы:

1. обнаружение УНВ в условиях (8), (9) может быть осуществлено методом гидравлической локации;
2. на текущий момент не существует параметрического решения задачи обнаружения УНВ в условия эксплуатации (10)–(15) и, следовательно, необходима разработка параметрических методик обнаружения УНВ в данных условиях.

В третьей главе решается вторая задача диссертационной работы – разработка методики решения трех задач обнаружения УНВ: определения факта, координаты и расхода УНВ, расширяющей контролируемую область эксплуатации по сравнению с действующей СОУ.

В данной главе представлена разработанная комплексная методика обнаружения и локализации УНВ, состоящая из трех самостоятельных методик.

Первая методика разработана для обнаружения УНВ в условиях эксплуатации (10) и состоит из трех алгоритмов:

1. Алгоритм определения факта УНВ.

В случае (7) возникает необходимость определения УНВ с расходом, величина которого не превышает погрешности измерения установленных на НПС расходомеров. Поэтому для обеспечения решения поставленной задачи строится моделируемая линия гидравлического уклона (ЛГУ) и вычисляются моделируемые

давления на контрольном пункте (КП). Сравняется с фактическим давлением на КП. Отличие моделируемого значения давления на КП от фактического на величину 0,002 [МПа] и более свидетельствует о присутствии на участке УНВ при стационарном режиме работы трубопровода.

2. Алгоритм определения координаты УНВ.

В случае отличия на 0,002 [МПа] и больше данный КП выбирается i -ым, $(i+1)$ -ым – следующий за ним по длине МН, $(i-1)$ -ым – предыдущий первому. По значениям полного напора на i -ом КП и в конечном сечении МН строится ЛГУ фактическая. После чего вычисляется пересечение моделируемой и фактической ЛГУ, но не в пределах $(i-1)$ -ого и i -ого КП, а в пределах всего МН от начала и до i -ого КП. Это связано с тем, что утечка малая и поэтому необязательно, что она приведет к требуемому по точности изменению давления на ближайшем КП.

Была выведена формула, необходимость которой обусловлена учетом технологических особенностей эксплуатации в условиях (10), для расчета координаты местоположения УНВ по данной методики:

$$X_{\text{УНВ}} = \frac{H_{\text{н}} \cdot L \cdot (L - X_i) + (H_{f,\text{к}} \cdot X_i - H_{f,i} \cdot L) \cdot L}{(L - X_i) \cdot (H_{\text{н}} - H_{s,\text{к}}) - L \cdot (H_{f,i} - H_{f,\text{к}})}, \quad (16)$$

где $H_{\text{н}}, H_{s,\text{к}}$ – полные напоры в начальном и конечном сечениях контролируемого участка МН, используемые для построения моделируемой ЛГУ, [м]; $H_{f,i}, H_{f,\text{к}}$ – фактические полные напоры на i -ом КП (рассогласование моделируемого и фактического давлений превысило заданное значение) и в конечном сечении трубопровода, [м]; X_i – координата i -го КП, [м]; L – длина контролируемого участка МН, [м].

3. Алгоритм определения расхода в УНВ.

Для вычисления предполагаемого расхода УНВ требуются координата и значение полного напора в месте УНВ, поэтому расход УНВ производится последним этапом.

По известной разнице фактического и моделируемого давления в конечном сечении МН можно определить расход УНВ. Для этого нам требуется не весь МН,

а только участок от УНВ и до конечного сечения. Принципиальная схема расчета расхода в конечном сечении трубопровода:

$$\begin{aligned} H_{f,i} - H_{f,k} = \Delta H = f(Q_k) &\rightarrow \\ \rightarrow Q_k = f^{-1}(\Delta H) = f^{-1}(H_{f,i} - H_{f,k}). \end{aligned} \quad (17)$$

Определение расхода в УНВ:

$$Q_o = Q - Q_k. \quad (18)$$

Реальные трубопроводы, особенно некоторое время уже эксплуатируемые, имеют переменный внутренний диаметр, что обусловлено изменением толщины стенки (согласно раскладке труб по толщине стенки или в ходе эксплуатации). Поэтому была разработана методика, позволяющая обнаружить и локализовать УНВ в данных условиях эксплуатации (14) и (15).

