

На правах рукописи



**СЕОЕВ ЛАЗАРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**МОНИТОРИНГ УТЕЧЕК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МОБИЛЬНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов».

Научный руководитель: **Земенкова Мария Юрьевна**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет».

Официальные оппоненты: **Валеев Анвар Рашитович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»;

**Шестаков Роман Алексеевич**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой инженерной инфраструктуры объектов  
капитального строительства ФГБОУ ВО  
«Калининградский государственный технический  
университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный  
технический университет», г. Ухта.

Защита состоится «04» июня 2026 года в 13 часов 00 минут  
на заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу:  
625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском  
комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и  
на сайте [www.tyuiu.ru](http://www.tyuiu.ru).

Автореферат разослан «27» апреля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Пономарева Татьяна Георгиевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Согласно Энергетической стратегии России до 2050 г. (№ 908-р), в числе приоритетных задач обозначено развитие топливо-энергетического комплекса страны и обеспечение эффективной системы транспортирования нефти и нефтепродуктов (НП), разработка специализированного программного обеспечения для расчета трубопроводных систем. Кроме того, в соответствии с поручением Президента России В.В. Путина от 15 февраля 2025 г. (№ Пр-285) одной из актуальных задач системы нефтепродуктообеспечения страны является совершенствование методов планирования и осуществления мероприятий, направленных на предупреждение и ликвидацию разливов нефти и НП, а также привлечение дополнительных сил и средств для этих целей.

Современная система магистральных нефтепродуктопроводов (МНПП) включает мобильные сборно-разборные трубопроводы (МСРТ), которые предназначены для временной перекачки нефти, светлых НП и жидкого углеводородного сырья. МСРТ обычно используются для заполнения и опорожнения МНПП при проведении плановых ремонтных работ, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли. С использованием МСРТ возможно развертывание в сжатые сроки модульных трубопроводных сетей для перекачки НП в различных климатических и инженерно-геологических условиях. Важнейшим требованием, определяющим эффективность использования МСРТ, является количественная сохранность НП при транспортировании.

Опыт использования МСРТ в качестве временных нефтепродуктопроводов и при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций показал, что значительное количество потерь НП возникает в результате нарушения герметичности МСРТ. В этих условиях особую актуальность приобретает задача своевременного обнаружения утечек НП на основе мониторинга основных гидродинамических показателей и режима работы трубопровода.

## **Степень разработанности темы исследования**

Решению научных задач и разработке методов обнаружения утечек НП на сборно-разборных и магистральных нефтепродуктопроводах посвящены работы М.В. Лурье, П.И. Тугунова, В.Ф. Новоселова, Н.А. Гаррис, Б.Н. Мастобаева, Г.Е. Коробкова, А.М. Короленка, Р.А. Алиева, А.А. Коршака, Г.Г. Васильева, В.В. Середы, Ю.Д. Земенкова, Д.А. Дроздова, Д.У. Думболова, М.Ю. Земенковой, В.А. Полякова, И.Г. Данильченко, Н.Х. Абдрахманова, Ю.Н. Безбородова, В.Д. Белоусова, А.Д. Прохорова, А.С. Дидковской, Н.Н. Голунова, А.Р. Валеева, А.П. Белкина, А.М. Сиренко, Л.С. Лейбензона, Я.Ю. Блиновской, С.В. Маценко, А.М. Шаммазова, Р.А. Шестакова, Р.Р. Ташбулатова, Т.Е. Степанченко, В.Н. Антипьева, В.В. Миронова, Р.Е. Kreider, J. Zhang и др.

Исследования и научно-технические разработки проводились в АО «ВНИИСТ», ООО «НИИ Транснефть», АО «НПП «Тори», ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», ФГАОУ ВО «ТИУ», ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны РФ», ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Вопросы обнаружения утечек НП на магистральных трубопроводах нефтегазового комплекса достаточно полно изучены и опубликованы в открытой печати. Однако, для условий транспорта НП по МСРТ с раструбным соединением, остаются малоизученными вопросы определения местоположения и расхода утечек НП в период квазистационарного режима работы насосных станций (НС) в специфических условиях их эксплуатации.

**Цель работы** – разработка системы оперативного мониторинга основных гидродинамических показателей эксплуатации мобильных сборно-разборных трубопроводов для своевременного обнаружения местоположения и определения объема утечек нефтепродуктов.

### **Задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель гидравлического состояния МСРТ в период квазистационарного режима работы НС при нарушении герметичности линейной части трубопровода.

2. Определить количественные значения показателей, характеризующих режим течения нефтепродуктов в МСРТ с раструбным соединением.

3. Установить зависимость координаты местоположения утечки нефтепродукта на МСРТ от специфических условий эксплуатации при нарушении герметичности участка между НС.

4. Разработать критерий нарушения герметичности и установить его граничные значения для МСРТ с учетом показателей, характеризующих расход утечки и эквивалентную площадь повреждения трубопровода.

5. Разработать программное обеспечение для оперативного мониторинга основных гидродинамических показателей МСРТ.

**Объект исследования** – МСРТ номинальным диаметром от 100 до 150 мм.

**Предмет исследования** – нестационарные режимы течения нефтепродуктов при нарушении герметичности МСРТ.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы: системный анализ, математическое и имитационное моделирование, классические положения гидродинамики потока жидкости в трубопроводах и процессов истечения, методы планирования и обработки результатов многофакторных экспериментальных исследований, статистические методы обработки измерений на основе корреляционного и регрессионного анализа.

**Научная новизна результатов работы:**

1. Разработана математическая модель гидравлического состояния МСРТ диаметром от 100 до 150 мм в период квазистационарного режима работы НС при нарушении герметичности линейной части трубопровода с учетом изменения основных гидродинамических показателей режима работы МСРТ с различной угловой подвижностью раструбного соединения.

2. Экспериментально определены значения феноменологических коэффициентов ( $A = 0,16$ ;  $m = 0,18$ ) в обобщенной формуле Л.С. Лейбензона для оценки гидравлических уклонов и сопротивлений участков МСРТ с раструбным соединением.

3. Получена аналитическая зависимость координаты местоположения утечки нефтепродукта на МСРТ от эквивалентного расхода, термодинамических условий эксплуатации, степени изменения гидравлических уклонов на разгерметизированном участке.

4. Обоснован критерий нарушения герметичности МСРТ и определены его граничные значения с учетом расхода утечки нефтепродукта и эквивалентной площади повреждения трубопровода.

