

На правах рукописи

НИЗАМУТДИНОВ Роберт Ильдарович



**ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧЕК НА НЕФТЕПРОВОДАХ С
БЕЗНАПОРНЫМИ УЧАСТКАМИ НА ПРИНЦИПАХ
КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА**

*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:

Мазин Валерий Дмитриевич

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

Кащеев Сергей Васильевич

кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», научное отделение №1, заместитель начальника

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

Защита диссертации состоится 26 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 24 февраля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



Габов
Виктор Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Актуальность проблемы обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах обусловлена ужесточением требований к охране окружающей среды. Особую актуальность проблема обретает в свете большой изношенности отечественных трубопроводов и увеличения числа незаконных врезок. Несмотря на осуществление работы по реконструкции линейных частей и разработке новых методов и способов предупреждения аварийных ситуаций, не приходится говорить о снижении показателя аварийности на магистральных нефтепроводах.

Над решением данной проблемы заняты крупнейшие отечественные компании, среди которых ОАО "АК Транснефть", АО "Транснефть – Диаскан", а также зарубежные компании, такие как Chevron, Exxon, Tenneco, Shell, Trans Canada и другие. Вклад в разработку новых методов, средств контроля и обнаружения места утечек и дефектов внесли Новоселов В.Ф., Зверева Т.В., Лурье М.В., Вязунов Е.М., Коршак А.А., Григорьев П.А., Кравченко В.Ф., Черняев К.В., Шумайлова А.С., Васин Е.С., Валевич М.И., Максимов И.Л., Адаменко А.А., и др. Стоит отметить, что существующие системы обнаружения утечек на магистральных трубопроводах не обладают универсальностью и достаточной надежностью.

В связи с этим необходимо установить взаимосвязь между параметрами потока и параметрами, характеризующими утечку, и разработать систему обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах, работающую как при установившихся, так и при переходных режимах работы, с учетом полостей пара и газа внутри трубопровода.

Цель работы.

Разработка автоматизированной системы для оперативного обнаружения утечек жидких углеводородов из магистральных трубопроводов с безнапорными участками как при установившихся, так и при неустановившихся режимах перекачки на основе нового метода и алгоритма неразрушающего контроля целостности

нефтепроводов на принципах контроля основных параметров потока перекачиваемой жидкости – давления и расхода в начале и конце диагностируемого участка.

Для реализации предложенной системы были поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ прогностических методов и методов обнаружения утечек жидких углеводородов во время эксплуатации транспортных систем.

2. Описание математической модели неустановившегося режима движения слабо сжимаемой жидкости с учетом возможного образования парогазовых полостей в магистральных трубопроводах.

3. Разработка и обоснование метода и алгоритма неразрушающего контроля целостности нефтепроводов с безнапорными участками на принципах контроля основных параметров потока – давления и расхода в начале и конце диагностируемого участка как при установившихся, так и при неустановившихся режимах работы.

4. Реализация разработанного алгоритма в программном комплексе.

5. Проверка работоспособности программного комплекса путем имитационного моделирования различных режимов эксплуатации магистрального трубопровода.

6. Разработка структуры системы и выбор комплекса технических средств для сбора, преобразования и подготовки требуемой технологической информации, на базе которой будет определяться герметичность магистрального трубопровода.

Идея работы заключается в определении изменения количества жидкости в магистральном трубопроводе наряду с измерением значений расходов жидкости в двух точках – на входе и выходе диагностируемого участка трубопровода. С этой целью в начале и в конце рассматриваемого участка трубопровода предлагается установить расходомеры и датчики давления. На основе значения давлений рассчитывается изменение количества жидкости на рассматриваемом участке трубопровода и количество жидкости закаченной и отобранной из трубопровода. По дисбалансу рассчитанной разницы (по рассчитанным расходам) и разницы,

измеряемой расходомерами, судят о наличии или отсутствии утечки. В случае превышения дисбалансом заданной величины уставки срабатывает сигнал об утечке.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе использовались методы классической теории неустановившихся процессов с учетом возникающей в трубопроводе полости пара и газа, математическое и компьютерное моделирование.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Область исследования, связанная с разработкой системы обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах, соответствует паспорту специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки) п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», п. 2 «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля».

Научная новизна диссертационной работы состоит в обосновании нового метода неразрушающего контроля целостности нефтепроводов с безнапорными участками на принципах контроля основных параметров потока – давления и расхода в начале и конце диагностируемого участка. Наличие или отсутствие утечки перекачиваемой жидкости определяется по изменению количества жидкости внутри диагностируемого участка магистрального трубопровода и количества жидкости закаченной и отобранной на нем. С этой целью в работе наряду с классической теорией неустановившихся процессов применяется теория, учитывающая полости пара и газа, образуемые в трубопроводе после временных перевальных точек.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке метода и алгоритма неразрушающего контроля целостности нефтепроводов с безнапорными участками на принципах контроля основных параметров потока – давления и

расхода в начале и конце диагностируемого участка как при установившихся, так и при неуставившихся режимах с учетом возможного образования полостей пара и газа. Алгоритм был реализован в программном комплексе.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались на международной конференции молодых ученых «Ressourcen fur die Mobilitat» 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 в диссертации метод обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах принят для внедрения на магистральных нефтепроводах компании АО «Транснефть-Урал».

