

На правах рукописи



**Мамонова Татьяна Егоровна**

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД  
ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТЕЧЕК В НЕФТЕПРОВОДАХ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Малышенко Александр Максимович

Официальные оппоненты: Юркевич Валерий Дмитриевич,  
доктор технических наук, профессор, кафедра  
Автоматики Новосибирского государственного  
технического университета, профессор

Гаврилов Алексей Борисович,  
кандидат технических наук, лаборатория  
«Информационные технологии» Федерального  
государственного унитарного предприятия  
«Сибирский государственный ордена Трудового  
Красного Знамени научно-исследовательский  
институт метрологии», начальник лаборатории

Ведущая организация: открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа».

Защита состоится 25 декабря 2012 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 22 ноября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шпилевая Ольга Яковлевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** В настоящее время на всех крупных, средних и даже мелких промышленных предприятиях используются трубопроводы для транспортировки воды, пара, жидкого сырья или производимой продукции. Особо важную роль трубопроводный транспорт играет в нефтяной и газовой промышленности, особенно в случае транспортировки нефти и газа из труднодоступных мест добычи.

Проблема разгерметизации трубопроводов является наиболее острой в нефтяной промышленности, так как ведёт не только к потере перекачиваемых нефтепродуктов, но и к большим затратам на ремонтные работы и восстановление трубопроводных линий, к выплате значительных штрафов при загрязнении окружающей среды. Поэтому проблема определения утечек и несанкционированных отборов из трубопроводов именно в нефтяной промышленности остаётся особо актуальной на сегодняшний день.

В настоящее время вопросами обнаружения утечек занимается большое число учёных во многих странах мира, написано более 500 диссертационных работ на данную тему. Разработано более 20 методов обнаружения утечек, основанных на различных физических факторах. Каждый из методов обладает своими особенностями, недостатками и достоинствами. Проблема обнаружения утечек освещена в работах многих известных специалистов, в том числе в публикациях Л. С. Лейбензона, И. А. Чарного, Е. В. Вязунова, А. Г. Гумерова, А. К. Галлямова, В. Б. Галеева, Л. А. Дымшица, А. С. Джарджиманова, Л. Б. Кублановского, М. В. Лурье, К. А. Забелы, Ю. Д. Земенкова, В. Н. Антипьева, А. В. Бабкова, А. А. Гольянова, В. А. Саенко, Б. М. Лапшина, Р. Н. Столярова, К. В. Черняева, С. Е. Кутукова, А. С. Шумайлова, В. Е. Попадько, Ф. С. Зверева и других зарубежных и отечественных авторов.

Анализ методов обнаружения утечек показал, что метод, основанный на одном физическом эффекте, применимый ко всем режимам работы трубопроводов и позволяющий определить утечку с высокой чувствительностью к изменению её интенсивности и времени возникновения, ещё не достаточно разработан. Поэтому исследования в данной области по-прежнему актуальны.

**Объектом исследования** является нефтепровод с произвольным геометрическим профилем по отношению к горизонту и постоянным диаметром трубы, пролегающий между двумя перекачивающими станциями, полностью заполненный нефтепродуктом.

**Предметом исследования** является герметичность нефтепровода, нарушаемая при появлении в нём утечек, возникших вследствие эксплуатационных работ, старения труб или несанкционированных врезок с целью хищения нефтепродукта.

**Целью диссертационной работы** является повышение надёжности нефтепроводов путём своевременного обнаружения утечек в нём, а также определения координат и массового расхода этих утечек.

На основе анализа существующих методов обнаружения утечек из нефтепроводов определены следующие **задачи диссертационной работы**.

1. Выполнить системный анализ методов обнаружения утечек в нефтепроводах.

2. Получить специальное математическое обеспечение для расчёта параметров утечки в нефтепроводе с учётом его геометрического профиля.

3. Разработать новый метод определения утечек в нефтепроводах и получить специальное математическое обеспечение для расчёта параметров утечек в соответствии с разработанным методом с целью повышения эффективности управления процессом транспортировки нефтепродуктов.

4. На основе предложенного метода определения утечки разработать алгоритм обработки информации об изменениях давления во времени в контролируемых сечениях трубы.

5. Провести экспериментальные исследования модифицированного метода гидравлической локации для определения параметров утечки в нефтепроводе с целью определения его работоспособности.

**Методы решения.** Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. При решении задач использовался математический аппарат в виде дифференциальных уравнений в частных производных, метод Фурье, аппроксимация рядом Фурье, а также современные компьютерные технологии, в частности, программа обработки сигналов Graph2Digit 0.7.1b, пакеты MatLab 7.9, MathCAD 15, а также программа для конечно-элементных расчётов сложных научно-технических задач COMSOL Multiphysics 3.5.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Формулы для определения параметров утечки по гидравлическому профилю нефтепровода с произвольным геометрическим профилем и постоянным значением диаметра.

2. Способ измерения изменения во времени давления в одном сечении нефтепровода и устройство для его реализации.

3. Модифицированный метод гидравлической локации определения координаты и массового расхода утечки из нефтепровода, основанный на изменении во времени давления в одном сечении трубы.

**На защиту выносятся** следующие основные научные результаты и положения диссертации:

1. Формулы для определения параметров утечки по гидравлическому профилю нефтепровода с произвольным геометрическим профилем и постоянным значением диаметра.

2. Способ измерения изменения во времени давления в одном сечении нефтепровода и устройство для его реализации.

3. Модифицированный метод гидравлической локации определения координаты и массового расхода утечки из нефтепровода, основанный на изменении во времени давления в одном сечении трубы.

4. Результаты экспериментальных исследований модифицированного метода гидравлической локации для определения параметров утечки.

**Практическая ценность** результатов диссертационной работы заключается в возможности использования разработанных метода и устройства

на различных промышленных предприятиях при обнаружении утечек, таких как водопроводные сети и продуктопроводы.

**Реализация работы.** Диссертационная работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Номер государственного соглашения 14.В37.21.0457).

