

На правах рукописи

НИЗАМУТДИНОВ Руслан Ильдарович



**МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ
НЕФТЕПРОВОДОВ БЕЗ САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКОВ НА
ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Проскуряков Руслан Максимович

Официальные оппоненты:

Мальхина Галина Федоровна

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра «Измерительных информационных технологий», профессор

Сепп Юрий Иосифович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра «Робототехники и автоматизации производственных систем», доцент

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится 12 апреля 2017 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт – Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт – Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан «10» февраля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета, проф.



ГАБОВ
Виктор Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В Российской Федерации на данный момент срок эксплуатации более половины магистральных нефтепроводов превысил проектный или уже приближается к нему. Данный факт подчеркивает огромную вероятность возникновения утечек на магистральных нефтепроводах. Поэтому крайне актуальна разработка мер по повышению надежности магистральных нефтепроводов, а также предотвращению аварий и их последствий.

Возможный ущерб в результате аварии можно уменьшить путем оперативного обнаружения утечки с потерями перекачиваемого продукта. Поскольку магистральный нефтепровод является составной частью линейного сооружения большой протяженности, то особенно важно определение не только факта наличия утечки, но и его точного местоположения на трубопроводе.

Над решением проблемы занимались множество известных ученых и крупных компаний. Первым отечественным автором, который смог не только объяснить возможные причины возникновения разрывов на трубопроводах, но и смог предложить метод обнаружения, принято считать Н.Е. Жуковского. В данной области исследований работали следующие отечественные авторы: Л.С. Лейбензон, А.Г. Гумеров, А.В. Бабков, Л.Б. Кублановский, И.А. Чарный, В.Б. Галеев, М.В. Лурье, К.В. Черняев, Е.В. Вязунов, В.Н. Антипьев, К.А. Забелы, А.К. Галлямов, А.С. Джарджиманов, А.С. Шумайлов, А.А. Гольянов, Р.Н. Столяров, В.Е. Попадько, Ю.Д. Земенков, А.А. Коршак, Л.А. Дымшица, В.А. Саенко и другие, а также ряд крупных компаний, таких как «Транснефть», «Татнефть», Лукойл, Shell, Total и другие, но, несмотря на все это, проблема до сих пор еще не решена.

Существует огромное число различных методов и способов обнаружения утечек на магистральных трубопроводах, основанных на физических явлениях и различных принципах. Их анализ показывает, что нет какого-то единого универсального метода, удовлетворяющего всем необходимым критериям,

предъявляемым к современным методам обнаружения утечек на нефтепроводах, что является весьма актуальным вопросом.

Актуальным на сегодняшний день является метод контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории.

Целью диссертационной работы является развитие нового метода неразрушающего контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе генерации волны давления в нефтепроводе, позволяющего обнаруживать дефекты при стационарных и переходных режимах работы нефтепровода.

Для реализации данной системы поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ современных методов контроля целостности нефтепроводов, получивших широкое применение.

2. Обоснование нового метода неразрушающего контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории, заключающейся в генерации волны давления.

3. Описание математической модели нестационарного движения жидкости с учетом сил вязкого трения.

4. Реализация компьютерного моделирования стационарного и переходного режимов работы нефтепровода и процессов, протекающих в нем, на языке Delphi.

5. Выявление эффективности предложенного метода на основе полученных зависимостей предельной интенсивности утечки от различного рода параметров.

6. Обобщение полученных результатов для практических рекомендаций к промышленной реализации.

Идея работы заключается в генерации волны давления (гидроудара), идентификации утечек на основе эффекта распада волн в месте предполагаемого дефекта и нахождении его местоположения на рассматриваемом участке нефтепровода. Для обнаружения утечки в конце рассматриваемого участка магистрального нефтепровода создается волна (гидроудар) путем частичного перекрытия запорной арматуры начинает распространяться вверх по нефтепроводу со скоростью сопоставимой к скорости звука в

нефтепроводе. В момент времени, когда волна повышенного давления проходит через сечение, в котором предположительно имеется утечка, происходит распад первоначальной волны на две: одна волна (проходящая волна) распространяется к началу трубопровода, а другая – отраженная волна отражается от места утечки и распространяется к концу трубопровода. Критерием наличия утечки на участке нефтепровода будем считать наличие отраженной волны.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложено численное решение системы уравнений нестационарного течения жидкости в нефтепроводе методом характеристик, позволяющим вычислить давление и расход в любой точке контролируемого участка нефтепровода, реализованное путем моделирования на языке Delphi.