Личный вклад соискателя.

1. Проведен анализ современных отечественных и зарубежных патентных разработок в области обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах, сформулированы и обоснованы научные положения.

Разработан и обоснован метод неразрушающего контроля целостности нефтепроводов с безнапорными участками на принципах контроля основных параметров потока – давления и расхода в начале и конце диагностируемого участка как при установившихся, так и при неуставившихся режимах работы

2. Разработан и реализован в программном комплексе алгоритм обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах, основанный на математической модели неуставившегося режима движения слабо сжимаемой жидкости с учетом возможного образования пустот пара и газа.

3. Осуществлена проверка работоспособности программного комплекса путем имитационного моделирования различных режимов эксплуатации магистрального трубопровода.

4. Разработана структура системы и выбран комплекс технических средств для сбора, преобразования и подготовки

требуемой технологической информации, на базе которой будет определяться герметичность магистрального трубопровода.

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

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, которые изложены на 114 страницах текста, содержит 36 рисунков, 6 таблиц, список использованных источников из 115 наименований.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены основные причины нарушения герметичности магистральных трубопроводов. В результате изучения материалов представлены основные требования, предъявляемые к системам обнаружения утечек, и предложена классификация известных методов обнаружения утечек жидкости из трубопровода с учетом особенностей их работы и возможностей их применения.

Во второй главе представлены современные отечественные и зарубежные патентные разработки в области обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах. В ходе их анализа представлены лучшие изобретения данной направленности, выявлены их возможности и определены недостатки.

В третьей главе с учетом выявленных недостатков существующих систем разработана структурная схема новой автоматизированной системы обнаружения утечек жидкости, в основе которой лежит расчет неустановившихся процессов и учет образования в трубопроводе полостей пара и газа. Представлена компьютерная программа, которая реализует расчет переходных режимов на участке трубопровода.

В четвертой главе рассмотрена структура программного комплекса системы. Предложен алгоритм расчета нестационарных режимов. Проведена оценка погрешности расчетов нестационарных процессов в трубопроводе, которые производятся в предлагаемом программном комплексе.

В пятой главе описаны требования, предъявляемые к системе сбора информации и системе управления объектом. Рассмотрено возможное построение системы на действующих нефте- и

нефтепродуктопроводах, предложены подходящие для разработанной системы первичные преобразователи.

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

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие положения:

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Гидродинамические процессы в нефтепроводе адекватно описываются классической системой простых дифференциальных уравнений для бесконечно малой области рабочей точки, решение которой осуществляется методом «сквозного счета» параметров потока.

Разрабатываемый метод обнаружения утечек из трубопровода отличается от ныне известных учетом образования или исчезновения парогазовых полостей в трубопроводе, образуемых в случае снижения значения давления в жидкости до значения упругости насыщенных паров жидкости. При их возникновении сечение трубопровода заполнено не полностью, а течение жидкости является самотечным или безнапорным.

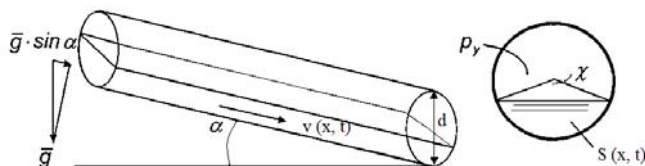


Рисунок 1 – Схема безнапорного участка трубопровода

На рисунке 1 показана схема безнапорного движения вязкой несжимаемой жидкости с вязкостью μ и плотностью ρ вдоль трубопровода, имеющего внутренний диаметр d , шероховатость поверхности Δ и расположенного к горизонту под углом наклона α . На представленном участке значение давления транспортируемой жидкости постоянно и по своему значению равно упругости его насыщенных паров p_y . В этом случае неизвестны скорость $v(x, t)$ и площадь заполненной части сечения трубопровода $S(x, t)$.

Самотечное или безнапорное течение описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho v S}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v^2 S + \rho g \cos \alpha \cdot \int_0^S S dh \right) = -\rho g S \sin \alpha - \frac{\rho g S \cos \alpha}{C_{ш}^2 R_r} \cdot v |v|.$$

где $h(S)$ – глубина заполнения жидкостью сечения рассматриваемого трубопровода; $C_{ш}$ – коэффициент Шези и $R_r = R_r(S)$ – гидравлический радиус, который равен отношению заполненной жидкостью площади сечения трубы S к смоченному периметру P_c :

$$R_r = \frac{S}{P_c} = \frac{1/2 \cdot R^2 (\chi - \sin \chi)}{R \cdot \chi} = \frac{d}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \chi}{\chi} \right), \quad (2)$$

где $R = d/2$ – радиус трубы; χ – центральный угол, под которым видно сечение трубы, заполненное жидкостью. При полном заполнении трубы жидкостью $\chi = 2\pi$, значение гидравлического радиуса составит $R_r = R/2 = d/4$.