Результаты работы внедрены в

- проектно-изыскательскую деятельность ООО «Томскнефтепроект» в виде методики расчёта параметров утечки по профилю давления с учётом геометрического профиля нефтепровода по отношению к горизонту с постоянным значением диаметра; технического предложения по выполнению устройства для измерения изменения во времени давления в одном сечении нефтепровода; модифицированного метода гидравлической локации определения координаты и массового расхода утечки из нефтепровода, основанного на изменении во времени давления в одном сечении трубы;

- учебный процесс на кафедре интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики Томского политехнического университета в рамках курсов «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Моделирование систем» по направлениям 220301 и 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» в виде математической модели изменения давления в нефтепроводе, основанной на гидродинамических процессах в нём, с учётом параметров нефтепродукта и нефтепровода; теоретических исследований с использованием этой модели в пакете Comsol Multiphysics 3.5.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: VI международной научно-практической конференции «Средства и системы автоматизации» (ФГОБУ ВПО ТУСУР, г. Томск, 2005 г.); XI международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ФГОБУ ВПО НИ ТПУ, г. Томск, 2006 г.); всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии в науке, технике, медицине» (ФГОБУ ВПО НИ ТПУ, г. Томск, 2012 г.) и др.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, 4 из которых входят в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 1 патент на изобретение RU № 2426080, 8 материалов конференций.

**Личный вклад** автора состоит в разработке модифицированного метода гидравлической локации утечки, получении расчётных формул и алгоритма обработки информации для определения параметров утечки из нефтепровода в соответствии с предложенным методом, а также в проведении модельных и экспериментальных исследований. В соавторстве с доцентом В. Н. Шкляром разработаны способ и устройство измерения изменения во времени давления в

контролируемом сечении трубопровода, выполнены исследования математической модели течения жидкости в трубопроводе.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 66 источников и приложения, содержит 141 страницу основного текста, включающего 15 таблиц и 40 рисунков.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются основные цели и задачи диссертации, представлены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводятся результаты системного анализа существующих методов обнаружения утечек из трубопроводов, на основании которых проводится периодический и постоянный мониторинг эксплуатируемого участка нефтепровода. Представлены их краткое описание, основные достоинства и недостатки. Приводится классификация описанных методов по наиболее значимым для практики критериям, в числе которых точность определения места утечки, сам факт её возникновения, чувствительность и достоверность информации, безопасность в эксплуатации, обеспечение контроля состояния трубопроводов различной протяжённости, экономичность, работоспособность при сложных климатических и погодных условиях.

Установлено, что наилучшим по многим из рассматриваемых требований является метод акустической эмиссии, который характеризуется высокой точностью и чувствительностью, является надёжным с высоким уровнем безопасности и мало зависим от влияния климатических и погодных условий. Являясь в этом смысле достаточно эффективным, он, однако не удовлетворяет ряду других требований. Поэтому сделано заключение о том, что необходимо создание специального метода обнаружения утечек, который мог бы быть применен для определения параметров малых утечек из нефтепровода, в том числе через несанкционированные врезки.

**Вторая глава** содержит прикладные исследования закономерностей изменения давления в трубопроводе от вариации параметров нефтепродукта и нефтепровода при наличии утечки в нём, выполненные для повышения эффективности управления процессом транспортировки нефтепродуктов. Указанные исследования основаны на полученной математической модели течения жидкости в нефтепроводе с утечкой. Данная модель основана на анализе гидродинамических процессов течения жидкости в нём и описывает изменения давления по всей длине нефтепровода в зависимости от координаты и времени. Математическая модель в виде дифференциального уравнения и условий однозначности, описывающая течение жидкости в нефтепроводе с утечкой, имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{c^2}{F} \cdot G_T \cdot \delta(x - \xi), \quad (1)$$

$$\text{при } t = 0 \quad p(0, x) = p_H - \frac{p_H - p_K}{l} \cdot x, \quad \text{при } x = 0 \quad p = p_H, \quad \text{при } x = l \quad p = p_K, \quad (2)$$

где  $\chi = c^2 / b$ ,  $b = \lambda \cdot w / (2 \cdot d) = 2a$ ,  $\delta(x - \xi)$  – функция Дирака,  $p$  – давление в магистрали [Па],  $t$  – время [с],  $x$  – координата по длине трубы [м];  $l$ ,  $d$  – длина и диаметр трубы [м],  $c$  – скорость распространения волны давления [м/с],  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трубопровода (является безразмерной величиной),  $w$  – скорость движения нефтепродукта [м/с],  $\xi$  – координата места утечки [м].

На основании решения уравнений (1) и (2) с использованием аналитического метода разделения переменных (методом Фурье) получены расчётные формулы для аналитического определения давления в нефтепроводе при утечке с учётом параметров нефтепродукта и нефтепровода, которые имеют вид:

$$\begin{aligned}
 p(x, t) = & p_H - \frac{x}{l} (p_H - p_K) - \tilde{p} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cdot G_T \cdot l}{\pi^2 n^2 F} \cdot \sin\left(\frac{n\pi \cdot \xi}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi \cdot x}{l}\right) \times \\
 & \times \exp\left[ -\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\rho\beta + \frac{\rho d}{(\delta + h) \cdot E}}} \right)^2 \cdot \frac{t}{b} \right], \\
 \tilde{p} = & \begin{cases} \alpha \cdot \frac{G_T}{l \cdot F} \cdot (l - \xi) \cdot x, & \text{где } 0 \leq x < \xi, \\ \alpha \cdot \frac{G_T}{l \cdot F} \cdot (l - x) \cdot \xi, & \text{где } \xi \leq x < l, \end{cases} \\
 \alpha = & \begin{cases} 32 \cdot \frac{v}{d^2}, & \text{Re} \leq 2300, \\ 0,158 \cdot \frac{w^{0,75} \cdot v^{0,25}}{d^{1,25}}, & 2300 < \text{Re} \leq 20 \frac{d}{h}, \\ 0,055 \cdot \frac{w}{d} \cdot \left( \frac{68 \cdot v}{wd} + \frac{h}{d} \right)^{0,25}, & 20 \frac{d}{h} < \text{Re} < 500 \frac{d}{h}, \\ 0,055 \cdot \frac{w \cdot h^{0,25}}{d^{1,25}}, & \text{Re} \geq 500 \frac{d}{h}, \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости [кг/м<sup>3</sup>],  $\beta$  – коэффициент сжимаемость жидкости (является безразмерной величиной);  $d$ ,  $\delta$  – соответственно, внутренний диаметр и толщина стенок трубы [м];  $F$  – площадь сечения трубы [м<sup>2</sup>],  $h$  – абсолютная шероховатость внутренних стенок трубы [м],  $E$  – модуль упругости материала трубы (модуль Юнга) [Па].