5. Разработан комплекс гидродинамических показателей мониторинга и анализа режима работы МСРТ для оперативного определения местоположения и расхода утечек с учетом физических свойств нефтепродуктов и особенностей характеристик типовых средств перекачки.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Динамика основных гидродинамических показателей режима эксплуатации трубопровода при наличии утечки характеризуется математической моделью квазистационарного режима работы НС и МСРТ.

2. Значения безразмерных коэффициентов  $A$  и  $m$ , характеризующих режим течения и область гидравлического трения, являются определяющими точности расчета местоположения и объемов утечек НП при нарушении герметичности МСРТ.

3. Отношение гидравлических уклонов на участках трубопровода до и после места разгерметизации характеризует динамику квазистационарного режима МСРТ.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработан критерий нарушения герметичности МСРТ, характеризующий динамику гидравлического режима потока, и определены его граничные значения с учетом расхода утечки нефтепродукта и эквивалентной площади повреждения трубопровода.

2. Получена аналитическая зависимость координаты местоположения утечки нефтепродукта от комплекса гидродинамических показателей режимов работы разгерметизированного МСРТ. Определены значения

феноменологических коэффициентов ( $A = 0,16$ ;  $m = 0,18$ ) в уравнении степенного закона гидравлического сопротивления, характеризующие гидравлические уклоны и сопротивления участков МСРТ с раструбным соединением.

3. Разработанная система оперативного мониторинга и авторский программный комплекс позволяют эксплуатирующим организациям оперативно контролировать техническое состояние трубопроводов и определять местоположение и расход утечек НП в режиме реального времени в автоматизированном формате.

**Личный вклад автора** состоит в решении сформулированных задач теоретических и экспериментальных исследований, разработке математической модели и алгоритмов; анализе, обобщении и внедрении результатов исследования; обработке результатов экспериментальных исследований, имитационном моделировании; формулировании положений научной новизны, теоретической и практической значимости, основного содержания, выводов и рекомендаций.

#### **Степень достоверности и апробации результатов**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, изложенных в работе, обеспечены применением современных метрологических аттестованных методов и средств проведения экспериментально-теоретических исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись к обсуждению на Международной НПК «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов» (РАН) (г. Нижневартовск, 2020 г.), НТК ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны РФ» (г. Москва, 2019-2023 гг.), Международной НТК «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (г. Тюмень, 2022-2023 гг.), Международной НТК «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (г. Тюмень, 2023-2025 гг.), XXVII Московском международном Салоне изобретений инновационных технологий «Архимед-2024» (г. Москва,

2024 г.), Международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2025 г.), Международной НПК «Предупреждение и ликвидация разливов нефти: пути решения и перспективы» (г. Владивосток, 2025 г.).

Результаты работы апробированы при эксплуатации действующих МСРТ длиной 13 км при перекачке топлива ТС-1 и 59 км при перекачке дизельного топлива. Материалы исследований используются в учебном процессе Ульяновского ГУ и Уфимского ГНТУ при подготовке обучающихся по направлениям «Нефтегазовое дело» и «Промышленная безопасность».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 3 из них – по специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, 1 – в рецензируемом издании, индексируемом в Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатации нефтегазопроводов, баз и хранилищ по п. 1 «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортирования и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения...» и п. 4 «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта...».

## **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 136 листах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 40 таблиц и 60 рисунков. Список литературы включает 150 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** на основании аналитического обзора существующих методов (способов) и средств (систем) определения количества и местоположения утечек НП на трубопроводах нефтегазового комплекса, изложенных в работах М.В. Лурье, П.И. Тугунова, В.Ф. Новоселова, Н.А. Гаррис, Г.Е. Коробкова, Ю.Д. Земенкова, В.А. Полякова, А.С. Дидковской, А.М. Короленка, Н.Н. Голунова, А.Р. Валеева, Н.Х. Абдрахманова, показано состояние вопроса обнаружения мест разгерметизации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов. Исследованию вопросов нарушения герметичности также посвящены работы А.П. Белкина, Б.Н. Мастобаева, Г.Г. Васильева, В.В. Середы, И.Г. Данильченко, Д.А. Дроздова и др., в которых отмечены отличия и особенности повреждений МСРТ, условия, определяющие потери НП на МСРТ. Показано, что современные методы (визуальный, гидравлического треугольника, волновой, контроля режимов НС, сопоставления количества принятых в трубопровод и выданных НП), описанные в работах А.П. Белкина, Д.И. Мельникова, И.Г. Данильченко, Р.А. Шестакова и др., не позволяют получать оперативную информацию о расходе утечек с учетом времени и места разгерметизации МСРТ.

Фактически уровень развития МСРТ и нефтегазовой отрасли в целом требует применения комплекса мероприятий и технических решений для обеспечения надежной эксплуатации линейной части трубопровода, для которых необходимы новые способы и средства контроля процессов

транспортирования. Анализ исследований и научно-технических разработок показал отсутствие универсального комплекса мониторинга режима работы МСРТ в период неустановившегося режима работы НС.

Для оценки динамики изменения гидродинамических показателей трубопровода было проведено электрогидравлическое моделирование процесса транспортирования НП по трубопроводу при нарушении герметичности (рисунки 1-2).

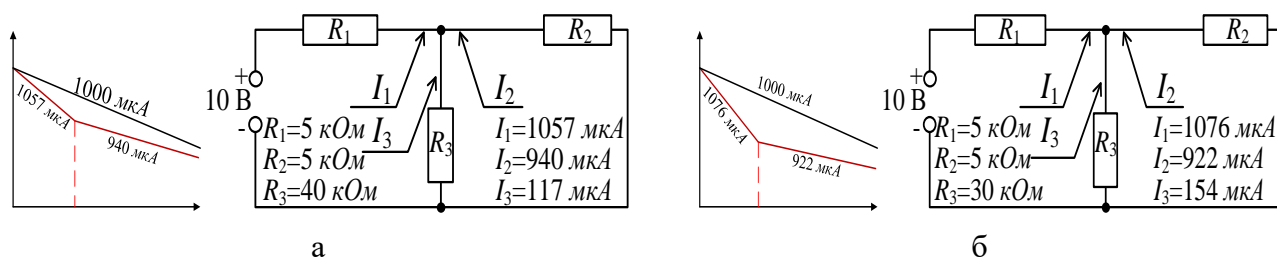


Рисунок 1 – Результат моделирования процесса при имитации нарушения герметичности с сопротивлением 40 кОм (а) и 30 кОм (б)