Первое дифференциальное уравнение в (1) является законом сохранения массы жидкости, а второе отражает баланс количества движения (импульса) жидкости на безнапорном участке трубопровода. Во втором уравнении $\rho v^2 S$ является потоком количества движения, а $\rho g \cos \alpha \cdot \int_0^S S dh$ – движущей силой Буссинеска. В

правой части второго уравнения имеется скатывающая составляющая силы тяжести $(-\rho g S \sin \alpha)$ и сила трения транспортируемой в трубопроводе жидкости о его внутреннюю поверхность $\frac{\rho g S \cos \alpha}{C_{ш}^2 R_r} \cdot v |v|$, которая выражена через коэффициент

Шези $C_{ш}$ и квадрат скорости течения $v |v|$. Стоит отметить, что сила трения взята в модуль в связи с тем, что она направлена в противоположном от вектора скорости $\vec{v}$ направлении. Для самотечных течений коэффициент Шези играет аналогичную роль,

что для напорных течений коэффициент гидравлического сопротивления λ .

При стационарном течении жидкости ($\partial/\partial t = 0$) на самотечном участке с постоянным наклоном из формул (1) получим, что $\rho v S = \text{const.}$, а также формулу Шези:

$$v = C_{ш} \cdot \sqrt{R_r |tg\alpha|}. \quad (3)$$

Данная формула связывает скорость течения или расход с показателями гидравлического радиуса R_r и гидравлического уклона течения $tg\alpha$ на самотечном участке.

Для определения коэффициента Шези используются эмпирические формулы для труб с круглым сечением и сечением других форм. В первом приближении с учетом замены $d \rightarrow 4R_r$, в которой $Re = 4vR_r/\nu$, а значение гидравлического радиуса R_r связано со степенью заполнения сечения рассматриваемой трубы, можно принять в расчетах формулу $C_{ш} = \sqrt{8g/\lambda}$, где $\lambda = \lambda(Re, \varepsilon)$.

Более часто при расчете коэффициента Шези используется степенная формула Павловского:

$$C_{ш} = \frac{1}{n} \cdot R_r^{1/6}, \quad (4)$$

в которой показатель n зависит от шероховатости внутренней поверхности трубопровода.

При локальном равновесии действующих на жидкость сил правую часть второго дифференциального уравнения формулы (1) приравнивают к нулю, и по формуле (2) можно установить связь между расходом жидкости на самотечном участке и степенью заполнения сечения жидкостью. В случае стационарного течения жидкости с расходом Q_0 скорость течения на участках с полным заполнением сечения жидкостью v_0 будет равна Q_0/S_0 . Степень заполненности жидкостью самотечного участка $\sigma = S/S_0$ определяется отношением $\gamma = i/tg\alpha$, где $i = \lambda_0 \cdot 1/d \cdot v_0^2/\rho g$ и $tg\alpha$ - гидравлические уклоны на участках, где сечение заполнено полностью, и на самотечных участках соответственно. При расчете

степени заполненности жидкостью сечения трубы используются аппроксимационные формулы вида:

При $\gamma = i / tg \alpha_n \geq 1$, то $\sigma = 1$ (сечение заполнено полностью);

При $32,32 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 1$:

$$\sigma = 1 - 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda_0}} \cdot (1 - \sqrt{\gamma});$$

При $4,87 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 32,32 \cdot \lambda_0$: (5)

$$\sigma = 9,39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\lambda_0}} + 0,113;$$

При $\gamma < 4,87 \cdot \lambda_0$:

$$\sigma = 0,1825 \cdot \left(\frac{2\gamma}{\lambda_0} \right)^{0,356},$$

где λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый значением скорости v_0 .

Определим конечно-разностные формулы для расчета течения жидкости на безнапорных участках трубопровода.

При интегрировании дифференциальных уравнений течения жидкости на самотечном участке (1) по площади прямоугольной счетной ячейки $ABCD$, описанном в п. 3.3 диссертационной работы, и последующем переходе в двойных интегралах к интегрированию по контуру рассматриваемой ячейки получим уравнение массового баланса (первое уравнение) в виде:

$$\int_{t_{m-1}}^{t_m} \rho v S dt + \int_{x_k}^{x_{k+1}} \rho S dx + \int_{t_m}^{t_{m-1}} \rho v S dt + \int_{x_{k+1}}^{x_k} \rho S dx = 0$$

а после:

$$\int_{t_{m-1}}^{t_m} (\rho v S|_{x_k} - \rho v S|_{x_{k+1}}) dt + \int_{x_k}^{x_{k+1}} (\rho S|_{t_m} - \rho S|_{t_{m-1}}) dx = 0.$$

Из полученного выше уравнения вытекает соотношение:

$$(\rho S)_{k+1/2,m} = (\rho S)_{k+1/2,m-1} + [(\rho v S)_{k+1} - (\rho v S)_k] \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (6)$$

Данное соотношение выполняется для находящихся на самотечном участке счетных интервалов $(k, k+1)$. Из соотношения (6)

значение площади $S_{k+1/2,m} = S(x_{k+1/2}, t_m)$ в счетном интервале $(k, k+1)$ в момент времени t_m определяется через переменные $S_{k+1/2,m-1}$ и $v_{k+1/2,m-1}$ в предыдущий момент времени t_{m-1} и потоки массы $(\rho v S)_{|_k}$ и $(\rho v S)_{|_{k+1}}$, которые входят и выходят в счетном интервале.