Кроме того, получено специальное математическое обеспечение в виде расчётных формул для определения параметров утечки с учётом геометрического профиля трубы. При этом диаметр трубопровода остаётся неизменным на всём эксплуатируемом участке, а под геометрическим профилем понимается высотные отметки трубы над уровнем моря. Для этого

необходимо перейти от профиля давления нефтепровода к его гидравлическому профилю  $H(x)$ , который обладает следующими свойствами: 1) в нефтепроводе без утечки с некоторым геометрическим профилем  $z(x)$  его гидравлический профиль  $H(x)$  будет иметь прямолинейную зависимость;

2) при наличии утечки будет наблюдаться надлом гидравлического профиля нефтепровода в месте возникновения утечки. Уравнение для расчёта гидравлического уклона имеет вид:

$$H(x) = z(x) + p(x) / (\rho g), \quad (4)$$

где  $z(x)$  – геометрический профиль [м],  $p(x)$  – профиль давления по длине трубопровода [Па],  $p(x) / (\rho g)$  – пьезометрический профиль [м],  $g$  – ускорение свободного падения [м/с<sup>2</sup>].

Предполагается, что нефтепровод между нефтеперекачивающими станциями (НПС) является полностью заполненным, без дополнительных вставок и отводов. По длине трубопровода с координатами  $x_1$  и  $x_2$  располагаются два датчика абсолютного давления на высотах  $z(x_1)$  и  $z(x_2)$ .

Учитывая указанные выше свойства гидравлического профиля, аналогичные свойствам пьезометрического профиля прямолинейного горизонтального нефтепровода, формулы для определения параметров утечки из трубы с учётом его геометрического профиля будут иметь вид:

$$\xi = \frac{lK}{(l-x_2) \left[ p_1 - p_H - \frac{x_1}{l} (p_K - p_H) + [z_1 - z_H - \frac{x_1}{l} (z_K - z_H)] \cdot \rho g \right] + K}, \quad (5)$$

$$G_T = \frac{F(K-l+x_2)}{l \cdot 2\alpha \cdot x_1 (l-x_2) \cdot \rho g} \left[ p_1 - p_H - \frac{x_1}{l} (p_K - p_H) + [z_1 - z_H - \frac{x_1}{l} (z_K - z_H)] \cdot \rho g \right], \quad (6)$$

где  $K = x_1 (p_2 - p_H - \frac{x_2}{l} (p_K - p_H) + [z_2 - z_H - \frac{x_2}{l} (z_K - z_H)] \cdot \rho g)$ .

Полученные формулы (5) и (6) для нефтепровода с геометрическим профилем  $z(x)$  имеют сложный характер, поэтому их исследование было проведено с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics 3.5. Практика показала, что использование при моделировании нефтепроводов большой длины в рассматриваемом пакете требует больших временного ресурса и мощности компьютера. Поэтому моделирование проводилось на основе метода подобия, для чего было проведено масштабирование нефтепровода. В соответствии с масштабированием были уменьшены длина и диаметр трубы. Моделирование проводилось для трёх различных вариантов геометрического профиля нефтепровода: прямолинейного без наклона, прямолинейного с наклоном и в виде сигмоидальной функции

$$z(x) = 20 - \frac{20}{1 + e^{-0,1 \cdot (x-50)}}. \quad (7)$$



Для всех вариантов были смоделированы нефтепроводы при наличии утечки с координатой  $\xi = 55$  м и условным диаметром отверстия утечки  $d_{\xi} = 0,02$  м. В COMSOL Multiphysics были получены графики профиля давления.

Для проверки адекватности формул определения параметров утечки (5) и (6) был проведён расчет в математическом пакете MathCAD 15. При этом предполагалось, что по длине трубопровода расположено два датчика давления в местах с координатами  $x_1 = 30$  м.,  $x_2 = 70$  м. Данные расчёта параметров утечки для рассмотренных геометрических профилей нефтепровода приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

№	Геометрический профиль трубы	Заданные значения в COMSOL Multiphysics		Рассчитанные значения по формулам (5) и (6)		Погрешности расчёта	
		$\xi$ , м	$G_T$ , кг/с	$\xi$ , м	$G_T$ , кг/с	$\delta_{\xi}$ , %	$\delta_{G_T}$ , %
1	Прямолинейный без наклона	55,000	6,460	55,160	6,597	0,260	2,121
2	Прямолинейный с наклоном	55,000	6,460	55,469	6,779	0,469	4,938
3	Сигмоидальный	55,000	10,462	55,640	9,764	0,640	6,672

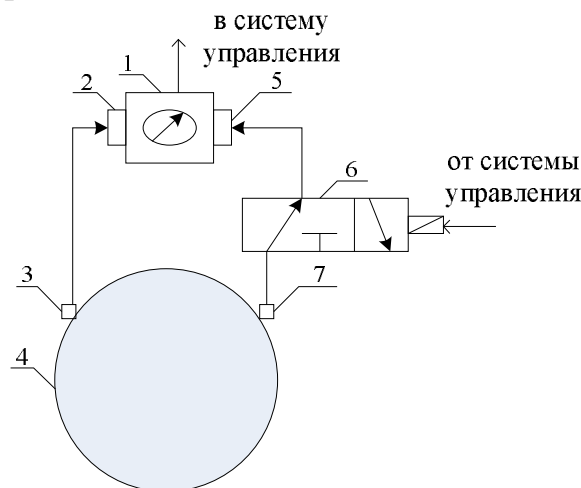
Проведённые эксперименты показали, что полученные формулы для расчёта параметров утечки (массового расхода и координаты) из нефтепровода с учётом его геометрического профиля дают результат с погрешностью не более 0,64 % для координаты утечки и 6,672 % для массового расхода. Данные результаты доказывают применимость формул определения параметров утечки (5) и (6) для различных геометрических профилей нефтепровода.

В **третьей главе** предложен модифицированный метод гидравлической локации для определения параметров утечки, основанный на анализе гидравлического уклона при утечке и использующий показания разработанного автором диссертации устройства для измерения изменений во времени давлений в контролируемом сечении нефтепровода. На основе предложенного метода разработан алгоритм обработки информации об изменениях давления в контролируемых сечениях трубопровода с целью обнаружения утечки и расчёта её параметров.

Рассматривается участок нефтепровода, который работает в стационарном режиме, не имеет самотечных участков, лупингов и отводов и транспортирует однородный нефтепродукт. При этом геометрический профиль трубы по отношению к горизонту может быть произвольным. В определённых участках трубы устанавливаются специальные устройства, представляющие собой датчики давления, измеряющие изменение давление во времени  $\Delta P(t)$  в одном сечении трубы. При перекачивании нефти и нефтепродуктов по трубопроводам уровень гидродинамического шума соответствует значению  $P_{ш} \geq 1,2$  кПа. При значении  $\Delta P(t) \geq P_{ш}$  имеет место либо изменение режима перекачки нефтепродукта, либо возникает утечка на эксплуатируемом участке нефтепровода,

пролегающего между двумя перекачивающими станциями. По показаниям датчиков давления, измеряющих изменения давления во времени в контролируемых сечениях трубы, с учётом параметров нефтепродукта (плотность, скорость перекачки) и нефтепровода (коэффициент гидравлического сопротивления трубы) с применением разработанных автором диссертационной работы формул, определяются параметры утечки из нефтепровода (координата и массовый расход).