Вторая методика разработана для обнаружения УНВ в условиях (14) и (15).

В данной методике фиксация факта утечки происходит по рассогласованию расхода в начале и конце участка нефтепровода. Особенность методики заключается в расширении числа варьируемых параметров – учете переменного внутреннего диаметра нефтепровода. Данная методика реализуема без значений давлений, замеренных на линейных КП.

Для реализации данной методики необходимо измерять параметры режима в начальном и конечном сечении МН

$$(P_n, P_k, Q_n, Q_k), \quad (19)$$

где P_n – давление в начальном сечении нефтепровода, [Па]; P_k – давление в конечном сечении нефтепровода, [Па]; Q_n – расход в начальном сечении нефтепровода, [$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$]; Q_k – расход в конечном сечении нефтепровода, [$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$].

Вторая методика состоит из следующих алгоритмов:

1. Алгоритм определения факта УНВ на контролируемом участке.

Факт определяется по рассогласованию расходов на конце участка МН:

$$Q_n - Q_k \geq 0,01 \cdot Q_n. \quad (20)$$

2. Алгоритм определения координаты УНВ.

Зная параметры режима на концах контролируемого участка (19), а также параметры труб и транспортируемого продукта, можем провести расчет двух режимов. Первый – начальный режим, с параметрами которого продукт отходит из начального сечения, второй – конечный, с параметрами которого продукт приходит в конечное сечение. Место, в котором полные напоры данных двух ЛГУ равны, и будет местоположением УНВ.

Данная методика является расширением метода гидравлической локации (МГЛ), но МГЛ не применим для трубопроводов с вставками и загрязнениями внутренней полости трубы, которые приводят к сужению внутреннего сечения нефтепровода.

По причине расширения области варьируемых параметров, возникла необходимость вывода формулы расчета координаты местоположения УНВ на телескопическом нефтепроводе:

$$X_{\text{УНВ}} = X_{j-1} + \frac{X_j \cdot (H_{j-1}^{\text{H}} - H_{j-1}^{\text{K}}) - X_{j-1} \cdot (H_j^{\text{H}} - H_j^{\text{K}})}{(H_{j-1}^{\text{H}} - H_j^{\text{H}}) - (H_{j-1}^{\text{K}} - H_j^{\text{K}})}, \quad (21)$$

где X_{j-1} – координата начала секции, на которой обнаружена УНВ, [м]; X_j – координата конца секции, на которой обнаружена УНВ, [м]; H_{j-1}^{H} – полный напор, рассчитанный по параметрам режима перекачки начального сечения контролируемого участка, в начальном сечении секции с УНВ, [м]; H_j^{H} – полный напор, рассчитанный по параметрам режима перекачки начального сечения контролируемого участка, в конечном сечении секции с УНВ, [м]; H_{j-1}^{K} – полный напор, рассчитанный по параметрам режима перекачки конечного сечения контролируемого участка, в начальном сечении секции с УНВ, [м]; H_j^{K} – полный напор, рассчитанный по параметрам режима перекачки конечного сечения контролируемого участка, в конечном сечении секции с УНВ, [м].

3. Определение расхода в УНВ осуществляется по разности показаний расходомеров в начальном и конечном сечении, что обусловлено использованием значений расходов в начальном и конечном сечении для построения линий гидравлического уклона:

$$Q_o = Q_n - Q_k. \quad (22)$$

Третья методика разработана для обнаружения УНВ в условиях (12).

Предлагаемая методика базируется на показаниях давления с линейных задвижек, оборудованных манометрами, на показаниях КИП перекачивающих станций, а также моделировании движения потока жидкости в сложном трубопроводе.

Третья методика состоит из трех алгоритмов:

1. Алгоритм определения факта присутствия УНВ.