При интегрировании второго дифференциального уравнения системы (1), отражающего баланс количества движения жидкости, получим следующее:

$$(\rho v S)_{k+1/2,m} = (\rho v S)_{k+1/2,m-1} + \left[\left(\rho v^2 S + \rho g \cos \alpha \cdot \int_0^S S dh \right) \right]_k - \left[\left(\rho v^2 S + \rho g \cos \alpha \cdot \int_0^S S dh \right) \right]_{k+1} \frac{\Delta t}{\Delta x} - \left\{ \rho g S_{k+1/2,m-1} \sin \alpha_{k+1/2} + \frac{\rho g S_{k+1/2,m-1} \cos \alpha_{k+1/2}}{C^2 \frac{R}{R_{k+1/2,m-1} f_{k+1/2,m-1}}} \cdot v_{k+1/2,m-1} \right\} \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Используемый дробный субиндекс $(k+1/2, m)$ указывает на среднее значение параметра на счетном интервале $(k, k+1)$ в момент времени t_m .

Из системы алгебраических уравнений (6) и (7) определяются значения скорости течения $v_{k+1/2,m}$ и уровня заполненности жидкостью сечения трубы $S_{k+1/2,m}$ в момент времени t_m через те же параметры, но в предыдущий момент времени t_{m-1} . Для замыкания уравнений с неизвестными значениями потоков импульса через сечения, ограничивающие счетный элемент, используется решение задачи распада произвольного разрыва.

В "бесконечном" трубопроводе в первоначальный момент времени $t = 0$ имеется разрывное самотечное (безнапорное) течение жидкости, гидродинамические параметры которой распределены следующим образом:

$$S(x, 0) = \begin{cases} S_0, & x \geq 0 \\ S^0, & x < 0. \end{cases} \quad v(x, 0) = \begin{cases} v_0, & x \geq 0 \\ v^0, & x < 0. \end{cases} \quad (8)$$

Задача нахождения параметров течения $S(x, t)$ и $v(x, t)$ в моменты времени $t > 0$ будет автомодельной вследствие зависимости от одной переменной $\xi = x/t$. Решение данной задачи может состоять из:

быстрой R^+ и медленной R^- простых волн, на которых соблюдаются соотношения:

$$\begin{aligned}\xi_+ &= v + \sqrt{gS \cdot dh / dS}; \quad v = \int \sqrt{g \cdot dh / dS / S} + C_1; \\ \xi_- &= v - \sqrt{gS \cdot dh / dS}; \quad v = -\int \sqrt{g \cdot dh / dS / S} + C_2;\end{aligned}\quad (9)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные,

а также разрывов или гидравлических прыжков, которые удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}D &= \frac{dx_p}{dt} = \frac{S^+ v^+ - S^- v^-}{S^+ - S^-}, \\ D &= \frac{dx_p}{dt} = \frac{\left[S^+ (v^+)^2 + g \int_0^{h^+} S dh \right] - \left[S^- (v^-)^2 + g \int_0^{h^-} S dh \right]}{S^+ v^+ - S^- v^-},\end{aligned}\quad (10)$$

где D – скорость распространения разрыва на плоскости переменных (x, t) .

Рассмотрим решение задачи в зависимости от следующих параметров: S^0 , v^0 и S_0 , v_0 , которые задают начальное распределение (8).

Применим результаты к нашей проблеме. Для этого рассмотрим три соседние счетные ячейки на плоскости (x, t) , представленные на рисунке 2.

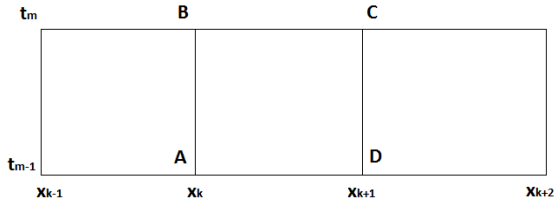


Рисунок 2 – Расчет потоков через границы счетных интервалов

При рассмотрении границы счетных интервалов (x_{k-1}, x_k) и (x_k, x_{k+1}) AB как границы с заданными слева и справа начальными параметрами течения $S_{k-1/2, m-1}$, $v_{k-1/2, m-1}$ и $S_{k+1/2, m-1}$, $v_{k+1/2, m-1}$, можно взять автомодельное решение, соответствующее задаче о распаде произвольного разрыва, тогда значения параметров течения S_k и v_k

на границе счетных интервалов можно принять равными решениям данной задачи.

Аналогичным образом рассмотрим границу счетных интервалов (x_k, x_{k+1}) и (x_{k+1}, x_{k+2}) DB как границу с заданными слева и справа начальными параметрами течения $S_{k+1/2, m-1}$, $v_{k+1/2, m-1}$ и $S_{k+3/2, m-1}$, $v_{k+3/2, m-1}$. При взятии автомодельного решения задачи о распаде произвольного разрыва с данными параметрами можно значения параметров течения S_{k+1} и v_{k+1} на границе счетных интервалов принять равными решениям данной задачи. При подстановке в рекуррентные формулы (6) и (7) найденных значений S_k , v_k и S_{k+1} , v_{k+1} получим систему двух алгебраических уравнений, которая замкнута. Из нее можно рассчитать площадь заполненности жидкостью сечения трубы $S_{k+1/2, m}$, и скорость безнапорного течения жидкости $v_{k+1/2, m}$ в момент времени t_m .