Предлагаемое устройство для измерения изменения во времени давления в одном сечении нефтепровода основано на работе дифференциального датчика давления. Устройство позволяет измерять изменение во времени давления в контролируемом сечении нефтепровода при его изменениях, меньших порога чувствительности датчиков абсолютного давления, за счёт выбора шкалы измерения дифференциального датчика по величине возможного изменения давления в нефтепроводе. Схема устройства, представленная на рис. 1, показывает способ измерения изменения давления во времени в контролируемом сечении нефтепровода.



**Рисунок 1** – Схема устройства измерения изменений во времени давления в контролируемом сечении нефтепровода

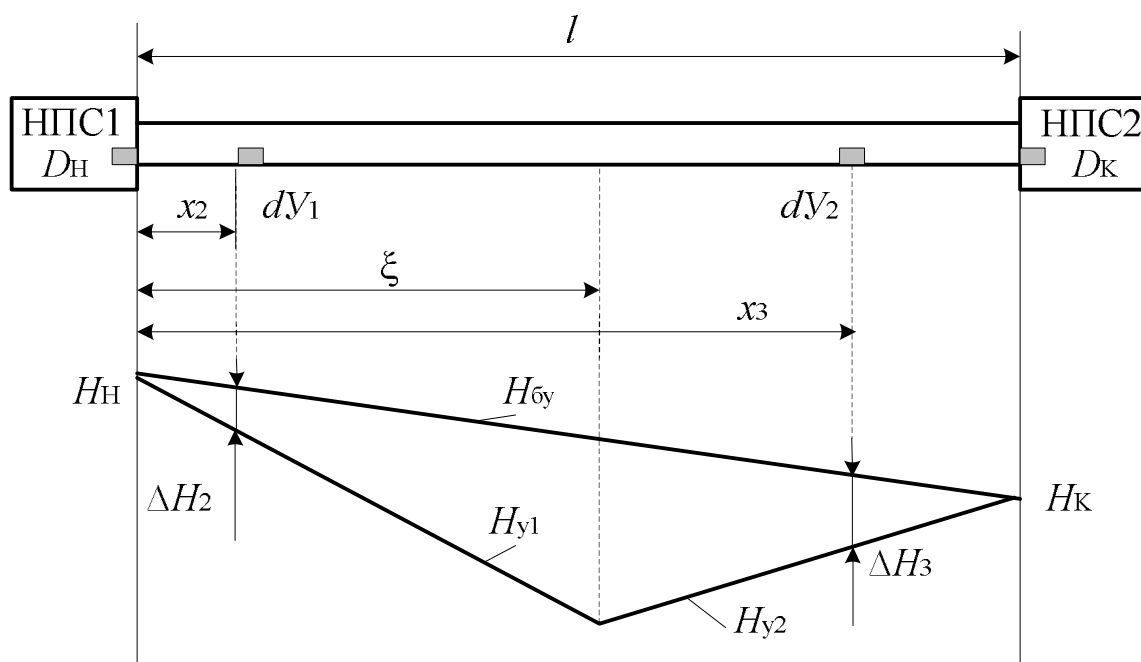
На схеме представлен измеритель изменения давления 1, в качестве которого используется дифференциальный датчик давления с диапазоном измерения, выбираемым в зависимости от требуемой чувствительности измерения давления. Измерительный вход 2 дифференциального датчика давления подсоединён через штуцер 3 к нефтепроводу 4. Вход 5 является запирающим и подключается к управляемому клапану 6, который через штуцер 7 подключён к нефтепроводу. Штуцеры 3 и 7 установлены в одном контролируемом сечении нефтепровода. Дифференциальный датчик давления и управляемый клапан связаны с системой управления нефтепровода. В качестве управляемого клапана используется устройство запорной аппаратуры, позволяющее перекрывать подсоединяющий вход дифференциального датчика давления к нефтепроводу и контролируемое системой управления нефтепровода. При этом если управляющий клапан не включён, обе камеры дифференциального датчика давления подключены через штуцеры к нефтепроводу. Разность давлений в камерах дифференциального датчика давления

будет равна нулю. При включении управляемого клапана по команде из системы управления нефтепровода соединение дифференциального датчика давления по «запоминающему» входу перекрывается. Значение давления в дифференциальном датчике давления по данному входу остаётся постоянным, равным давлению в нефтепроводе в момент срабатывания управляемого клапана. После всякое изменение давления в нефтепроводе (например, при возникновении утечки) будет приводить к изменению давления только по «измерительному» входу дифференциального датчика давления.

В диссертации геометрическим методом получены расчётные формулы для трёх вариантов работы нефтепровода в соответствии с разработанным модифицированным методом гидравлической локации утечки. При постоянных значениях давления в начале и конце эксплуатируемого участка (на нефтеперекачивающих станциях), показанного на рис. 2, координата утечки и массовый расход определяются, соответственно, как:

$$\xi = \frac{x_2 \cdot x_4 \cdot \Delta P_3}{(x_4 - x_3) \cdot \Delta P_2 + x_2 \cdot \Delta P_3}, \quad (8)$$

$$G_T = \frac{\pi \cdot d^2}{16} \cdot \sqrt{\frac{2d \cdot \rho}{\lambda}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{x_2 \cdot (P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)) - x_4 \cdot \Delta P_2}{x_2 \cdot x_4}} - \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4}} \right].$$