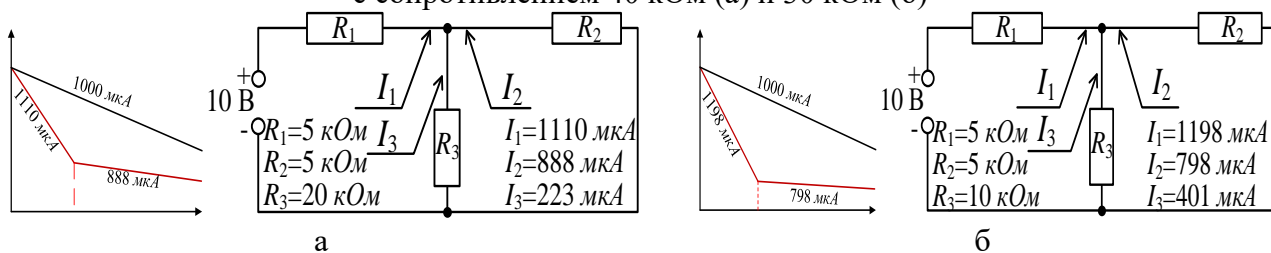


Рисунок 2 – Результат моделирования процесса при имитации нарушения герметичности с сопротивлением 20 кОм (а) и 10 кОм (б)

Анализ результатов проведенных исследований показал, что изменение гидравлического уклона и расхода вследствие уменьшения местных сопротивлений участка может быть использовано как показатель нарушения герметичности, а координата утечки – перпендикуляр к профилю трассы трубопровода из точки надлома линии гидравлического уклона.

Для идентификации граничных условий использования параметрических методов обнаружения утечек установлены минимальные значения основных гидродинамических показателей трубопровода, определяемые при использовании средств измерений с различным классом точности. Для трубопроводов МСРТ  $DN 100$  и  $DN 150$  минимальные значения расхода утечки составили  $1,25 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $4,69 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно при использовании средств измерения давления с классом точности 0,4.

Таким образом, для характеристики признака изменения степени гидравлического уклона МСРТ обосновано использование критерия

нарушения герметичности  $K_{\text{НР}} [0;1]$ , который представляет отношение уклонов или расходов на участках трубопровода до и после места нарушения герметичности.

**Во второй главе** разработана математическая модель гидравлического состояния МСРТ с раструбным соединением в период квазистационарного режима работы НС при нарушении герметичности линейной части трубопровода, описывающая динамику изменения основных гидродинамических показателей и учитывающая механизм изменения расхода и распределения давления при возникновении утечки.

При моделировании состояния МСРТ начальными условиями является следующая система уравнений:

$$\begin{cases} p = p(x, t); \\ Q = Q(x, t); \\ i_1(t) = i_2(t); \\ q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – давление, МПа;  $x$  – линейная координата, м;  $t$  – время, с;  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/ч;  $q$  – расход утечки, м<sup>3</sup>/ч;  $i_1$  и  $i_2$  – гидравлический уклон до и после утечки на участках МСРТ соответственно. Граничные условия: диаметр трубопровода - от 100 до 150 мм; рабочее давление (3÷6) МПа; расход (60÷160) м<sup>3</sup>/ч; длина трубопровода (12÷15) км; плотность НП (700÷860) кг/м<sup>3</sup>.

В разработанной модели учитывается неравенство гидравлических уклонов  $i_1$  и  $i_2$  участков до и после утечки соответственно на участке трубопровода протяженностью  $L$  между НС (рисунок 3). Изменение гидравлического уклона на участках трубопровода до и после утечки характеризуется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \delta i_1 &= \frac{\delta(\Delta H_1)}{x} = \left( \frac{\partial i}{\partial Q} \right)_{Q_0} \cdot \delta Q_1; \\ \delta i_2 &= \frac{\delta(\Delta H_2)}{L-x} = \left( \frac{\partial i}{\partial Q} \right)_{Q_0} \cdot \delta Q_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta i_1$  и  $\delta i_2$ ;  $\delta(\Delta H_1)$  и  $\delta(\Delta H_2)$ ;  $\delta Q_1$  и  $\delta Q_2$  – изменение уклона, напора и расхода на участках трубопровода до и после утечки соответственно.

Для определения гидравлического уклона  $i$  предложена обобщенная формула, учитывающая зависимости уклона от расхода  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч) и

коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  от безразмерных коэффициентов  $A$  и  $m$ , характеризующих режим течения и области гидравлического трения, числа Рейнольдса  $Re$ , диаметра трубопровода  $d$  (м) и кинематической вязкости перекачиваемых НП  $\nu$  (м<sup>2</sup>/с):

$$i = \frac{8 \cdot A \cdot \nu^m \cdot Q^{2-m}}{4^m \cdot \pi^{2-m} \cdot d^{5-m} \cdot g}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

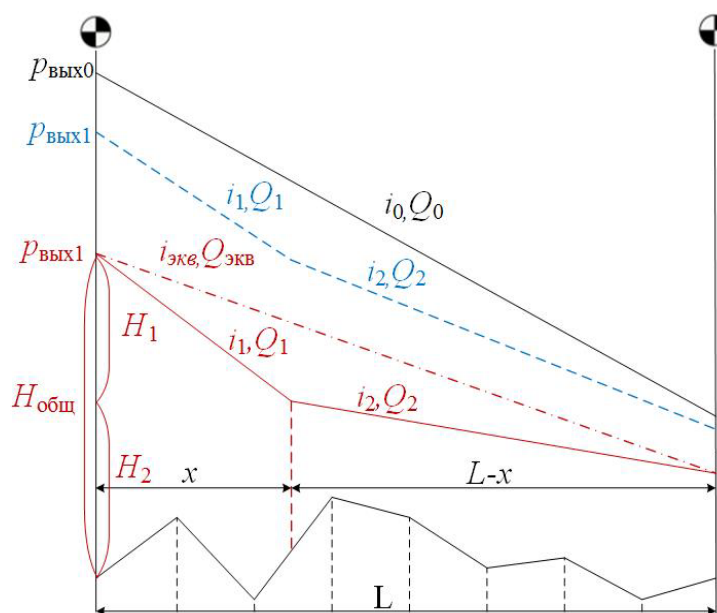


Рисунок 3 – Расчетная схема предлагаемого метода определения координаты места нарушения герметичности трубопровода

Для определения расхода использовалась аналитическая зависимость напорных характеристик центробежных насосов в зависимости от частоты вращения,

выраженная через дифференциальное давление, развиваемое насосом средства перекачки, и плотность НП  $\rho_t$  (кг/м<sup>3</sup>):

$$Q_i(t) = \left( \frac{\left( \frac{n_{\phi_i}(t)}{n_0} \right)^2 \cdot a - \left( \frac{(p_{\text{вых}_i}(t) - p_{\text{вх}_i}(t)) \cdot 10^6}{\rho_t \cdot g} \right)}{b} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

где  $n_0$  и  $n_{\phi_i}(t)$  – номинальная (максимальная) и фактическая частота вращения вала двигателя соответственно, мин<sup>-1</sup>;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты аппроксимации, м и м/(м<sup>3</sup>/ч)<sup>2</sup>;  $p_{\text{вых}_i}(t)$  – давление на выходе из насоса, МПа;  $p_{\text{вх}_i}(t)$  – давление на входе в насос, МПа.