Строится моделируемая ЛГУ с учетом вставок различных внутренних диаметров и вычисляются моделируемые давления на КП, которые сравниваются с фактическими давлениями на КП. В случае отличия давлений на КП на величину 0,002 [МПа] данный КП определяется как КП, зафиксировавший изменение давления.

2. Алгоритм определения расхода УНВ.

Поиск нового расхода (расхода в конечном сечении) производится по потерям напора на участке от КП, зафиксировавшего изменение давления и до конечного сечения МН. Принципиальная схема расчета расхода в УНВ аналогична первой методике и производится согласно (17). Определение расхода в УНВ производится по алгоритму (18).

3. Алгоритм определения координаты УНВ.

Строится ЛГУ с учетом вставок и перемены толщины стенки МН по начальному и конечному расходам на участке от начала МН и до КП, зафиксировавшего изменение давления больше чем на 0,002 [МПа]. Пересечение ЛГУ, построенных по начальному и конечному расходам, и будет координатой местоположения УНВ.

Данная методика применима как при расходе УНВ в пределах точности расходомеров на НПС, так и при выходе значений расхода УНВ за пределы точности измерения КИП. Координата местоположения УНВ вычисляется по формуле (21).

Таким образом были разработаны параметрические методики обнаружения и локализации УНВ для условий эксплуатации (10), (12), (14) и (15), в условиях (11) и (13) требуется использование дополнительного оборудования.

В четвертой главе проводится опытно-экспериментальная проверка итоговой, комплексной методики – методики параметрической локализации УНВ в условиях (12).

Методика проведения эксперимента является логическим следствием полученных ранее результатов (продолжение технологии обнаружения УНВ), а именно сформулированных трех методик.

Для проведения эксперимента необходимо знать условия эксплуатации: профиль трассы трубопровода, параметры трубопровода, параметры режима перекачки, наличие линейных средств замера давления на контролируемом участке трубопровода.

В качестве заданных параметров будут использоваться: внешний диаметр, толщины стенок, абсолютная шероховатость стенок. Измеряемыми параметрами являются значения давлений и расходов на концах контролируемого участка, значения давлений на линейных задвижках по длине трубопровода. Для замера контролируемых параметров будут применяться штатные измерительные приборы давления и расхода.

Расположение датчиков давления на линейной части будет обусловлено только расположением линейных задвижек, т.е. установки дополнительного, нештатного оборудования не потребуется. Порядок точности КИП, используемых для измерения контролируемых параметров, должен соответствовать условиям (б).

Теоретическое определение факта и места утечек будет определяться согласно соответствующим условиям эксплуатации и разработанной методике. Определение факта и координаты УНВ проводилось предприятием путем внутритрубной дефектоскопии выбранного участка трубопровода.

Данные для проведения опытно-экспериментальной проверки были предоставлены АО «Черномортранснефть». Расчеты проводились в авторском программном комплексе.

Для проведения расчета экспериментального подтверждения методики параметрической локализации УНВ на телескопических трубопроводах при условиях (12) были предоставлены следующие данные:

1. профиль участка МН;
2. сортамент МН и раскладка труб по толщине стенки МН;
3. параметры транспортируемой нефти – вязкость и плотность на момент фиксации УНВ;
4. показания давления на КП;
5. параметры режима работы МН при УНВ – значения расхода и давления на концах участка МН.

На рисунке 3 (1 – профиль трассы трубопровода, 2 – ЛГУ, 3 – максимально допустимый напор) показано окно результатов работы программного комплекса по обнаружению УНВ, в котором реализована разработанная методика.