2. Предложена и обоснована методика контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории.

3. Исследована эффективность предложенного метода путем получения новых зависимостей предельной интенсивности утечки от местоположения утечки, от скорости перекачки жидкости при различных чувствительностях датчиков, от расхода и диаметра нефтепровода, от свойств перекачиваемого продукта.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты, полученные методом обнаружения утечек из нефтепровода на основе гидродинамической волновой теории, могут лежать в основе промышленной реализации современных систем обнаружения утечек, которая способна работать как при стационарных, так и при переходных режимах работы нефтепровода. За счет внедрения метода можно исключить ложные сигналы о наличии утечки. Разработанный метод может быть легко адаптирован уже в существующую систему обнаружения утечек (СОУ).

В научном **анализе теоретических работ** представлены современные методы обнаружения утечек на линейных участках магистрального нефтепровода. В диссертационной работе приведены три классификации методов контроля целостности

нефтепроводов, статистика аварийности, требования, предъявляемые к системам.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе применялись теория нестационарного движения жидкости при учете сил вязкого трения с накладыванием краевых условий и условий сопряжения, математическое моделирование режима работы нефтепровода и возникновения утечки, а также компьютерное моделирование на языке Delphi в среде Object Pascal, проведение экспериментальных исследований.

Степень достоверности выдвинутых научных положений, сделанных выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, основываются на теории неустановившегося движения слабо сжимаемой жидкости с учетом сил вязкого трения, апробированных методах исследований, на результатах промышленных и теоретических исследований.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Область исследования, связанная с методом неразрушающего контроля магистральных нефтепроводов, соответствует паспорту специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, а именно: пункту 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»; пункту 2 «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля».

Апробация работы.

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на выступлении на международной конференции молодых ученых «Ressourcen für die Mobilität» в Фрайбергской горной академии (TU Bergakademie Freiberg), г. Фрайберг, Германия, 2013 г. с последующими публикациями в сборниках докладов по результатам научных конференций.

Реализация результатов работы.

Предлагаемый метод контроля целостности магистральных нефтепроводов и компьютерное моделирование обнаружения утечек с помощью предложенного метода приняты к использованию в компании АО «Транснефть - Урал», имеется справка о внедрении результатов исследования по диссертации.

Личный вклад автора:

1. Проведен анализ современных систем обнаружения утечек и средств диагностики магистральных нефтепроводов, предложенных отечественными и зарубежными авторами.

2. Предложена и обоснована методика неразрушающего контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории.

3. Внедрено компьютерное моделирование предложенного метода в существующую систему обнаружения утечек в «Черкасском РНУ» компании АО «Транснефть - Урал».

4. Получены зависимости предельной интенсивности утечки от ее местоположения, от скорости перекачки жидкости при различных чувствительностях датчиков, от расхода перекачки, от диаметра нефтепровода, от свойств перекачиваемого продукта.

5. Проведены эксперименты на лабораторном стенде.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано три научные работы в изданиях, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения, которые изложены на 116 страницах, содержит 35 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 136 наименований и 1 приложение.

Во введении представлена сущность диссертационной работы, обоснование актуальность выбранной темы исследования, основные результаты работы, научная новизна, практическая ценность, апробация результатов исследования.

В первой главе приводятся обзор нынешнего технического состояния разветвленной сети магистральных нефтепроводов

Российской Федерации и основные причины возникновения утечек на нефтепроводах.

Во второй главе представлен обзор и проведен анализ современных отечественных и зарубежных методов обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах. Рассмотрена основная классификация современных методов обнаружения утечек.

Указаны основные требования, предъявляемые к современным системам контроля целостности нефтепроводов.

В третьей главе рассмотрена теория нестационарного режима работы нефтепровода для разработки метода обнаружения утечек, приведены основные уравнения движения потока жидкости. Рассмотрены краевые условия и условия сопряжения для моделирования утечки на нефтепроводе. Сделано моделирование работы участка магистрального нефтепровода. Проведена оценка точности погрешности решений системы уравнений с помощью метода характеристик.

В четвертой главе раскрыта сущность метода контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории, описан способ генерации волны давления с помощью частичного перекрытия или резкого закрытия задвижки в конце исследуемого участка нефтепровода. Представлены результаты математического моделирования метода контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе предложенного метода. Проведен анализ эффективности предложенного метода контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе выявления зависимостей предельной интенсивности утечки от различного рода параметров.