С целью определения коэффициентов  $a$  и  $b$  проведена аппроксимация напорных характеристик ( $Q-H$ ) центробежных насосов, разбивая снятые с паспортной характеристики ( $Q-H$ ) значения напоров  $H$  и подач  $Q$  на отдельные диапазоны. Полученные значения коэффициентов аппроксимации значений характеристик « $Q-H$ » насосов штатных средств перекачки для

отдельных диапазонов подач  $Q$  представлены в таблице 1. Установлено, что величины относительных отклонений расчетных характеристик с использованием существующих коэффициентов аппроксимации при определенных значениях подачи превышают 5 %. В то же время, анализ полученных характеристик с использованием коэффициентов из таблицы 1 показывает, что величина относительного отклонения не превышает 3 %.

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимации характеристик « $Q-H$ »

Тип насоса (средство перекачки)	Диапазоны подач $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Коэффициенты аппроксимации	
		$a$ , м	$b$ , м/(м <sup>3</sup> /ч) <sup>2</sup>
6НГ <sub>м</sub> -7×2 (ПСГ-160)	0 – 40	183,17	$-4,34 \cdot 10^{-4}$
	40 – 120	189,25	$41,14 \cdot 10^{-4}$
	120 – 155	220,33	$59,70 \cdot 10^{-4}$
	155 – 160	352,82	$118,29 \cdot 10^{-4}$
ЦН-240/140 (ПСГ-240)	0 – 110	162,36	$-2,52 \cdot 10^{-4}$
	110 – 230	171,34	$4,47 \cdot 10^{-4}$
	230 – 280	183,87	$7,02 \cdot 10^{-4}$
ЦН 80-60 (ПНУ-75)	0 – 40	649,67	$-15,52 \cdot 10^{-4}$
	40 – 100	684,12	$168,55 \cdot 10^{-4}$
4Н-6×2А (ПНУ-100/200М)	0 – 50	313,54	$-58,11 \cdot 10^{-4}$
	50 – 130	338,59	$28,12 \cdot 10^{-4}$
	130 – 170	341,86	$33,56 \cdot 10^{-4}$
4Н-6×2М (ПНУ-100/200К)	0 – 40	300,06	$-72,41 \cdot 10^{-4}$
	40 – 110	315,28	$30,27 \cdot 10^{-4}$
	110 – 180	324,72	$38,96 \cdot 10^{-4}$
4Н-6×2М1 (ПНУ-140)	0 – 50	357,03	$-94,41 \cdot 10^{-4}$
	50 – 130	387,98	$33,01 \cdot 10^{-4}$
	130 – 200	397,19	$38,92 \cdot 10^{-4}$

В разработанной модели общие потери напора на контролируемом участке МСРТ  $L$  представлены как сумма потерь напора на участках трубопровода  $x$  и  $(L-x)$ :

$$|i_{\text{ЭКВ}} \cdot L| = |x \cdot i_1(t)| + |(L-x) \cdot i_2(t)|, \quad (5)$$

где  $i_{\text{ЭКВ}}$ ,  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  – гидравлический уклон на участке трубопровода  $L$ ,  $x$ ,  $(L-x)$  соответственно.

Линия гидравлического уклона, эквивалентная контролируемому участку МСРТ  $L$  после нарушения герметичности, на рисунке 1 показана пунктиром и определяется следующим образом:

$$i_{\text{ЭКВ}} = \frac{(p_{\text{ВЫХ1}}(t) - p_{\text{ВХ2}}(t)) \cdot 10^6}{L}, \quad (6)$$

где  $p_{\text{ВЫХ1}}(t)$  и  $p_{\text{ВХ2}}(t)$  – давление на выходе и на входе НС в начале контролируемого участка, МПа.

В результате математических преобразований с использованием формулы (5) получена зависимость для определения места нарушения герметичности трубопровода через величины гидравлических уклонов:

$$x = L \frac{|i_{\text{ЭКВ}}| - |i_2(t)|}{|i_1(t)| + |-i_2(t)|} \quad (7)$$

С использованием формулы (3) зависимость (7) преобразована к виду:

$$x = L \left( \frac{Q_{\text{ЭКВ}}^{2-m} - Q_2^{2-m}(t)}{Q_1^{2-m}(t) - Q_2^{2-m}(t)} \right), \quad (8)$$

где  $Q_{\text{ЭКВ}}$  – расход на контролируемом участке МСРТ, м<sup>3</sup>/с.

Разность значений расхода на участках до ( $Q_1(t)$ ) и после ( $Q_2(t)$ ) места разгерметизации определяет расход утечки  $q$  (м<sup>3</sup>/ч):

$$q = Q_1(t) - Q_2(t). \quad (9)$$

Таким образом, разработанная математическая модель гидравлического состояния МСРТ с раструбным соединением в период квазистационарного режима работы НС при нарушении герметичности линейной части трубопровода позволяет оценить динамику изменения основных гидродинамических показателей трубопровода с учетом механизма изменения расхода и распределения давления при возникновении утечки.

**В третьей главе** выполнены экспериментальные исследования по определению местоположения и расхода утечек при повреждении МСРТ с раструбным соединением.

Для проведения экспериментальных исследований разработана схема развертывания МСРТ (рисунок 4). В результате сравнения полученных экспериментальных данных с расчетными зависимостями  $\lambda = f(\text{Re})$  установлено (рисунок 5), что существующие коэффициенты и формулы расчета показывают значимо заниженные значения, что увеличивает погрешность определения мест утечек на МСРТ. В работе показано, что для определения значения коэффициента гидравлического сопротивления можно принять значения коэффициентов  $A$  и  $m$  равными 0,16 и 0,18 соответственно.