Конечно-разностные формулы и формулы (6), (7) в дополнении с замыкающими соотношениями служат основой для алгоритма «сквозного счета» параметров течения жидкости.

2. Разработанная структура и алгоритм обнаружения утечек, основанный на математической модели неустановившегося режима движения слабо сжимаемой жидкости с учетом возможного образования парогазовых участков потока в магистральных трубопроводах и контролирующий дисбаланс значений действительного и расчетного изменения объема жидкости, позволяет осуществить контроль целостности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов.

Алгоритм расчета нестационарных режимов, реализованный в предлагаемой программе, выглядит следующим образом.

Алгоритм для расчета параметров потока в начальном режиме

На основе введенных в окно «Начальный режим» данных (начальному расходу начале трубопровода и давлению в конце рассматриваемого участка) с учетом характеристик жидкости и конструктивных параметров производится расчет начального

стационарного режима (массового расхода и приведенного давления) для всех счетных прямоугольников. Начало данного расчета ведется с последнего $n - go$ счетного прямоугольника, расположенного на конце трубопровода (рисунок 3).

Введенное в окно начального режима конечное значение давления принимается равным за давление на правой грани $n - go$ прямоугольника. По значению данного давления и высотной отметке рассчитывается приведенное давление на правой грани, а по заданному значению объемного расхода – скорость.

По известному значению скорости на шаге $\Delta x/2$ определяются потери на трение, а также находится давление в середине последнего прямоугольника. Абсолютное давление, определяемое по высотной отметке и приведенному давлению, сравнивается с давлением насыщенных паров. При $p > p_y$ прямоугольник находится в области напорного течения и значение степени заполнения трубы принимается равным единице. По значению абсолютного давления определяется плотность и массовый расход ρv , равный произведению скорости на плотность. В результате находим значения трех неизвестных функций в последнем сечении, а именно давление, массовый расход и площадь сечения.

При значении давления меньшего давления насыщенных паров $p < p_y$ давление примем равным последнему, а из формулы Шези (3), зависимостями (2) и (4), а также соотношения скорости и расхода определим значение скорости и степень заполнения трубопровода. Решение системы трансцендентных уравнений осуществляется при помощи метода последовательных приближений. В результате находим все искомые функции в последнем прямоугольнике при безнапорном течении жидкости.

Следующим шагом программа рассчитывает функции в предыдущем $n - 1$ - ом прямоугольнике. Вычисленные на шаге Δx потери на трение суммируются с значением давлением в последнем прямоугольнике, в результате чего определяется приведенное давление в рассматриваемой ячейке. После действует описанный выше механизм определения вида и параметров течения жидкости.

Данный процесс расчета производится до первого прямоугольника. Таким образом, получаем параметры течения на слое $m-1$ при $m=0$.

Алгоритм расчета параметров потока текущих слоев

Далее в программе осуществляется расчет параметров потока жидкости на m -ом слое от начала до конца трубопровода (рисунок 4).

Расчет начинается с определения параметров на левой грани первого счетного многоугольника. При помощи метода линейной интерполяции из таблиц, введенных в окне «Текущая информация» находятся давления, а расход определяется по формулам определения величин в крайних участках трубопровода.

После этого на правой грани при $k=0$ по формулам замыкающих соотношении осуществляется расчет давления и массового расхода. В данных соотношениях используем значения исходных функций, определенные в середине счетных ячеек $m-1$ -го слоя. Далее по конечно-разностным формулам определяем давление и расход в середине счетного прямоугольника. На левой грани из найденного значения расхода находим количество жидкости, вошедшей за время Δt в трубопровод.

Переходим к расчету параметров во всех остальных счетных прямоугольниках. Вначале по степени заполнения на $m-1$ -ом слое определяем вид течения, напорный или безнапорный, к которому принадлежит этот прямоугольник. При напорном течении для каждого прямоугольника на правой грани определяем лишь расходы и давления. Это связано с тем, что параметры на левой грани были определены при расчете предыдущего прямоугольника.

Абсолютное давление определяется по значению высотной отметки и приведенного давления, а после происходит сравнение полученного давления с давлением насыщенных паров. При абсолютном давлении не меньшем давления насыщения осуществляется расчет следующего прямоугольника.

При абсолютном давлении меньшем давления насыщенных паров оно берется равным значению давления насыщения. По разности данных давлений определяем уменьшение степени

заполнения, а по степени заполнения – величину скорости на самотечном участке.

При нахождении прямоугольника на $m-1$ -ом слое в области безнапорного течения по формулам (6), (7) и учетом замыкающих соотношений определяются параметры течения жидкости. В случае получения на m -ом слое значения степени заполнения большего единицы степень заполнения берется равной единице и осуществляется корректировка потока на правой грани на соответствующую величину. При получении степени заполнения меньше нуля степень заполнения берется равной нулю, осуществляется коррекция потока на правой грани, направленной уже в другую сторону, сторону уменьшения количества вынесенной из ячейки жидкости.