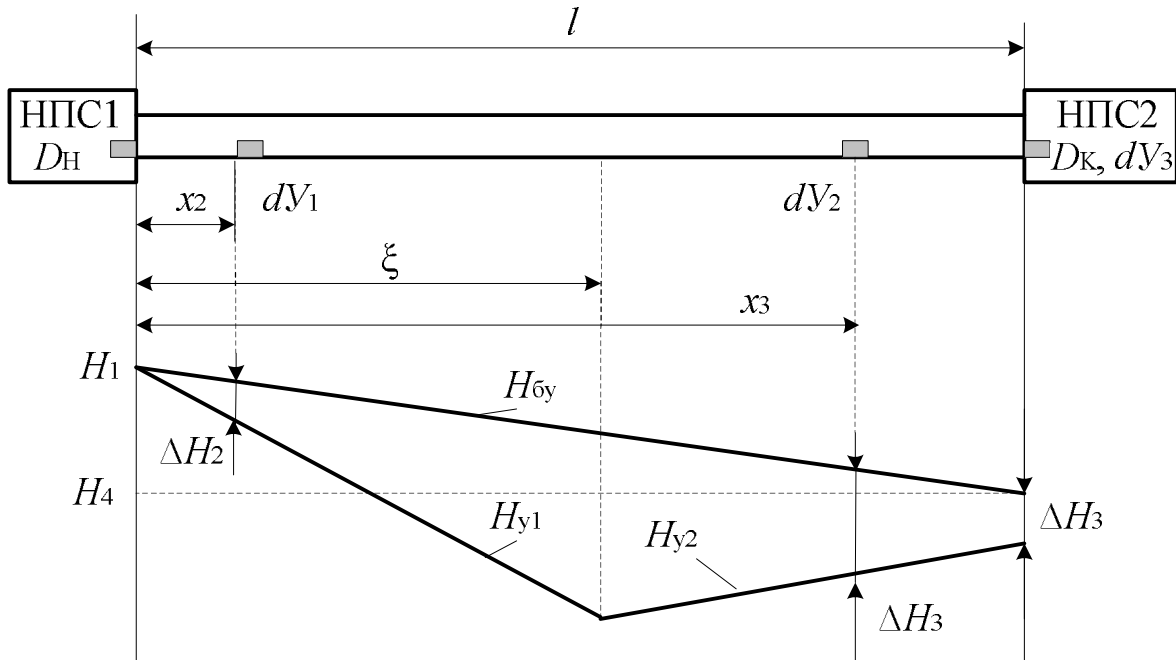


**Рисунок 2** – Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и без неё и его гидравлические уклоны при постоянных значениях давлений в начале и конце трубы

При постоянном давлении в начале нефтепровода и изменении во времени давления в его конце, как показано на рис. 3, расчётные формулы параметров утечки имеют вид:

$$\xi = \frac{x_2 \cdot (x_4 \cdot \Delta P_3 - x_3 \cdot \Delta P_4)}{(x_4 - x_3) \cdot \Delta P_2 + x_2 \cdot (\Delta P_3 - \Delta P_4)}, \quad (9)$$

$$G_T = \frac{\pi \cdot d^2}{16} \cdot \sqrt{\frac{2d \cdot \rho}{\lambda}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{x_2 \cdot (P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)) - x_4 \cdot \Delta P_2}{x_2 x_4}} - \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4}} \right]$$

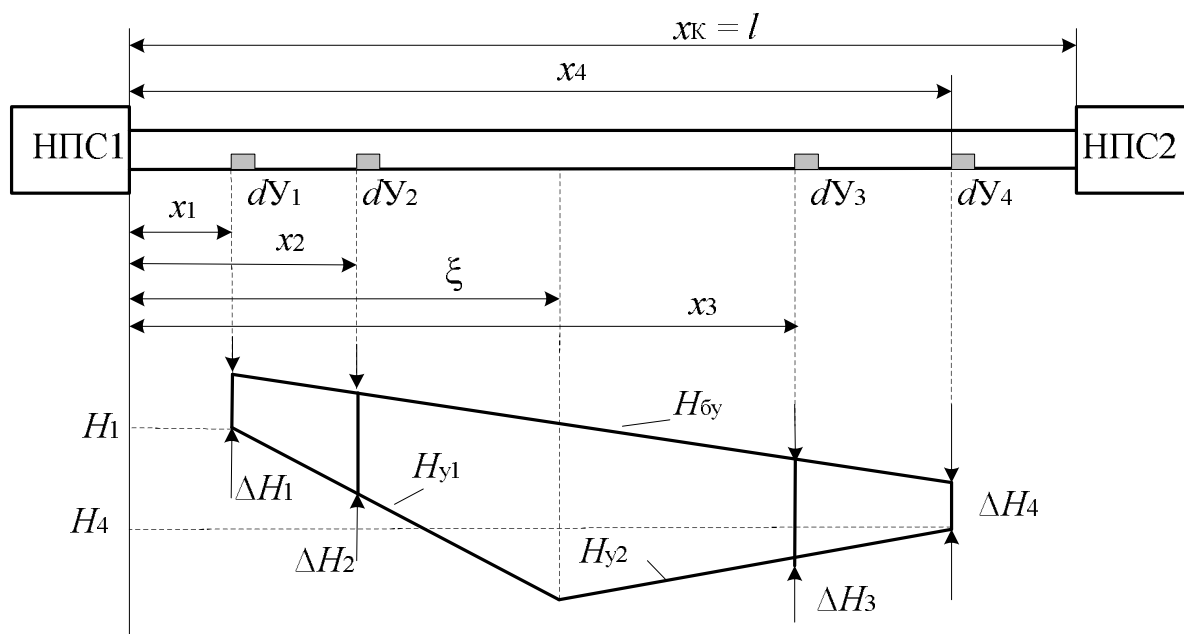


**Рисунок 3** – Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и без неё и его гидравлические уклоны при постоянном значении давлений в начале трубы и изменяющемся во времени давлении в конце трубы

На нефтепроводе с контролем изменений во времени давления в четырёх сечениях трубы, представленный на рис. 4, формулы для определения координаты и массового расхода утечки имеют вид:

$$\xi = \frac{(x_2 - x_1) \cdot (x_4 \cdot \Delta P_3 - x_3 \cdot \Delta P_4) - (x_4 - x_3) \cdot (x_2 \cdot \Delta P_1 - x_1 \cdot \Delta P_2)}{(x_2 - x_1) \cdot (\Delta P_3 - \Delta P_4) + (x_4 - x_3) \cdot (\Delta P_2 - \Delta P_1)}, \quad (10)$$

$$G_T = \frac{\pi \cdot d^2}{16} \cdot \sqrt{\frac{2d \cdot \rho}{\lambda}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4 - x_1} + \frac{\Delta P_2 (\Delta P_2 - \Delta P_1)}{x_1 (\Delta P_2 - \Delta P_1) - x_1 \Delta P_2 + x_2 \Delta P_1}} - \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4 - x_1}} \right]$$



**Рисунок 4** – Схема расположения устройств измерения изменений во времени давления в контролируемых сечениях нефтепровода с утечкой и без неё и его гидравлические уклоны

В работе выполнено исследование формул (8), (9) и (10) для определения утечек на нефтепроводе разного геометрического профиля с применением пакета COMSOL Multiphysics 3.5. Результаты исследования представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