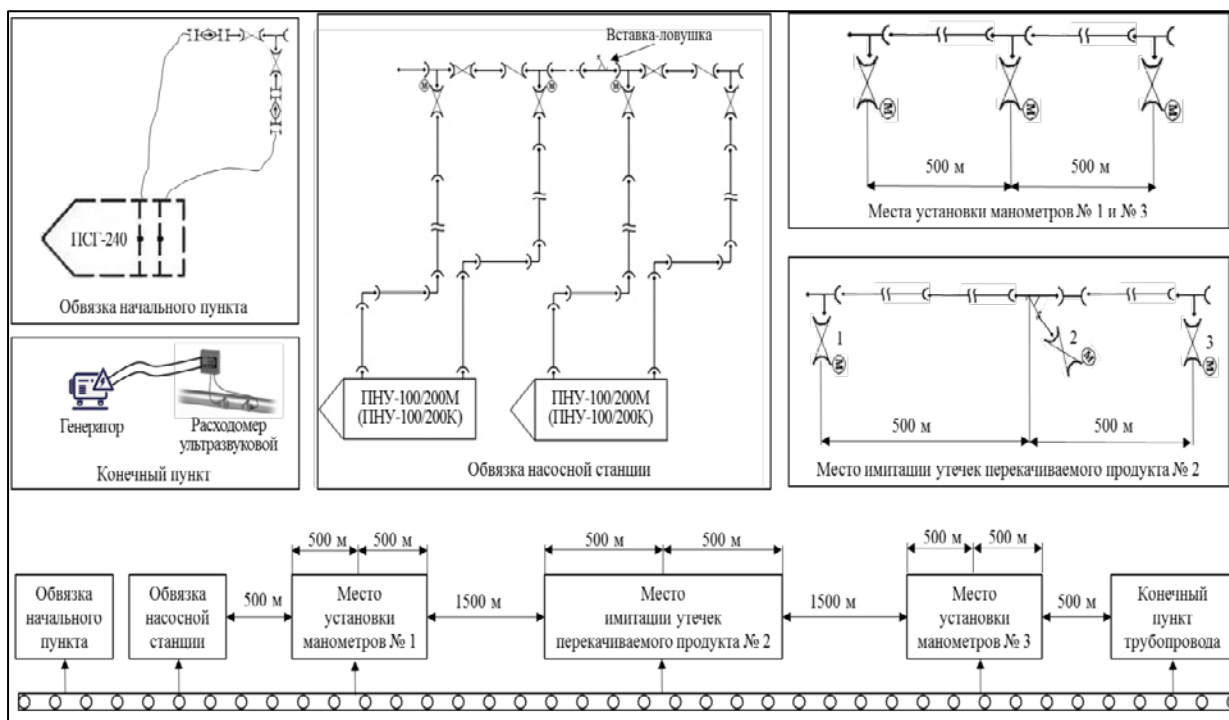


Рисунок 4 – Схема развертывания МСРТ

Таким образом, формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления МСРТ принимает следующий вид:

$$\lambda = \frac{0.16}{Re^{0.18}} \quad (10)$$

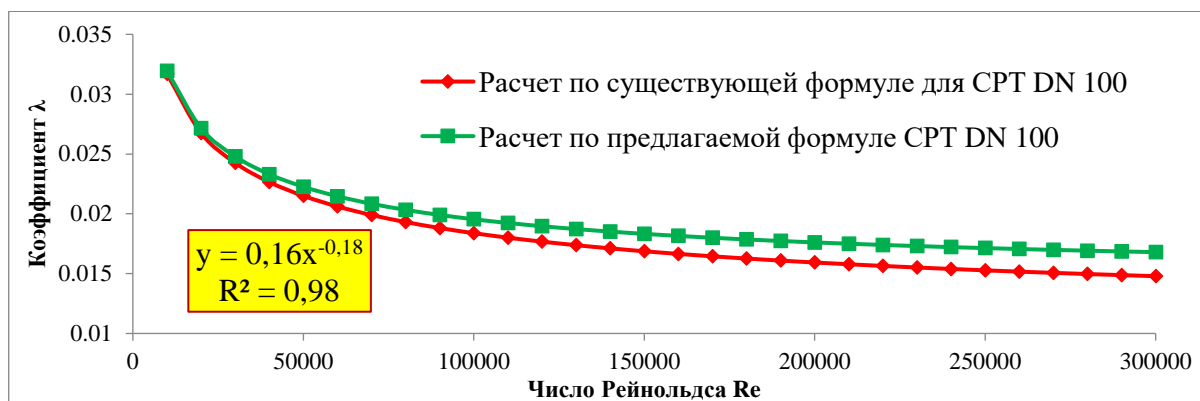


Рисунок 5 – Сравнение расчетных значений коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  по существующей и предлагаемой формуле

Результаты проведенных измерений и обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 6. Исследования по определению местоположения и расхода утечек при повреждении трубопровода проводились на МСРТ номинальным диаметром  $DN 150$  при перекачке условного топлива (воды), на МСРТ номинальным диаметром  $DN 100$  при перекачке топлива ТС-1 (рисунки 7-10).

Погрешность расчетных показателей объема потерь нефтепродуктов и координат повреждений трубопровода не превысила 10 %.

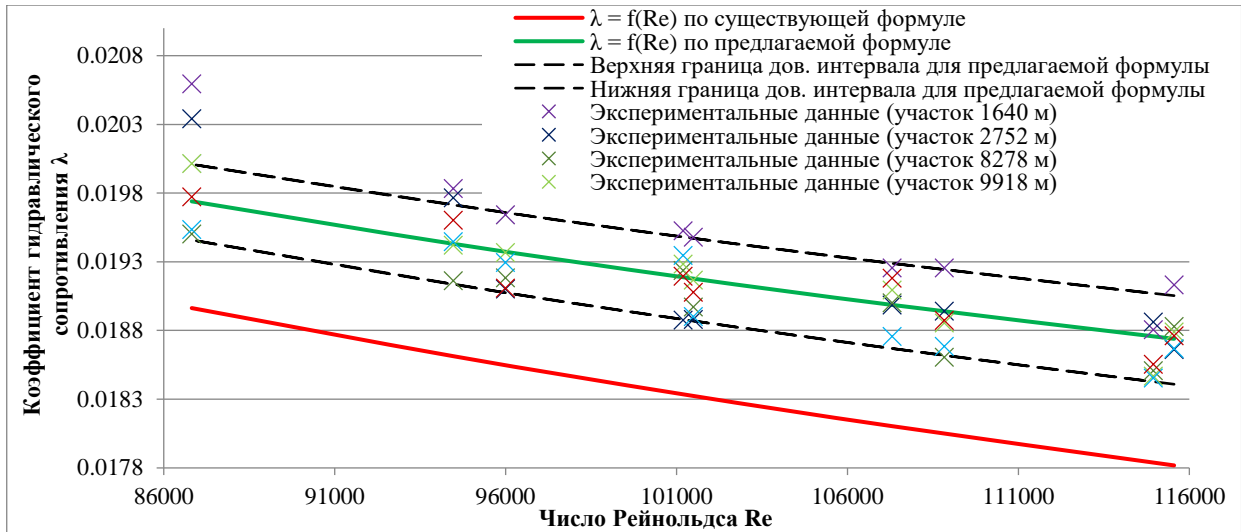


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных данных с расчетными зависимостями  $\lambda = f(Re)$