Приступим к расчету последнего счетного прямоугольника, зная параметры на левой грани, определенные на предыдущем прямоугольнике. Нахождение параметров на правой грани осуществим, учитывая граничные условия. При помощи метода линейной интерполяции из введенных в окне текущей информации таблиц определим давления, а расходы найдем из соотношений (3.20) из значения давлений и значений параметров на предыдущем слое. Зная расход на правой грани, определяем количество жидкости, которое вытекло за время Δt из трубопровода.

Таким образом, на m -ом слое определены все параметры во всех счетных прямоугольниках. Осуществляем переопределение, т.е. m -ый слой принимаем за $m-1$ -ый и вновь начинаем расчет с первого прямоугольника до того, как не исчерпается время, для которого заданы значения давления и расхода на входе и выходе рассматриваемого участка трубопровода. На каждом шаге суммируют расчетные значения вошедшей и вышедшей жидкости из трубопровода.

По измеренным и заданным в окне «Текущая информация» значениям расхода определяется количество закачанной и отобранной жидкости. Разность данных значений представляет собой дисбаланс жидкости по результатам измерений. В это же время определяется разность между соответствующими величинами,

которые получены при расчете (дисбаланс расчетный). В случае превышения разницей между дисбалансами вычисленным и измеренным значения уставки, введенной в окне «Начальный режим» выдается сообщение об утечке. В противном случае делается вывод об отсутствии утечки.

С целью оценки погрешности расчетов программой был протестирован участок трубопровода с длиной 10 км, значением внутреннего диаметром равным 450 мм и абсолютной шероховатостью 0,25 мм. Перекачиваемая жидкость пусть имеет следующие показатели: плотность 850 кг/м^3 , вязкость 6 сСт и давление насыщенных паров равное $0,7 \text{ кгс/см}^2$. Примем в качестве шага интегрирования по координате 100 м, а по времени – 0,05 с.

Создавалась стационарная перекачка (рисунки 5-6) с самотечными участками с расходом равным 1000 м и конечным давлением на участке трубопровода равным 5 кг/см. На рисунке 5 виден самотечный участок, когда верхняя кривая, представляющая собой линию приведенного давления, пересекает нижнюю кривую, характеризующую профиль трубопровода.

Как видно из рисунков 5 и 6 графики начального приведенного и текущего приведенного давления совпадают, это говорит о постоянстве давления. Значения начальных и текущих объемов жидкости, объемы закачанной и отобранной жидкости, а также начальные и конечные расходы совпадают с точностью до третьего знака после запятой.

На основе этого можно судить о достаточно малой погрешности производимых расчетов, а также сохранении программой стационарного режима. Алгоритм, реализованный в программном комплексе, может использоваться при расчете дисбаланса жидкости в рассматриваемом трубопроводе.

Проведем расчет по обнаружению утечки на рассматриваемом участке трубопровода теми же характеристиками. Для этого сначала имитируется утечка, путем осуществления сброса в одном из трех отводов, и получаются рассчитанные значения давлений и расходов в начале и конце рассматриваемого участка. Эти полученные данные занесем в виде исходной информации через

опцию «Текущий режим» в автоматизированную систему обнаружения утечек.

На рисунке 7 виден самотечный участок в рассматриваемом трубопроводе, так как верхняя кривая, представляющая собой линию приведенного давления, пересекает нижнюю кривую, характеризующую профиль трубопровода.

Результаты расчета представлены на рисунке 8. Проведенный расчет показал, расхождение значений текущего объема жидкости и начального, значений закаченной и отобранной жидкости, расходов закачки и отбора. Вследствие превышения дисбалансом значений действительного и расчетного изменение объема жидкости при нестационарном процессе заданной уставки в 12 м^3 выдается сигнал об обнаружении утечки.

На основе анализа полученных результатов тестирования и расчетов по обнаружению утечек, можно утверждать о достаточно точном расчете системой нестационарных процессов в рассматриваемом трубопроводе и обнаружении дисбаланса жидкости, вызванного возникновением утечки.

В целях подтверждения работоспособности предложенного в диссертации метода контроля утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах был создан экспериментальный стенд (рисунок 9). Он представляет собой трубопровод, смонтированный в форме змейки в три ряда с тремя отводами и перевальной точкой, после которой образуются самотечные участки.

Задача утечки жидкости или же сброса жидкости осуществляется включением одного из трех отводов с известными характеристиками. Возникновение утечки или сброса на стенде моделируется путем открытия первого отвода, на который устанавливают шайбы различного диаметра. Жидкость из трубопровода с заранее известным расходом отбирается в специальные емкости.

В начале и конце трубопровода закреплены датчики давления и расхода, установлены термопреобразователи для температурной корректировки расхода. Данные, получаемые с установленных на стенде датчиков, передаются в ПЭВМ, в котором

они архивируются и передаются для расчета утечек в программное обеспечение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе научного анализа литературы сформулированы основные причины, способствующие нарушению целостности трубопроводов, и определены главные требования, предъявляемые к системам диагностики утечек. Произведен анализ методов и средств обнаружения утечек и дана их классификация.