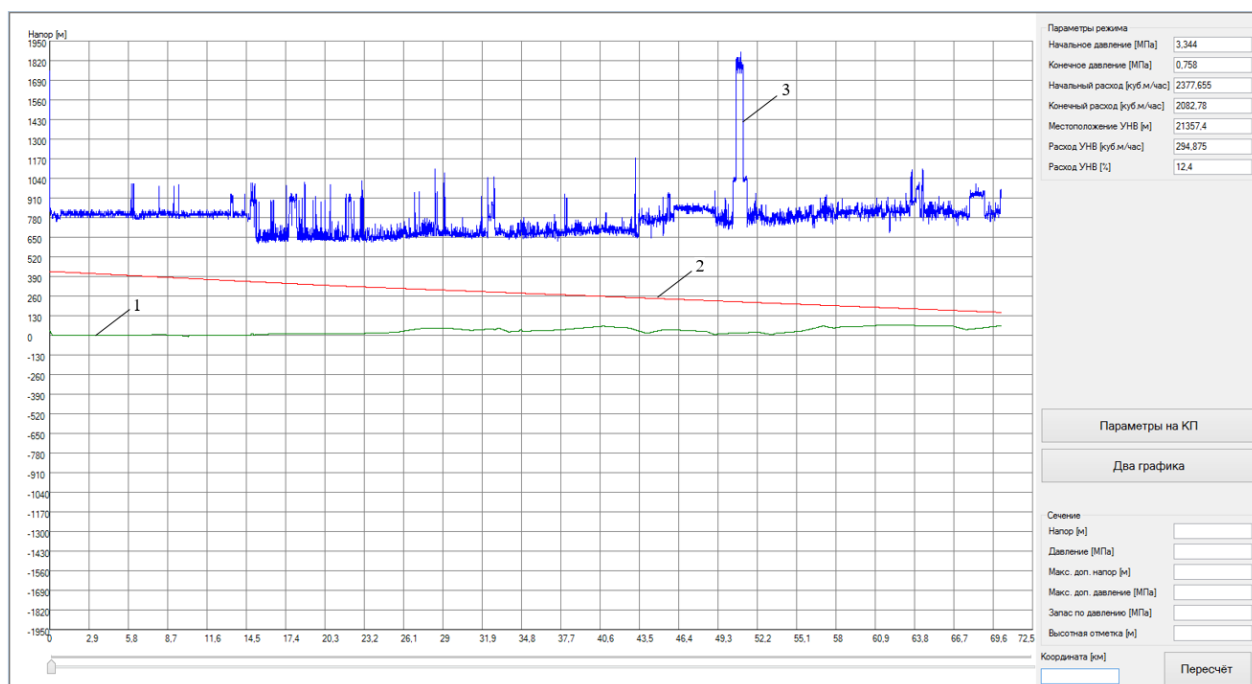


Рисунок 3 – Окно результатов расчета экспериментальных данных в авторском программном комплексе

Согласно результатам расчета местоположение УНВ X_p составило 21357,4 [м], расход в УНВ – 294,88 [м³ · ч⁻¹], что составило 12,4 [%] от расхода в экспериментальном участке МН.

Из параметров УНВ была представлена фактическая координата местоположения УНВ X_{ϕ} , равная 18800 [м]. Из чего следует, что абсолютная ошибка в данном эксперименте составляет

$$\Delta X = |X_{\phi} - X_p| = |18800 - 21357,4| = 2557,4 \text{ [м]}. \quad (23)$$

Относительная ошибка составила

$$\Delta X = \frac{|X_{\phi} - X_p|}{L} \cdot 100 = \frac{|18800 - 21357,4|}{70200} \cdot 100 = 3,64 \text{ [%]}. \quad (24)$$

Результаты опытно-экспериментального подтверждения позволяют сделать следующие выводы:

1. разработана методика экспериментального исследования теоретических результатов;
2. погрешность локализации УНВ в ходе эксперимента составила 3,64 [%], что не выходит за допустимые рамки;
3. экспериментально подтверждена точность полученных ранее теоретических результатов исследований.

В пятой главе проводится разработка рекомендации по практическому использованию предлагаемых методик обнаружения УНВ, авторский программный комплекс, а также показана область применения данных методик.