В пятой главе представлено описание экспериментального стенда для проведения исследований с целью подтверждения работоспособности предложенного метода. Указаны требования, предъявляемые к измерительной аппаратуре. Приведены результаты испытаний на экспериментальном стенде, а также их анализ.

Предложены пути повышения эффективности метода обнаружения утечек на основе гидродинамической волновой

теории, а также указана практическая рекомендация к его применению.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Благодарности.

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность за помощь, оказанную на различных этапах работы, научному руководителю, д.т.н. Проскуракову Р.М. и сотрудникам кафедры электроэнергетики и электромеханики «Санкт-Петербургского Горного Университета».

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Система обычных дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы в нефтепроводе, составленная для каждого отдельного параметра в бесконечно малой области рабочей точки при постоянных значениях остальных параметров позволяет осуществить представительное имитационное моделирование.

С учетом уравнений движения сплошной среды и характеристик жидкости можно получить систему уравнений, описывающей неустановившееся движение слабо сжимаемой жидкости с учетом сил вязкого трения:

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_0 u(x,t) |u(x,t)|}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x) \end{cases}, \quad (1)$$

где p – давление в нефтепроводе, МПа;

ρ_0 – плотность при стандартных условиях, кг/м³;

c – скорость распространения волны в нефтепроводе, м/с;

u – скорость движения потока жидкости, м/с;

$\lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления;

d – диаметр нефтепровода, мм;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\alpha(x)$ – угол наклона оси нефтепровода к горизонту, радиан.

Полученная система уравнений применяется для моделирования, а также для описания движения жидкостей в нефтепроводах. Решение данной системы можно получить численно с использованием метода характеристик.

Для этого рассмотрим треугольник АМВ, который образован двумя характеристиками $x + ct = const$ и $x - ct = const$ (Рисунок 1), при этом следующая система уравнений будет верной:

$$\begin{cases} (p_M + \rho_0 c u_M) = p_A + \rho_0 c u_A - c \Delta t \left[\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_0 u |u|}{2} + \rho_0 g \sin \alpha \right]_A, \\ (p_M - \rho_0 c u_M) = p_B - \rho_0 c u_B + c \Delta t \left[\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_0 u |u|}{2} + \rho_0 g \sin \alpha \right]_B \end{cases}, \quad (2)$$

где Δt – рассматриваемый шаг по времени, с.

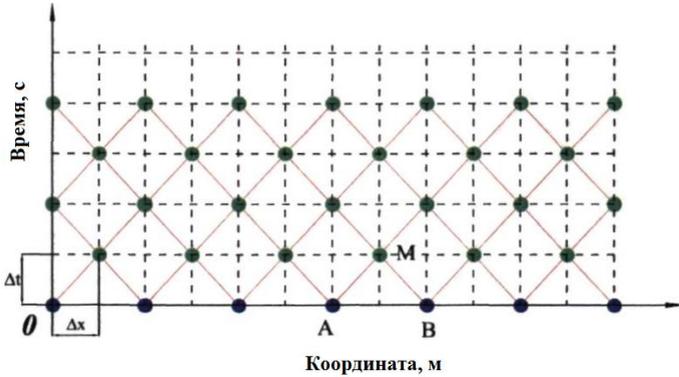


Рисунок 1 – Схема расчета при помощи метода характеристик

С помощью полученных уравнений находят значения p и u в любой точке рассматриваемого нефтепровода в момент времени t .

На модель работы нефтепровода накладываются краевые условия:

$$\begin{cases} (p_K - \rho_0 c u_K) = p_B - \rho_0 c u_B + c \Delta t \left[\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_0 u |u|}{2} + \rho_0 g \sin \alpha \right]_B, \\ F(p_K, u_K) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $F(p_K, u_K) = 0$ – связь, моделирующая левое граничное условие, между давлением p_K и скоростью u_K в начальном сечении трубопровода (Рисунок 2).

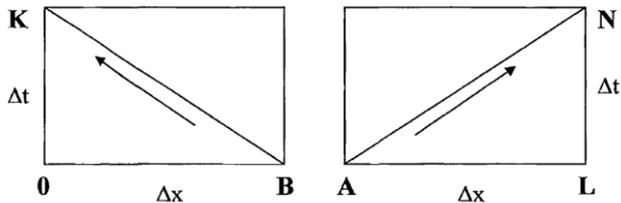


Рисунок 2 – Расчет давления p и скорости u в крайних точках

Аналогично в точке N сечения накладываются краевые условия.