2. Предложена методика расчета систем уравнений, которые описывают течение жидкости как на напорных, так и на безнапорных участках трубопровода, позволяющая определять возникновение утечек на остановленном трубопроводе, при установившихся и переходных режимах работы трубопровода.

3. Разработан алгоритм обнаружения утечек и функционирующий в режиме реального времени программный модуль, в основе которого лежит разработанная методика.

4. Протестирована работоспособность программного модуля обнаружения утечек в трубопроводах при различных режимах работы трубопровода.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

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

2. Низамутдинов, Р.И. Анализ современных отечественных и зарубежных методов обнаружения утечек на нефтепроводах / Р.И. Низамутдинов, Р.М. Проскуряков // «Естественные и технические науки»// г. Москва, №12, 2015г. – С. 128-130.

3. Низамутдинов Р.И. Создание математической модели нефтепровода с целью построения системы его диагностики / Р.И. Низамутдинов, Р.М. Проскуряков // «Естественные и технические науки»// г. Москва, №4, 2016г. – С. 161-164.

РИЦ Горного университета. 25.01.2017. 3.51. Т.100 экз.

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

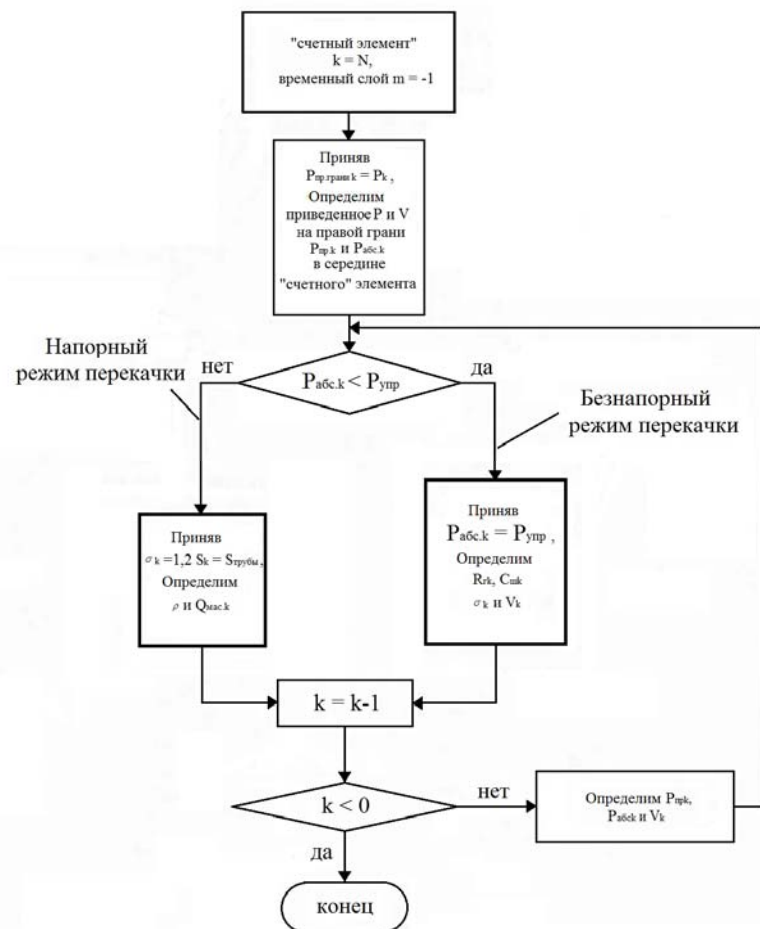


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета параметров потока в начальном режиме