Методика параметрической локализации УНВ применима для трубопроводов произвольного профиля постоянного внутреннего диаметра, на линейной части которых находятся контрольные пункты замера давления, например, линейные задвижки, оборудованные средствами измерения давления. Данная методика применима при транспортировке по трубопроводам одного продукта – нефть, нефтепродукт, вода. Предлагаемая методика также реализована в авторском программном комплексе, окно результатов представлено на рисунке 4. Расположение линий на рисунке 4 и их назначение аналогично рисунку 3.

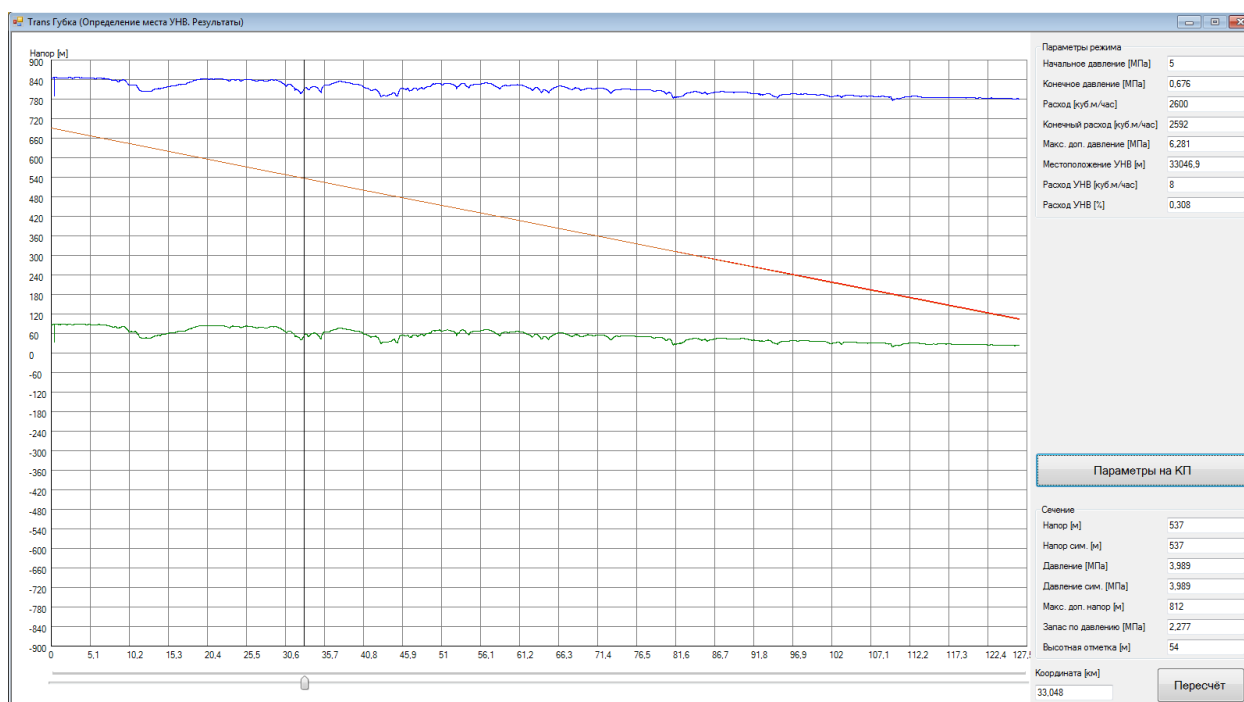


Рисунок 4 – Окно результатов расчета по методике параметрической локализации УНВ в программном комплексе

Методика обнаружения УНВ на телескопических трубопроводах применима для трубопроводов произвольного профиля как постоянного внутреннего диаметра, так и переменного. В случае постоянного внутреннего диаметра данная методика вырождается в МГЛ. Также должно присутствовать рассогласование расходов в начальном и конечном сечении трубопровода, что не позволяет обнаруживать УНВ с расходом меньшим диапазона погрешности. По данному трубопроводу может перекачиваться нефть, нефтепродукт, вода. Предлагаемая методика реализована в авторском программном комплексе. Окно результатов представлено на рисунке 5. Расположение линий на рисунке 5 и их назначение аналогично рисунку 3.