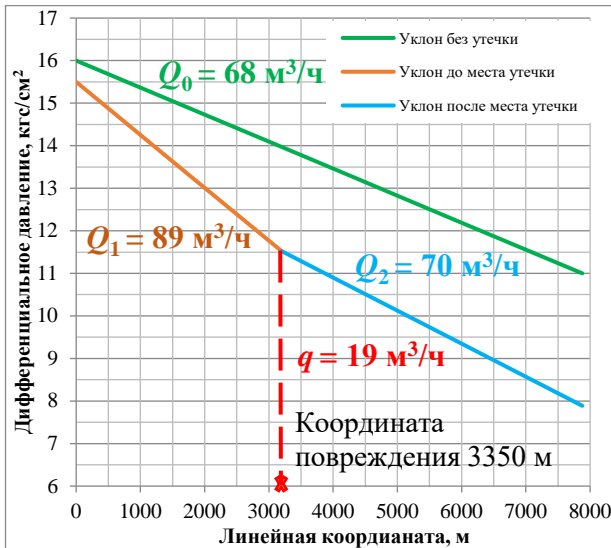


Рисунок 7 – Имитация повреждения DN 6

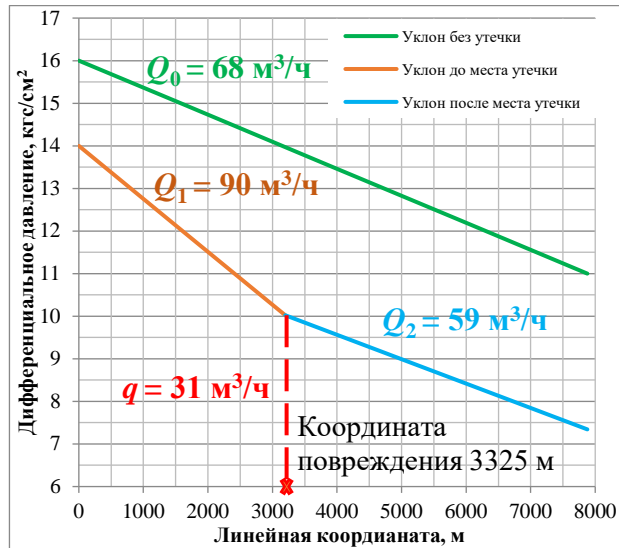


Рисунок 8 – Имитация двух повреждений DN 13

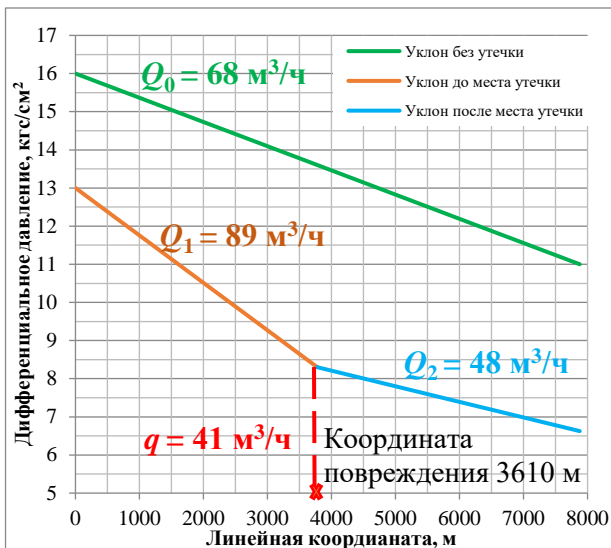


Рисунок 9 – Имитация повреждения DN 21

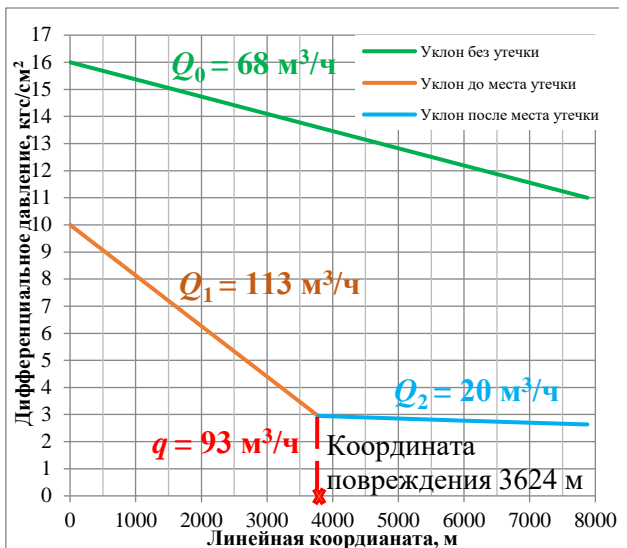


Рисунок 10 – Имитация повреждения DN 32

Отклонение от фактической координаты утечки не превышало 22 м. Обработка данных велась с использованием полученных коэффициентов  $A = 0,16$  и  $m = 0,18$ . В результате обработки экспериментальных данных установлены граничные значения критерия нарушения герметичности  $K_{НР}$  (таблица 2).

Таблица 2 – Границы критерия нарушения герметичности

Критерий нарушения герметичности ( $K_{НР}$ )		
Относительные показания давления и расхода	$K_{НР} = 1$	Номинальный (рабочий) режим трубопровода
	$0,8 < K_{НР} < 1$ ;	Повреждение незначительное (неисправность)
	$0 < K_{НР} \leq 0,8$ ;	Повреждение существенное (авария)
	$K_{НР} = 0$	Полный разрыв трубопровода

В практической интерпретации критерий нарушения герметичности позволяет дифференцировать повреждения на незначительные (неисправность), существенные (авария) и полный разрыв трубопровода.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено, что точность определения координаты утечки зависит от безразмерных коэффициентов в степенном законе гидравлического сопротивления. Полученные значения коэффициентов  $A$  и  $m$  позволяют корректно рассчитывать гидравлические уклоны и сопротивления участков МСРТ с раструбным соединением.

**В четвертой главе** разработан алгоритмический комплекс мониторинга основных гидродинамических показателей работы МСРТ, выполнена его программная реализация и внесены предложения по совместному использованию с узлом дистанционного контроля параметров перекачиваемых НП (УДК ПТН) для точного и оперативного определения местоположения и расхода утечек НП при нарушении герметичности трубопроводов с раструбным соединением.