Значения параметров утечки	Геометрический профиль трубы	Прямолинейный без наклона	Прямолинейный с наклоном	Параметры трубопровода и перекачиваемого продукта
Заданные значения в COMSOL Multiphysics 3.5	$\xi$ , м	55	55	Давление в начале трубы $P_H = 1$ МПа, давление в конце трубы $P_K = 0,7$ МПа, площадь сечения трубы $F = 7,85 \cdot 10^{-3}$ м <sup>2</sup> , толщина стенки трубы $\delta = 0,005$ м, плотность жидкости $\rho = 817$ кг/м <sup>3</sup> , скорость движения нефтепродукта $w = 1,2$ м/с, кинематическая вязкость $\nu = 55 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с, длина трубопровода $l = 100$ м, координата установки первого датчика $x_1 = 30$ м., координата установки второго датчика $x_2 = 70$ м., диаметр отверстия, имитирующего утечку $d_\xi = 0,02$ м,
	$G_T$ , кг/с	6,460	6,460	
Рассчитанные значения по формулам (8)	$\xi$ , м	55,123	55,156	
	$G_T$ , кг/с	6,483	6,520	
	$\delta_\xi$ , %	<b>0,224</b>	<b>0,284</b>	
	$\delta_{G_T}$ , %	<b>0,356</b>	<b>0,929</b>	
Рассчитанные значения по формулам (9)	$\xi$ , м	55,125	6,483	
	$G_T$ , кг/с	55,152	6,520	
	$\delta_\xi$ , %	<b>0,227</b>	<b>0,276</b>	
	$\delta_{G_T}$ , %	<b>0,356</b>	<b>0,929</b>	
Рассчитанные значения по формулам (10)	$\xi$ , м	55,109	6,475	
	$G_T$ , кг/с	55,138	6,332	
	$\delta_\xi$ , %	<b>0,198</b>	<b>0,251</b>	
	$\delta_{G_T}$ , %	<b>0,232</b>	<b>0,753</b>	

Проведённые исследования показали работоспособность модифицированного метода гидравлической локации при определении параметров утечки.

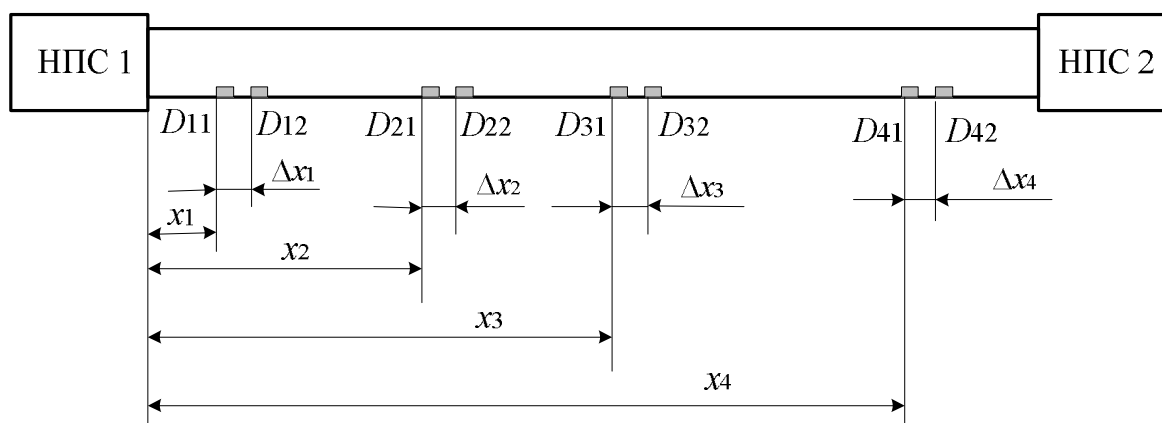
Таким образом, разработанный модифицированный метод гидравлической локации утечки позволяет повысить точность определения координаты и массового расхода утечки, а также чувствительность к изменениям во времени давления в трубе, возникшим при утечке. Это даёт возможность определять кратковременные утечки малой интенсивности.

В **четвёртой** главе представлены экспериментальные исследования разработанного метода определения параметров утечки с использованием трендов давления. Испытания были выполнены на нефтепродуктопроводе диаметром 0,53 м при перекачке летнего дизельного топлива. Утечку имитировали открытием крана с различным диаметром шайбы, меняя при этом её интенсивность. Была выполнена серия испытаний при различных значениях местоположения утечки, её интенсивности и длительности. При этом снимались показания датчиков абсолютного давления в четырёх сечениях нефтепровода. Данные по выполненным отборам нефтепродукта указаны в табл. 3. Были взяты данные, при которых открытие и закрытие крана, имитирующего несанкционированную врезку, производилось за время не более 1 с.

**Таблица 3**

Дата	Режим перекачки	Координата отбора, км	Диаметр шайбы, мм	Время начала отбора	Длительность отбора, с
28.09.07	стационарный	125,71	10	15:58	30
			14	16:24	30
			16	16:37	30
			18	16:52	30
			20	17:14	120
12.10.07	стационарный	47,44	8	15:08	30
			6	15:37	30
			10	12:55	30

Схема расположения на нефтепроводе датчиков давления, использованная при расчётах, представлена на рис. 5.



**Рисунок 5** – Схема участка нефтепровода

К первой системе обнаружения утечки (СОУ 1) принадлежат датчики  $D_{11}$ ,  $D_{21}$ ,  $D_{31}$  и  $D_{41}$ , к СОУ 2 относятся датчики  $D_{12}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{32}$  и  $D_{42}$ . На рис. 5 указаны расстояния к датчикам СОУ 1 и расстояние между соответствующими датчиками СОУ 1 и СОУ 2.

Для применения разработанных формул (10) расчёта параметров утечки по модифицированному методу гидравлической локации необходимо определить изменения давления от времени в одном сечении трубопровода в месте установки датчика по полученным трендам давления. При этом использовалась специальная программа обработки данных Graph2Digit 0.7.1b, которая формирует таблицу значений величины, отложенной по оси ординат, относительно величины, расположенной по оси абсцисс по заложенным в ней алгоритмам. Данная программа позволяет изменять период получения данных, а также метод их обработки.

После применения Graph2Digit 0.7.1b, имеется возможность либо непосредственно использовать полученные числовые значения искомого давления, либо экспортировать их в программу Excel и далее в блок определения параметров утечки, работа которого основывается на соответствующих расчётных формулах. Период обработки сигнала был выбран таким, что  $\Delta T = 8$  с, так как начало вычислений параметров утечки должно устанавливаться с дискретностью 7,38 с и более, что соответствует времени установившегося процесса при утечке, как показывают исследования процессов течения жидкости в нефтепроводе, выполненные в главе 2. Расчётные значения автоматически определяются как средние значения за прошедший промежуток времени  $\Delta T$ .