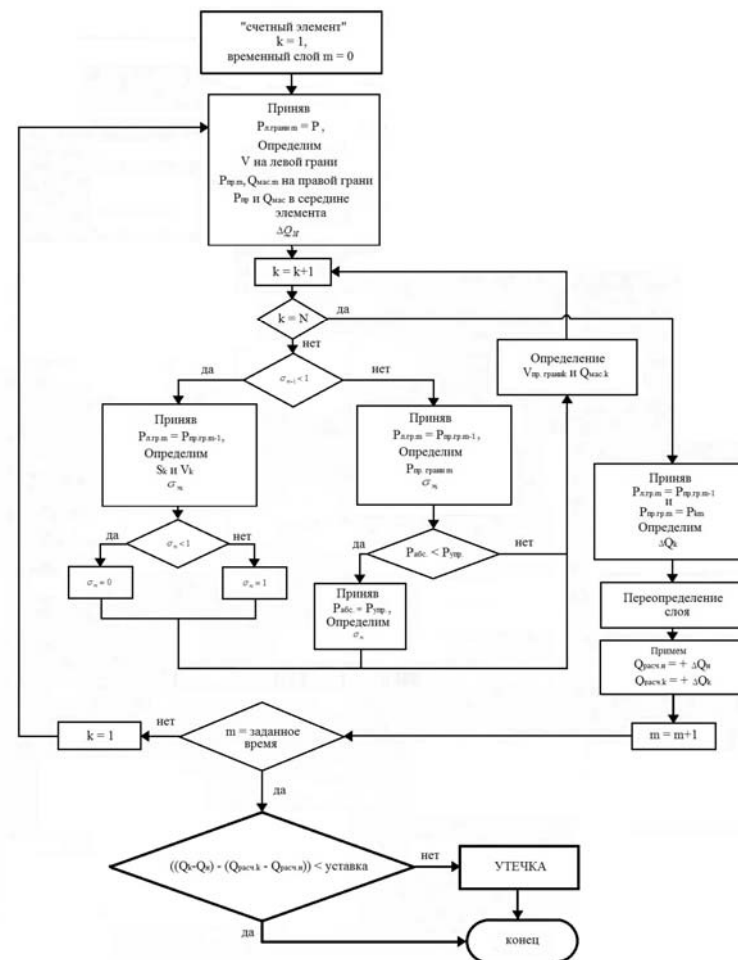


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма расчета параметров потока текущих слоев

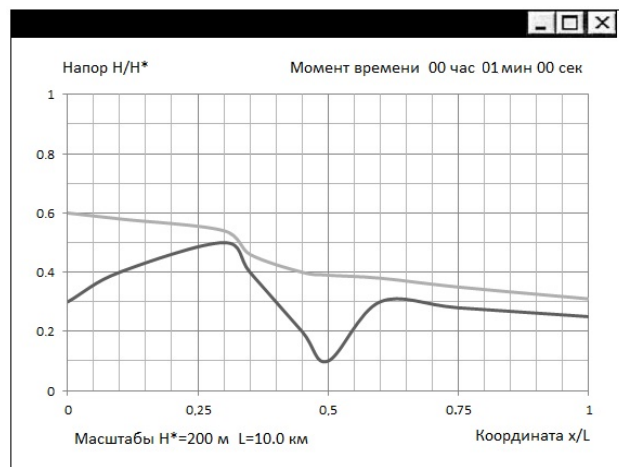


Рисунок 5 – График приведенного значения давления на участке трубопровода с самотечными участками

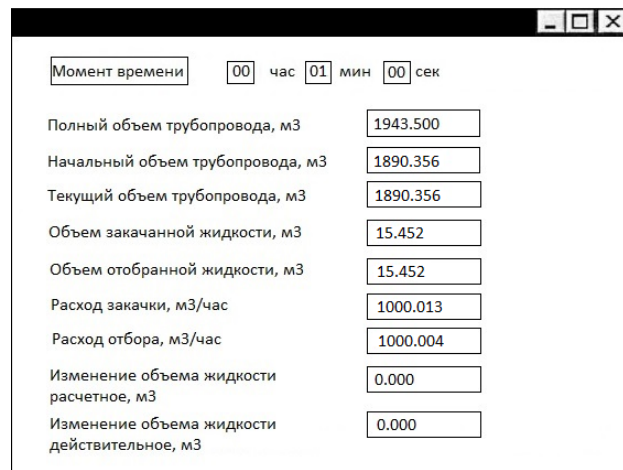


Рисунок 6 – Результаты расчета на участке трубопровода с самотечными участками

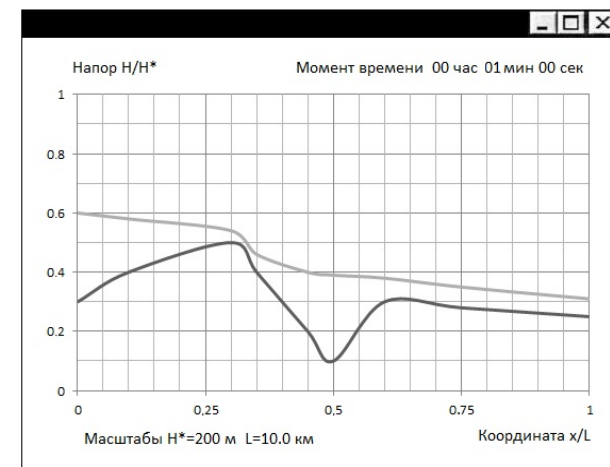


Рисунок 7 – График приведенного значения давления на участке трубопровода с самотечными участками

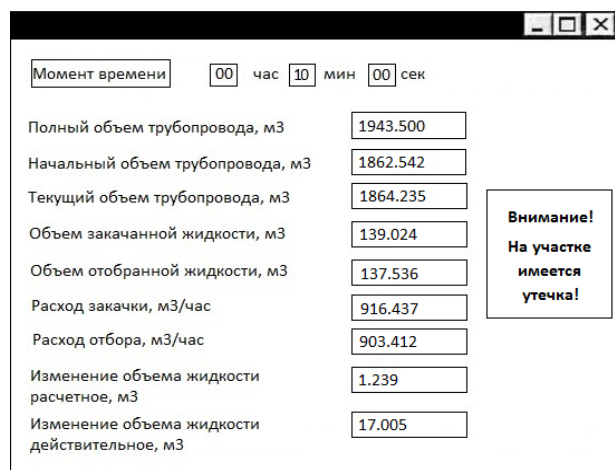


Рисунок 8 – Результаты расчета утечки на участке трубопровода с самотечными участками



Рисунок 9 – Экспериментальный стенд трубопровода с установленным оборудованием