Алгоритм (рисунок 11) программного комплекса мониторинга основных гидродинамических показателей МСРТ представляется

в следующих шагах. Рассчитывается дифференциальное давление НС, и при условии его изменения более 3 кгс/см<sup>2</sup> выполняется оценка местоположения и расхода утечки.

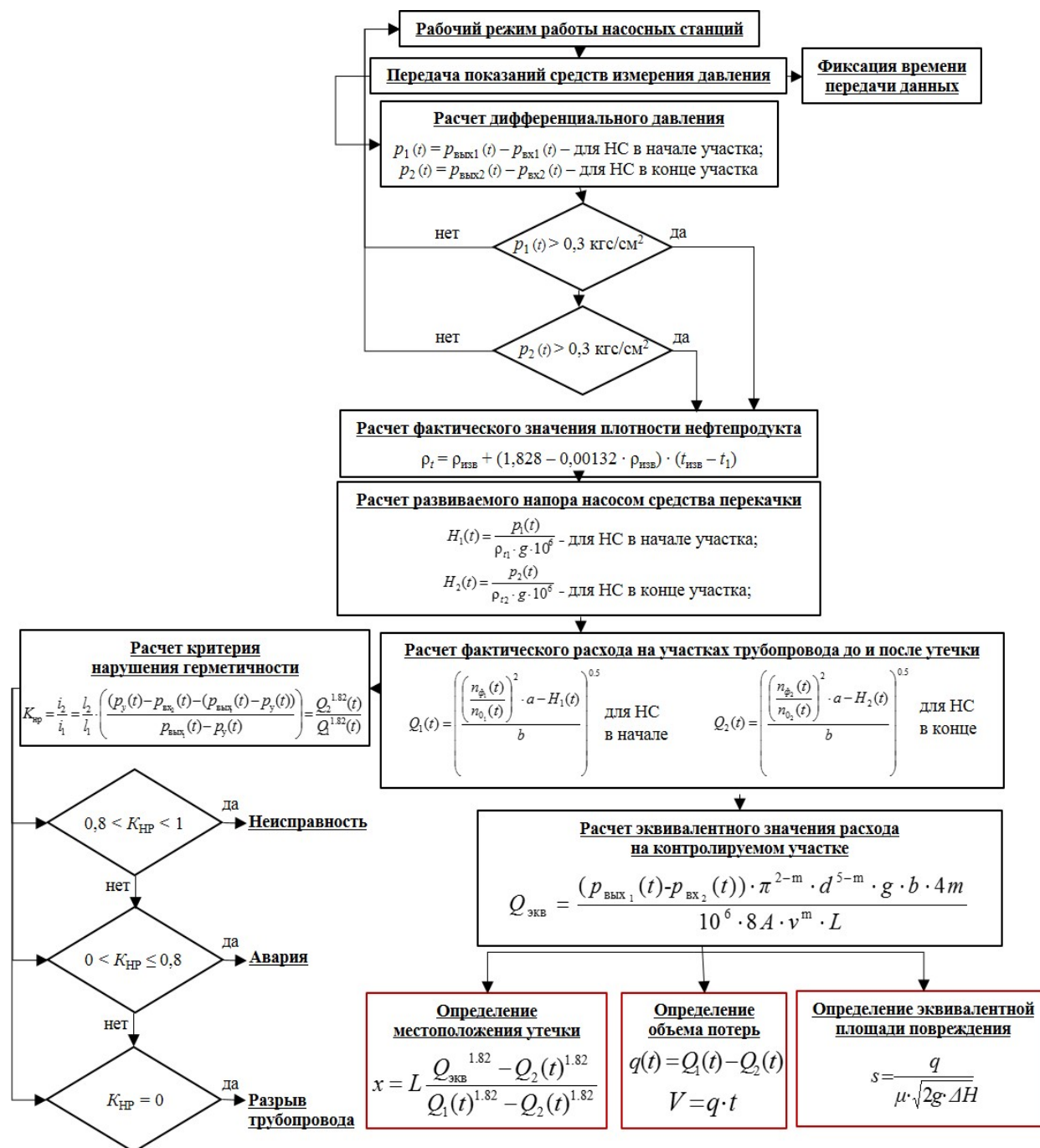


Рисунок 11 – Алгоритм программного комплекса определения местоположения и расхода утечек на МСРТ

Исходными данными для проведения расчета на контролируемом участке (КУ) между НС являются: протяженность КУ МСРТ (м); плотность НП при температуре перекачки (кг/м<sup>3</sup>); высотная отметка в начале КУ МСРТ (м); высотная отметка в конце КУ МСРТ (м); расход при рабочем режиме

трубопровода ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ); давление на выходе из НС в начале КУ МСРТ (МПа); расход НС в начале КУ МСРТ ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ); давление на входе в НС в конце КУ МСРТ (МПа); расход НС в конце КУ МСРТ ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

После уточнения фактической плотности НП выполняется расчет напоров для НС в начале и конце КУ МСРТ, определяются фактические значения расхода на участках трубопровода до и после утечки. Вычисляются значения критерия нарушения герметичности трубопровода. Рассчитывается эквивалентное значение расхода на КУ, эквивалентная площадь повреждения, координаты и расхода утечки.

Общий вид программного комплекса представлен на рисунке 12, в котором имеются четыре блока для внесения исходных данных, блок вывода расчетных значений местоположения и расхода утечки, диаметра и площади повреждения трубопровода и окно вывода сопутствующих расчетов.

Местоположение:	Интенсивность:	Диаметр:	Площадь:
-	-	-	-

Рисунок 12 – Общий вид экранной формы программной реализации алгоритмического комплекса мониторинга основных гидродинамических показателей МСРТ

Таким образом, разработанная система оперативного мониторинга (СОМ) гидродинамических показателей МСРТ позволяет выполнять расчет местоположения и расхода утечки НП и основных характеристик (диаметр,

площадь) повреждения трубопровода. COM технически реализована в программном модуле, возможность установки которого предусмотрена на АРМ как с операционной системой ASTRA LINUX, так и WINDOWS, и при использовании совместно с УДК ПТН позволяет сократить время обнаружения повреждений трубопровода, повысить точность и оперативность расчета местоположения и расхода утечек.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана математическая модель гидравлического состояния МСРТ диаметром от 100 до 150 мм с раструбным соединением в период квазистационарного режима работы НС при нарушении герметичности линейной части, характеризующая динамику изменения основных гидродинамических показателей трубопровода и учитывающая значительное количество местных сопротивлений, а также отклонения от прямолинейности, обусловленные угловой подвижностью раструбного соединения.