На математическую модель для моделирования возникшей утечки в сечении x_0 накладываются условия сопряжения, при этом система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} p^-(x_0, t) = p^+(x_0, t) \\ Q^-(x_0, t) - Q^+(x_0, t) = q \end{cases} \quad (4)$$

Верхнее уравнение показывает непрерывность давления в месте утечки $p^-(x_0, t) = p^+(x_0, t)$, а нижнее уравнение показывает изменение расхода на величину возникшей утечки q . Надстрочный индекс «-» говорит, что гидродинамический параметр потока жидкости находится до места возникшей утечки, а индекс «+», следовательно, после утечки.

Рассмотрим участок магистрального нефтепровода диаметром 1020x10 мм, длиной 45 км, перекачивающий нефть плотностью 850 кг/м³ и вязкостью 16 сСт.

Решение системы уравнений, описывающей неустановившееся движение слабо сжимаемой жидкости, учитывающей силу вязкого трения, с учетом начальных и граничных условий представлено на рисунке 3.

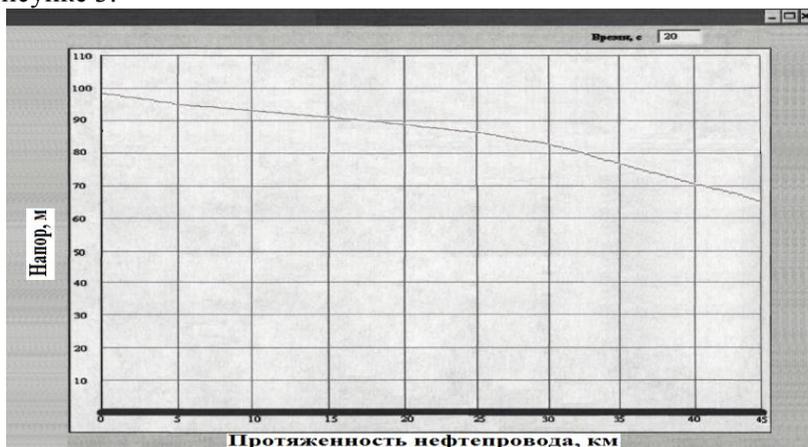


Рисунок 3 – Характеристика напора при стационарном режиме работы участка нефтепровода

На рисунке 3 виден стационарный режим работы рассматриваемого участка нефтепровода (без каких-либо встроенных возмущений).

Представим, что в конце участка произошел гидравлический удар, то есть произошло перекрытие сечения нефтепровода (закрытие задвижки). Тогда граничное условие в конце участка магистрального нефтепровода будет представлено в виде: $u(L, t) = 0$.

На рисунке 4 продемонстрировано моделирование гидравлического удара на разных участках магистрального нефтепровода.

Рассмотрим нефтепровод с образовавшейся утечкой интенсивностью q в сечении x_0 .

Полученное решение для рассматриваемого участка нефтепровода длиной 45 км с утечкой на 24 км до и после возникновения утечки представлено на рисунке 5.

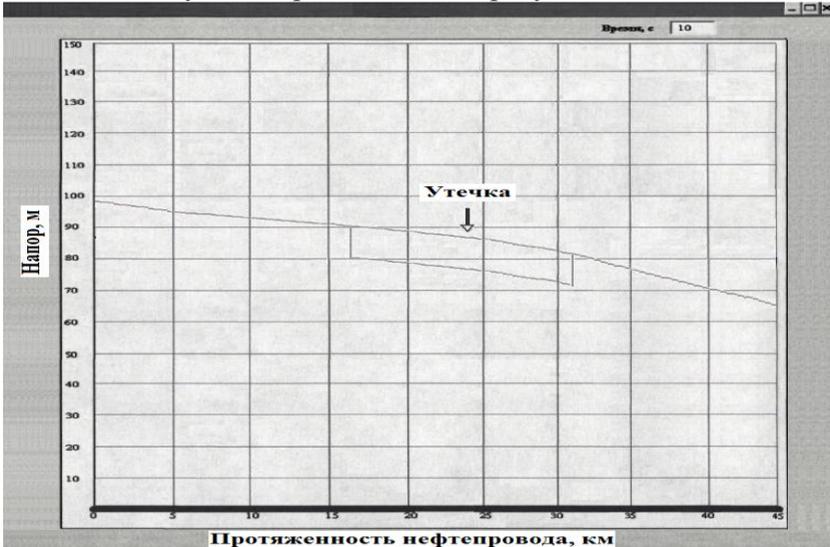


Рисунок 5 – Результаты расчета местоположения утечки на участке нефтепровода

Из полученных результатов видно, что с помощью решения системы обычных дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы в нефтепроводе можно осуществить представительное имитационное моделирование.