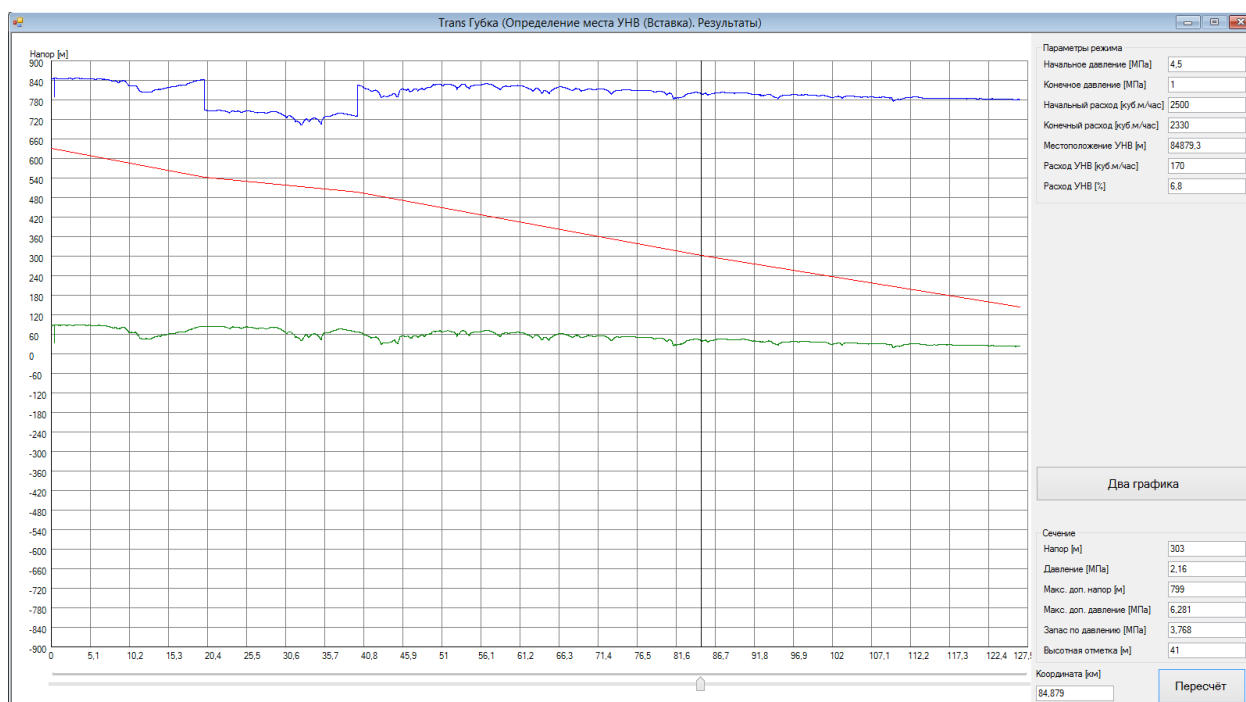


Рисунок 5 – Окно результатов расчета по методике обнаружения УНВ на телескопических трубопроводах в программном комплексе

Методика параметрической локализации УНВ на телескопических трубопроводах применима для трубопроводов произвольного профиля переменного внутреннего диаметра, на линейной части которых находятся контрольные пункты замера давления, например, линейные задвижки, оборудованные средствами измерения давления. Данная методика применима при транспортировке по трубопроводам одного продукта – нефть, нефтепродукт, вода. Предлагаемая методика также реализована в авторском программном комплексе. Окно результатов представлено на рисунке 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа существующих методов обнаружения УНВ была предложена классификация данных методов по степени влияния на режим работы нефтепровода. Предлагается их классифицировать на методы, не требующие понижения объемов перекачки, требующие понижения объемов перекачки, и на методы, которые требуют полной остановки перекачки по трубопроводу.