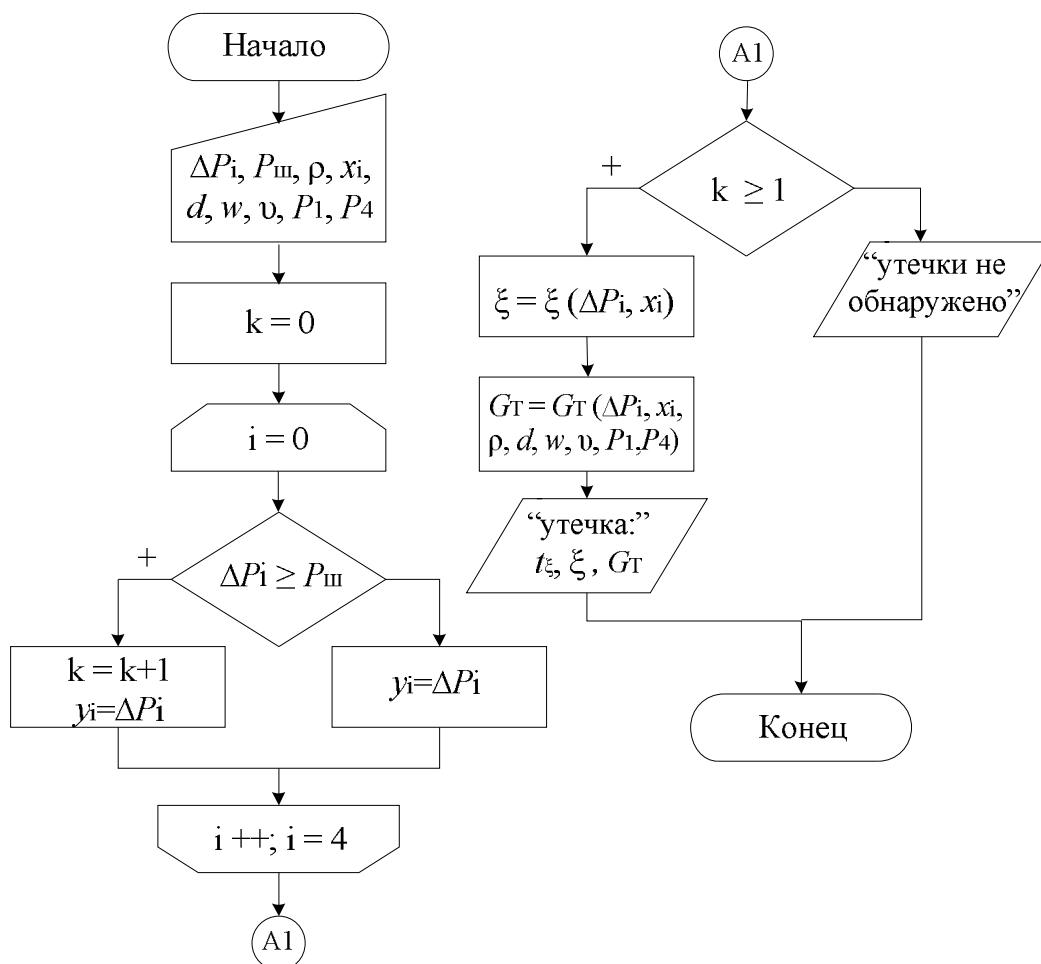
При определении с помощью формул (10) утечки с координатой  $\xi_1 = 125710$  м принимаем, что первый датчик  $D_{11}$  находится на расстоянии  $x_1$  м, второй датчик  $D_{21}$  – на расстоянии  $x_2$ , третий датчик  $D_{31}$  – на расстоянии  $x_3$ , последний датчик  $D_{41}$  – на отметке с расстоянием  $x_4$ .

При определении по формулам (10) параметров утечки с координатой  $\xi_2 = 47440$  м принято, что первый датчик  $D_{11}$  находится на расстоянии  $x_{11}$  м, второй датчик  $D_{12}$  – на расстоянии  $(x_1 + \Delta x_1)$ , третий датчик  $D_{21}$  – на расстоянии  $x_2$ , последний датчик  $D_{31}$  – на отметке с расстоянием  $x_3$ .

Для расчёта параметров утечки были созданы модели в Simulink пакета MatLab 7.9, в основе которых лежат программируемые m-файлы, данные об изменениях давления в которые поступают из таблиц программы Excel. При этом используется алгоритм, представленный на рис. 6.

Алгоритм работает следующим образом. Входными параметрами служат значения плотности и скорости нефтепродукта, его кинематическая вязкость, а также диаметр нефтепровода, координаты установки и показания устройств измерения изменения во времени давления, абсолютные значения давления в первом и четвёртом сечениях установки приборов и допустимый уровень гидравлического шума.

Далее фиксируются счётчики:  $i$  – порядковый номер устройства измерения давления,  $k$  – наличие изменения во времени давления в контролируемом сечении, большего установленного уровня шумов. Если хотя бы в одном сечении нефтепровода установлено превышение изменения давления, то выполняется расчёт параметров утечки и выдаётся результат.



**Рисунок 6** – Алгоритм обработки для определения параметров утечки по модифицированному методу гидравлической локации

Если изменений давления ни в одном из контролируемых сечений нефтепровода не обнаружено, то программа выдаёт сообщение об отсутствии утечки на эксплуатируемом участке трубопровода. Алгоритм работает с такой периодичностью, которая установлена для работы устройств измерения изменений во времени давления в сечениях трубы. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что наибольшая абсолютная погрешность расчёта координаты утечки составляет 337 м, массового расхода – 1,055 кг/с. Эти данные соответствуют утечке с координатой  $\xi_2 = 47440$  м и диаметром шайбы  $d_{ш} = 6 \cdot 10^{-3}$  м (наименьшем из представленных). Наилучший по точности результат был получен для утечки с координатой  $\xi_1 = 125710$  м и  $d_{ш} = 20 \cdot 10^{-3}$  м.