2. Использование в качестве основы метода контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков гидродинамической волновой теории с генерацией волны повышенного давления, распадающейся в месте предполагаемой утечки на проходящую волну и отраженную, распространяемую к концу рассматриваемого участка нефтепровода. Местоположение утечки пропорционально времени с момента генерации сканирующей волны давления до

момента поступления отраженной волны, регистрируемой датчиком давления. Работоспособность предложенного метода реализована в компьютерной программе, адекватность подтверждена на физическом стенде.

Метод контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков на основе гидродинамической волновой теории подразумевает генерацию волны повышенного давления в нефтепроводе, а также идентификацию отраженных волн от места предполагаемой утечки. Подобный метод контроля целостности впервые предложил Н.Е. Жуковский. В 1879 году Жуковский на Московской водокачке провел исторические опыты по изучению гидравлического удара.

Суть метода генерации состоит в следующем: на рассматриваемом участке нефтепровода $[x_1, x_2]$, перекачивающего нефть или нефтепродукт, возникла утечка в сечении x_0 . Для обнаружения утечки в конце рассматриваемого участка магистрального нефтепровода в сечении x_2 создается волна повышенного давления или, другими словами, создается гидроудар (см. Рисунок 6). Волну повышенного давления можно создать с помощью частичного перекрытия или резкого закрытия задвижки в конце исследуемого участка нефтепровода. Сгенерированная волна начинает распространяться вверх по нефтепроводу со скоростью сопоставимой к скорости звука в нефтепроводе. В момент времени, когда волна повышенного давления проходит через сечение x_0 , в котором предположительно имеется утечка происходит следующего рода явление: утечка на участке нефтепровода представляет собой сброс повышенного давления, поэтому первоначальная волна давления распадается на две волны. Одна волна (проходящая волна) распространяется к началу нефтепровода сечению x_1 , а другая – волна разрежения или отраженная волна, которая отражается от места утечки и распространяется к концу нефтепровода сечению x_2 . Если на рассматриваемом участке нефтепровода отсутствуют утечки, то не происходит явление распада волн и соответственно отсутствуют отраженные волны. Критерием наличия утечки на

участке нефтепровода будем считать наличие отраженной волны. В момент прихода волны разрежения в конец нефтепровода сечением x_2 можно наблюдать скачкообразное падение давления. По резкому и скачкообразному падению давления фиксируется факт наличия утечки на рассматриваемом участке нефтепровода.



Рисунок 6 – Характер распространения волн давления в нефтепроводе с утечкой

С целью определения места утечки необходимо установить таймер на датчики давления, который будет фиксировать время с момента генерации сканирующей волны давления до момента поступления отраженной волны.

Зная точное время прохождения отраженной волны и скорость звука в рассматриваемом участке нефтепровода, найдем расстояние до предполагаемой утечки $s = x_2 - x_0$ по приведенной ниже формуле:

$$s = \frac{c \cdot t}{2} , \quad (5)$$

где t – время от момента появления гидравлического удара до момента прихода отраженной волны в конец нефтепровода.

Для моделирования режима работы магистрального нефтепровода воспользуемся системой уравнений (1) со следующими начальными условиями:

$$\begin{cases} u(x,0) = \frac{4Q(x_2,0)}{\pi d^2} + \mu \frac{4s}{\pi d^2} \sqrt{2 \frac{p(x_0,0) - p_{атм}}{\rho}}, & x_1 \leq x < x_0 \\ u(x,0) = \frac{4Q(x_2,0)}{\pi d^2}, & x_0 \leq x \leq x_2 \end{cases}, \quad (6)$$

где Q – объемный расход жидкости, м³/с;

s – площадь сечения утечки на нефтепроводе, м²;

$p_{атм}$ – атмосферное давление, Па.