2. Разработанные на текущий момент методы обнаружения и локализации УНВ являются частными общей постановки задачи обнаружения и локализации СОУ. Для нефтепровода постоянного внутреннего диаметра общее число постановок задачи – 126, а для нефтепровода непостоянного внутреннего диаметра с переменным рельефом – 6435.

3. Разработаны методики обнаружения УНВ, расширяющие параметрические методы СОУ:

- методика параметрической локализации УНВ, условия (1);
- методика обнаружения УНВ на телескопическом трубопроводах, условия (2);
- методика параметрической локализации УНВ на телескопических трубопроводах, условия (3).

4. Результаты опытно-экспериментальной оценки теоретических исследований на основании реальных данных эксплуатации АО «Черномортранснефть». Приведенная ошибка локализации УНВ составила 3,64 [%].

5. Практический результат работы – рекомендации к практическому применению разработанных методик, а также программный комплекс для технологических задач проектирования, эксплуатации и экспертной оценки проектных решений нефтепроводных систем, в котором реализованы разработанные методики обнаружения УНВ.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Поляков, В.А. Влияние ответвления на режим перекачки нефти по трубопроводу / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2014. – № 2. – С.33-42.

2. Поляков, В.А. Влияние геодезических параметров нефтепровода и вставок на режим перекачки при отборе нефти / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2014. – № 3. – С.40-47.

3. Шестаков, Р.А. К вопросу о методах обнаружения утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах / Р.А. Шестаков // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 1. – С.85-94.

4. Глущенко, Н.В. Организационно-правовые и технические аспекты обнаружения утечек нефти в магистральных нефтепроводах / Н.В. Глущенко, Р.А. Шестаков, Д.Н. Комаров, М.И. Ибрагимов, А.А. Шестаков // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С.34-39.

5. Шестаков, Р.А. Анализ волоконно-оптических методов обнаружения утечек в трубопроводах / Р.А. Шестаков, Л.К. Ганеева, Л.К. Ганеева // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 2. – С.56-64.

6. Шестаков, Р.А. Отбор нефти из магистрального нефтепровода как частная задача параметрической диагностики. Постановка задачи / Р.А. Шестаков // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 2. – С.55-59.

7. Шестаков, Р.А. Анализ нормативных методов обнаружения утечек и пути их совершенствования / Р.А. Шестаков, Д.Н. Комаров, С.А. Филиппов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 3. – С.47-50.

8. Поляков, В.А. Влияние ответвления и наличия вставок на режим перекачки нефти по трубопроводу / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 3. – С.78-88.

9. Поляков, В.А. К вопросу обеспечения точности измерений системы обнаружения утечек в нефтепроводе / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Наука и

технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4. – С.76-79.

10. Шестаков, Р.А. Метод параметрической локализации утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах сложной конструкции/ Р.А. Шестаков // Промышленный сервис. – 2016. – № 1. – С.19-23.

11. Поляков, В.А. Расширение параметрических методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 3. – С.57-59.

12. Поляков, В.А. Опытное-экспериментальное подтверждение метода параметрической локализации утечек и несанкционированных врезок на телескопических трубопроводах / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков // Промышленный сервис. – 2016. – № 2. – С.6-9.

13. Шестаков, Р.А. К вопросу о системах мониторинга целостности трубопроводов на основе волоконно-оптических датчиков / Р.А. Шестаков, Л.К. Ганеева, Д.Н. Комаров, Д.А. Яцкевич, Н.П. Чупракова // Промышленный сервис. – 2016. – № 2. – С.31-34.

14. Поляков, В.А. Комплексная параметрическая методика обнаружения утечек и несанкционированных врезок на трубопроводах / В.А. Поляков, Р.А. Шестаков, Д.Н. Комаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2018. – № 1. – С.40-42.

15. Шестаков, Р.А. Комплексные исследования в области параметрических методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок / Р.А. Шестаков, Д.Н. Комаров, Л.Р. Хасанова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2018. – № 3. – С.28-33.