Таблица 4

№	Заданные значения			Расчётные значения		Погрешности расчёта			
	$\xi \cdot 10^3$ , м	$d_{ш} \cdot 10^{-3}$ , м	$G_T$ , кг/с	$\xi \cdot 10^3$ , м	$G_T$ , кг/с	$\Delta_\xi$ , м	$\delta_\xi$ , %	$\Delta_{G_T}$ , кг/с	$\delta_{G_T}$ , %
1	125,71	10	10,868	125,694	9,813	16	0,013	1,055	9,704
2		14	15,144	125,696	14,664	14	0,011	0,346	3,168
3		16	17,397	125,721	17,080	10	0,010	0,317	1,823
4		18	17,995	125,719	18,269	9	0,007	0,274	1,521
5		20	19,274	125,706	19,055	4	0,003	0,219	1,136
6	47,44	6	5,058	47,777	4,182	337	0,710	0,883	17,319
7		8	5,064	47,125	4,199	315	0,664	0,865	17,081
8		10	9,991	47,320	10,961	126	0,253	0,970	9,708

При этом абсолютная погрешность расчёта координаты утечки равна 4 м, массового расхода – 0,219 кг/с. Также наблюдается зависимость погрешности расчёта параметров утечки от координаты установки датчиков давления. Установлено, что чем ближе датчик находится к месту возникновения утечки, тем точнее работает метод, однако при этом уменьшается диапазон контролируемого участка трубопровода.

В ходе дополнительных экспериментов установлено, что координаты установки устройств измерения изменений во времени давления влияют на точность параметров утечки, причём большее воздействие на определение массового расхода оказывают показания устройств, установленных в первом и втором сечениях. Поэтому для улучшения точности определения координаты утечки по разработанному методу при наилучшей точности определения массового расхода рекомендуется изменять местоположения третьего и четвертого устройства измерения давления. Также следует учесть, что для обнаружения малых утечек с приемлемой точностью и с целью уменьшения неконтролируемой зоны нефтепровода в соответствии с модифицированным методом гидравлической локации утечки лучше использовать данный метод при эксплуатации нефтепроводов длиной менее 50 км.

Следует отметить, что возможны ложные срабатывания системы, поэтому при реализации данного метода необходимо оповещение об изменениях режима перекачки и параметров перекачиваемого продукта. К недостаткам метода также следует отнести наличие невидимой зоны нефтепровода, которая располагается в начале и в конце эксплуатируемого участка.

**В заключении** приводятся выводы по диссертационной работе.

1. Получены формулы определения параметров утечки из нефтепровода по профилю давления с учётом его геометрического профиля по отношению к горизонту с постоянным значением диаметра. Проведено моделирование в пакете COMSOL Multiphysics 3.5 с целью доказательства работоспособности данных формул.

2. Разработано устройство для измерения разности во времени давления в контролируемом сечении нефтепровода.

3. Предложен новый метод определения координаты и массового расхода утечки из нефтепровода, основанный на изменении во времени давления в контролируемом сечении трубы, который является модификацией метода гидравлической локации утечки.

4. Получены формулы определения параметров утечки в соответствии с предложенным модифицированным методом гидравлической локации. Проведены модельный и экспериментальный исследования с целью доказательства эффективности полученных формул.

В **приложении** приводятся копии патента на изобретения и актов внедрения результатов диссертационной работы.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в журналах из перечня российских рецензируемых научных журналов*

1. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения утечек в магистральных трубопроводах на основе их гидродинамических моделей // Известия Томского политехнического университета, 2006. Т. 309. № 7. С. 70–73.

2. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Повышение быстродействия алгоритмов определения утечки по изменению профиля давления вдоль трубопровода за счёт определённого расположения датчиков давления на контролируемом участке // Труды российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2011. № 1/262. С. 109–118.

3. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Оценка точности алгоритма определения параметров утечки. // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 4. С. 37–42.

4. Мамонова Т. Е. Учёт геометрического профиля нефтепровода при определении параметров утечки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 2. С. 85–102.

URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Mamonova/Mamonova\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Mamonova/Mamonova_1.pdf).

*Патент на изобретение*

5. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Способ измерения изменения давления в нефтепроводе транспортировки жидкости и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2426080. Патентообладатель: Государственное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», дата выдачи 10.08.2011.

*Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах*

6. Мамонова Т. Е. Обнаружение утечек из нефтепровода с использованием устройства для измерения изменений давления // Наука Красноярья. Приложение к журналу «В мире научных открытий». Красноярск: Изд-во «Научно-инновационный центр», 2012. № 5 (05). С. 102–112.

7. Мамонова Т.Е., Шкляр В.Н. Алгоритмы определения утечки в нефтепроводе с учётом его геометрического профиля. [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. Серия: Информационные технологии и системы управления. 2011. № 1. С. 261–268.

*Материалы конференций*

8. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование алгоритмов определения параметров утечек в трубопроводах, полученных на основе нестационарных математических моделей течения жидкости в них // Средства и системы автоматизации: материалы VI Международной научно-практической конференции, Томск, 1-3 ноября 2005 г. Томск: ТУСУР, 2005. С. 89–94.

9. Мамонова Т.Е. Алгоритм определения утечек в нефтепроводах на основе модифицированного метода гидравлической локации // Информационные и математические технологии в науке, технике, медицины: сборник всероссийской конференции с международным участием, Томск, 1-5 ноября 2012. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. Т. 2. С. 95–99.

10. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование математической модели процесса утечки жидкости в трубопроводе // Современные техника и технологии: труды XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 29 марта – 2 апреля 2005. Томск: Изд. ТПУ, 2005. С. 275–277.

11. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование влияния координаты установки реальных датчиков давления на точность определения параметров утечек заданной интенсивности в магистральных трубопроводах // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 27 февраля – 1 марта 2007. Томск: ТПУ, 2007. С. 331–332.

12. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование влияния изменения параметров нефтепродукта и нефтепровода на процесс определения утечки // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 3-5 марта 2010. Томск: СПб Графикс, 2010. С. 60–61.

13. Степанченко Т.Е. Моделирование процессов движения жидкости в трубопроводе в пакете COMSOL 3.5 MULTIPHYSICS // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23-24 марта 2011. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 62–65.

14. Мамонова Т.Е. Алгоритмы определения параметров утечки, основанные на измерении изменения давления в трубе во времени // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 21-22 марта 2012. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. С. 28–30.

15. Мамонова Т.Е. Повышение чувствительности алгоритмов определения параметров утечки в нефтепроводе. [Электронный ресурс] // VIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука», посвященная 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. 2012. № 1. С. 261–268. URL: [http://conf.sfu-kras.ru/conf/mn2012/sect?sec\\_id=744](http://conf.sfu-kras.ru/conf/mn2012/sect?sec_id=744).

Подписано к печати 20.11.2012. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,05.  
Заказ 1140-12. Тираж 100 экз.




---

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательство Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURENCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)