2. Получена аналитическая зависимость координаты местоположения утечки НП на МСРТ, учитывающая эквивалентный расход, термодинамические условия эксплуатации МСРТ, степень изменения гидравлических уклонов при разгерметизации на участке между НС.

3. В уравнении степенного закона гидравлического сопротивления определены значения феноменологических коэффициентов ( $A = 0,16$ ;  $m = 0,18$ ), существенно влияющие на точность определения координаты утечки и позволяющие корректно рассчитывать гидравлические уклоны и сопротивления МСРТ с раструбным соединением.

4. Обоснован критерий нарушения герметичности МСРТ для различных значений утечек НП и установлены его граничные значения, характеризующие расход утечки и эквивалентную площадь повреждения трубопровода (номинальный (рабочий) режим работы трубопровода –  $K_{НР}=1$ ; незначительное повреждение, неисправность –  $0,8 < K_{НР} < 1$ ; существенное повреждение, авария –  $0 < K_{НР} \leq 0,8$ ; полный разрыв трубопровода –  $K_{НР}=0$ ).

5. Разработанный комплекс гидродинамических показателей мониторинга и анализа режима работы МСРТ и созданная система оперативного мониторинга с авторским программным комплексом реализованы при эксплуатации сборно-разборных нефтепродуктопроводов, развернутых на направлении Южно-Торавейское НМ - Лабоганское НМ. Результаты работы апробированы при эксплуатации действующих МСРТ протяженностью 13 км и 59 км при перекачке дизельного топлива и ТС-1.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации из перечня ВАК**

**при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

#### **По специальности 2.8.5**

1. Сеоев, Л.В. Подходы к моделированию процесса транспортирования топлив по сборно-разборному трубопроводу при нарушении герметичности / Л.В. Сеоев, М.Ю. Земенкова, С.Ю. Подорожников, Е.Л. Чижевская // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2025. – № 3 (155). – С. 134-149.

2. Сеоев, Л.В. Интеллектуальный мониторинг утечек нефтепродуктов при повреждении сборно-разборных трубопроводов / Л.В. Сеоев, М.Ю. Земенкова, С.Ю. Подорожников, Е.Л. Чижевская // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 3 (171). - С. 148-157.

3. Сеоев, Л.В. Исследование гидравлического сопротивления сборно-разборных трубопроводов с раструбным соединением/ Л.В. Сеоев, М.Ю. Земенкова, С.Ю. Подорожников, Е.Л. Чижевская // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2026. – № 1 (159). – С. 98-108.

#### **В других изданиях ВАК**

4. Сеоев, Л.В. Исследование гидравлического сопротивления сборно-разборных трубопроводов / Д.А. Дроздов, Л.В. Сеоев // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. – 2020. – № 59. – С. 647-656.

5. Сеоев, Л.В. Интеллектуальный мониторинг утечек нефтепродуктов при эксплуатации магистральных и мобильных нефтепродуктотранспортных систем / Л.В. Сеоев, Д.И. Мельников, М.Ю. Земенкова [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 5-6(125-126). – С. 90-92.

6. Сеоев, Л.В. Способ определения места нарушения герметичности полевого магистрального трубопровода при авариях и неисправностях / Л.В. Сеоев, Д.А. Дроздов, Д.У. Думболов // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. – 2023. – № 61. – С. 313-324.

#### **В изданиях Scopus**

7. Сеоев, Л.В. Study of hydraulic resistance in collapsible pipelines (Исследование гидравлического сопротивления сборно-разборных трубопроводов) / L.V. Seoev, D.A. Drozdov, K.M. Plotnikova, A.V. Elkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2, Khanty-Mansyisk, 21–22 февраля 2019 года. – Khanty-Mansyisk, 2020. – P. 012022. – DOI 10.1088/1757-899X/921/1/012022.

#### **В других изданиях**

8. Сеоев, Л.В. Исследование гидравлического сопротивления сборно-разборных трубопроводов / Л.В. Сеоев, Д.А. Дроздов, К.М. Плотникова, А.В. Елькин // Нефтяная столица: Третий Международный молодежный научно-практический форум. Сборник материалов, Нижневартовск, 18-19 февраля 2020 года. – Нижневартовск: АНО содействия развитию инновационной деятельности «Центр научно-технических решений», 2020. – С. 185-187.

9. Сеоев, Л.В. Сборно-разборные магистральные трубопроводы нового поколения / А.Б. Квашнин, Д.И. Мельников, Л.В. Сеоев // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 4-х частях, Москва, 01 марта 2022 года / Сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный [и др.]. Том Часть II. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства РФ по делам ГО, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 233-239.

10. Сеоев, Л.В. К вопросу обнаружения координаты утечек нефтепродуктов при авариях и повреждениях сборно-разборных трубопроводов / Л.В. Сеоев, Д.И. Мельников, И.В. Горожанин // Нефтегазовый терминал: материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 02–03 июня 2022 года. Том 2. Выпуск 23. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 231-237.

11. Сеоев, Л.В. Определение места нарушения герметичности полевого магистрального трубопровода при авариях и неисправностях / Л.В. Сеоев // Рассохинские чтения - 2025: Материалы 17-й международной конференции, Ухта, 06–07 февраля 2025 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2025. – С. 251-260.

12. Сеоев, Л.В. Классификация потерь горючего при использовании полевых магистральных трубопроводов / Л.В. Сеоев, Д.А. Дроздов, Д.И. Мельников [и др.] // Рассохинские чтения - 2025: Материалы 17-й международной конференции, Ухта, 06–07 февраля 2025 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2025. – С. 260-270.

13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023666287 РФ. Обнаружение местоположения и интенсивности истечения топлив при авариях и повреждениях полевого магистрального трубопровода: № 2023666287: заявл. 25.07.2023: опубл. 28.07.2023 / Д.В. Варнаков, Л.В. Сеоев, С.А. Симачков [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

14. Патент № 2812007 РФ, МПК G05B 19/418. Автоматизированный комплекс мониторинга процесса транспортирования нефтепродуктов по наземному сборно-разборному полемому магистральному трубопроводу с соединением "раструб": № 2023124101: заявл. 19.09.2023: опубл. 22.01.2024 / Г.Г. Калашник, К.М. Плотникова, В.А. Маркин, Д.И. Мельников, Д.А. Дроздов, Л.В. Сеоев; патентообладатель ФАУ 25 «Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны РФ».

Подписано в печать 24.03.2026. Формат 60x90 1/16. Усл. авт. л. 1,05.  
Тираж 100 экз. Заказ № 3205.

Библиотечно-издательский комплекс  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет».  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.