$$\begin{cases} p(x,0) = p(x_2,0) + i_2(x_2 - x_0)\rho g + i_1(x_0 - x)\rho g, & x_1 \leq x < x_0 \\ p(x,0) = p(x_2,0) + i_2(x_2 - x), & x_0 \leq x \leq x_2 \end{cases} \quad (7)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} p(x_1, t) = p(x_1, 0) = p(x_2) + (i_2(x_2 - x_0) + i_1 x_0)\rho g = const \\ u(x_2, t) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

с условиями сопряжения в сечении x_0 :

$$\begin{cases} p^-(x_0, t) = p^+(x_0, t) \\ Q^-(x_0, t) - Q^+(x_0, t) = \mu_0 s \sqrt{2 \frac{p^+(x_0, t) - p_{атм}}{\rho}} \end{cases} \quad (9)$$

В конце рассматриваемого участка нефтепровода устанавливаем датчик, который будет фиксировать момент прихода отраженной волны давления. Датчик должен реагировать на изменение давления, а также фиксировать время его скачка. Для датчика введем минимальный скачок давления (порог чувствительности). Датчик при минимальном скачке обязан идентифицировать приход волны давления. Другими словами, волна фиксируется в том случае, если амплитуда давления превышает установленное пороговое значение:

$$p(x_2, t) - p(x_2, t - \Delta t) \geq D_{порог} \quad (10)$$

где $p(x_2, t)$, $p(x_2, t - \Delta t)$ – давления в конце участка нефтепровода в моменты времени t , $t - \Delta t$;

$D_{порог}$ – пороговое значение, Па.

Метод характеристик отличается большим количеством итераций, производимых на компьютере. Для решения полученной системы уравнений потребовалось написать компьютерной

программы на языке программирования Delphi в среде Object Pascal. Написанная программа позволяет продемонстрировать возможности предложенного метода.

Программа написана на основе математической модели, приведенной ранее, способной моделировать работу участка нефтепровода с различными параметрами перекачки. Так в рамках программы, возможно, поменять физические свойства перекачиваемой жидкости, смоделировать утечку различной интенсивности, а также поменять ее местоположение на рассматриваемом участке нефтепровода.

Посредством регулирования прикрытия задвижки программа позволяет смоделировать различную сканирующую волну давления.

На рисунке 7 продемонстрирован пример работы компьютерной программы. Изогнутая кривая отображает первоначальную линию гидравлического уклона на рассматриваемом участке нефтепровода длиной 45-км с наличием утечки на 17 км. Стрелка указывает предполагаемое место утечки.

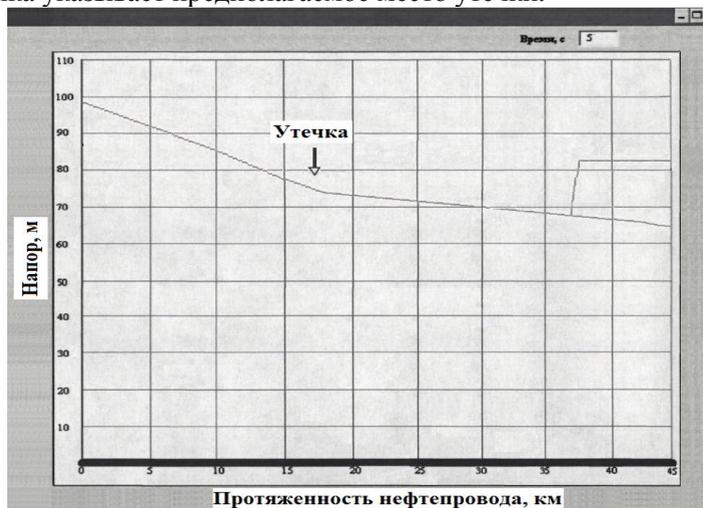


Рисунок 7 – Демонстрация на дисплее ПК предложенного метода контроля целостности нефтепровода

На приведенном рисунке видно, что скачок давления на фронте волны постепенно затухает из-за наличия потерь энергии на вязкое трение в нефтепроводе. Данное явление при перекачке высоковязких нефтепродуктов ярко выражено.

Изменяя исходные данные для моделирования (длину и диаметр нефтепровода, физические свойства перекачиваемой жидкости, размеры утечек и других параметров), можно оценить диапазон утечек, который способен обнаружить метод сканирования волн давления, а также определиться с оптимальными условиями использования данного метода.

Для подтверждения работоспособности предложенного метода неразрушающего контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории был собран экспериментальный стенд для проведения исследований (рисунок 8).

Он представляет собой трубопровод диаметром $d_y = 1/2$, который смонтирован в форме змейки в три ряда и закреплен на жесткой опоре. Толщина стенок труб составляет $\delta = 2,5$ мм.

На трубопроводе закреплены датчики давления с помощью тройников. Поворот лабораторного нефтепровода осуществлен посредством уголка с углом поворота 90° .

Для имитации дефектов в нефтепроводе использовались специальные вставки, которые имели отверстия в виде щелей (размерами 1x2 и 2x3 мм) и отверстия в виде круга (диаметром 1 и 2 мм). Длина нефтепровода в экспериментальной установке составила 96,60 м.

Нефтепровод заполняется водой путем его прокачки с помощью компрессора. На продемонстрированной экспериментальной установке были проведены лабораторные испытания.

1. Перекачиваемая жидкость в нефтепроводе находится в состоянии покоя. Открывая кран, создается импульс давления, сообщающий полость трубопровода с ресивером компрессора, который заполнен воздухом под давлением.

На рисунке 9 приведен график распределения давления в имитируемом нефтепроводе с утечкой. В примере датчик давления, установлен в начале нефтепровода. Смоделированная утечка на 17 км отражается на картине колебания давления.

2. Опыт проводился при работающем насосе, режим открыванием или закрыванием крана создавался гидроудар (импульс отрицательного давления). Датчики давления устанавливались в начале и конце диагностируемого нефтепровода (рисунок 10).

В результате проведенных экспериментов удалось установить, что предложенный метод контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков на основе гидродинамической волновой теории позволяет определять наличие утечки на имитируемом нефтепроводе, несмотря на погрешность приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи по совершенствованию метода контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Из анализа современных методов и систем обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах можно сделать вывод, что на данный момент, несмотря на высокий уровень технического прогресса, не существует надежного и универсального метода обнаружения утечек, способного с высокой точностью идентифицировать дефекты, поэтому применяются комбинации нескольких методов.

2. Метод контроля целостности магистральных нефтепроводов на основе гидродинамической волновой теории с генерацией волны давления подходит для обнаружения утечек крупных размеров, а также для определения ее местоположения. В диссертационной работе приведены теория метода, результаты численного моделирования утечки, и даны возможные варианты повышения эффективности предложенного метода.

3. Метод контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков с генерацией волны повышенного давления рекомендован к промышленному использованию. В месте предполагаемой утечки волна распадается на проходящую волну и

отраженную волну, распространяемую к концу рассматриваемого участка нефтепровода. В качестве критерия наличия утечки на участке нефтепровода принимаем наличие отраженной волны. Метод применим как для стационарных режимов работы нефтепровода, так и для нестационарных.

4. Установлена применимость метода контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков на основе гидродинамической волновой теории с генерацией волны повышенного давления. Так, сделана оценка эффективности предложенного метода обнаружения утечек в зависимости от различных параметров, по итогам которой можно свидетельствовать о наибольшей надежности обнаружения утечек на участках нефтепровода небольшого диаметра и длины, при скорости перекачки в районе 0,7-1,2 м/с и перекачке невысоковязких продуктов (с целью устранения потерь на трение).

Публикации по теме диссертации:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Низамутдинов Р.И. Система обнаружения утечек / Р.И. Низамутдинов, Р.И. Низамутдинов // Записки Горного Института «Проблемы рационального природопользования». – Т.182. – 2009. – С. 255-258.

2. Низамутдинов Р.И. Анализ современных методов обнаружения утечек на магистральных трубопроводах / Р.И. Низамутдинов, Р.М. Проскуряков // Естественные и технические науки. – 2015. – № 12. – С. 125-127.

3. Низамутдинов Р.И. Математическая модель метода контроля утечек на магистральных нефтепроводах на основе гидродинамической волновой теории / Р.И. Низамутдинов, Р.М. Проскуряков // Естественные и технические науки. – 2016. – № 4. – С. 156-160.

РИЦ Горного университета. 20.01.2017. 3.37. Т.100 экз.

199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2

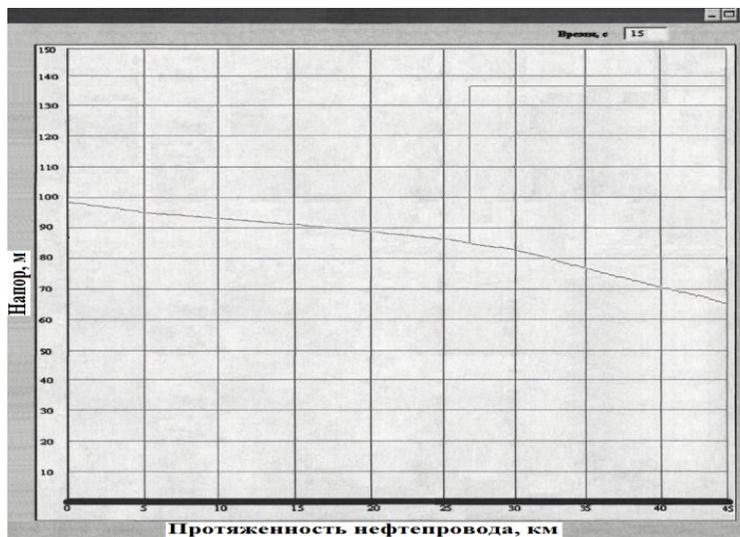
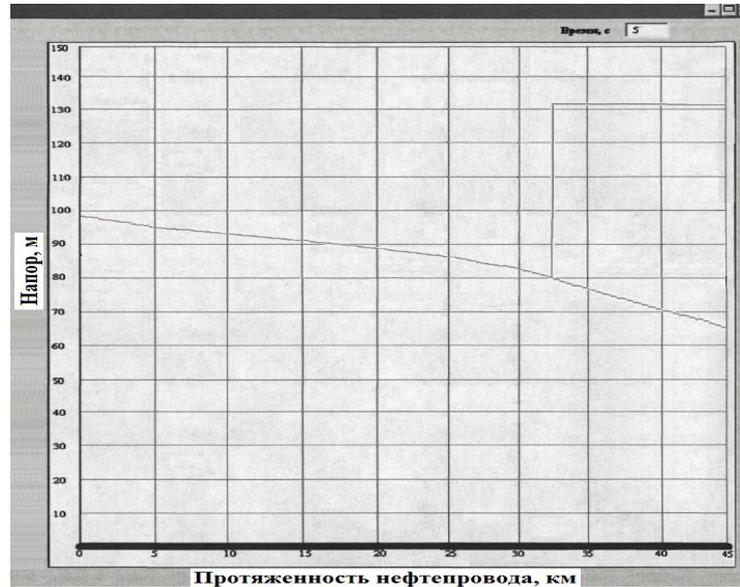


Рисунок 4 – Моделирование гидравлических ударов в нефтепроводе на различных его участках



Рисунок 8 – Стенд физического моделирования процесса перекачки жидкости



Рисунок 9 – График распределения давления при утечке, датчик установлен в начале нефтепровода

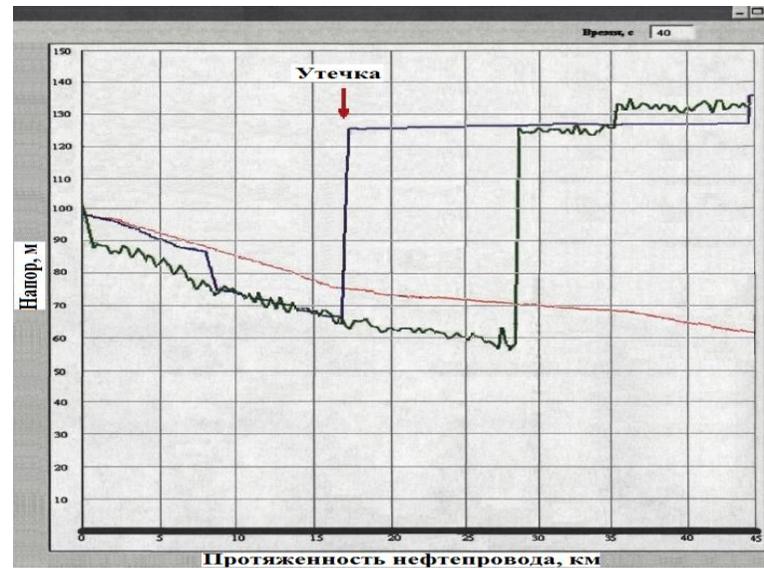


Рисунок 10 – График распределения давления при гидроударе, датчик установлен в начале и конце нефтепровода