

УДК 622.692.482

## УЧЁТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ НЕФТЕПРОВОДА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ УТЕЧКИ

Мамонова Т.Е.

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*e-mail: stepte@tpu.ru*

***Аннотация.** В представленной работе рассматриваются алгоритмы определения параметров утечки в трубопроводах, полученные решением уравнений гидродинамических процессов, протекающих при возникновении в них утечек. Данные алгоритмы преобразованы для участка сплошного трубопровода с учётом его геометрического профиля, без дополнительных отводов, пролегающего между двумя насосными станциями. Проверена работоспособность полученных алгоритмов с помощью виртуального трубопровода, построенного в программном пакете COMSOL Multiphysics. Приведены результаты исследования предложенных алгоритмов.*

***Ключевые слова:** магистральный трубопровод, гидравлический профиль трубопровода, утечка трубопровода, гидродинамическая модель, датчик давления, имитационная модель*

Россия занимает второе место после США по протяженности магистральных трубопроводов. Общая их длина превышает 240 тыс. км, а вместе с промышленными – 550 тыс. км. Этот способ транспортировки нефти считается наиболее безопасным и экономичным, однако все больше фактов свидетельствуют о том, что безопасности на нефтепроводах России по-прежнему уделяется слишком мало внимания. В предаварийном состоянии находятся промышленные трубопроводные системы большинства нефтедобывающих предприятий России. Всего на территории Российской Федерации находится в эксплуатации 350 тыс. км внутрипромысловых трубопроводов, на которых ежегодно отмечается свыше 50 тыс. инцидентов, приводящих к опасным последствиям [8]. Основными причинами высокой аварийности при эксплуатации трубопроводов является сокращение ремонтных мощностей, низкие темпы работ по замене отработавших срок трубопроводов на трубопроводы с антикоррозионными покрытиями, а также прогрессирующее старение действующих сетей. Только на месторождениях Западной Сибири эксплуатируется свыше 100 тыс. км промышленных трубопроводов, из которых 30 % имеют 30-летний срок службы, однако в год заменяется не более 2 % трубопроводов. В результате ежегодно происходит до 35-40 тыс. инцидентов, сопровождающихся выбросами нефти, в том числе в водоемы, причем их число ежегодно увеличивается, а значительная часть инцидентов преднамеренно скрывается от учета и расследования.

При общей динамике аварийности, по оценкам экспертов, причинами разрыва трубопроводов являются: 60 % случаев – гидроудары, перепады давления и

вибрации; 25 % – коррозионные процессы; 15 % – природные явления и форс-мажорные обстоятельства [9]. Участились аварии на трубопроводах, сопровождающиеся большими потерями природных ресурсов и широкомасштабным загрязнением окружающей среды. По официальным данным только потери нефти из-за аварий на магистральных нефтепроводах превышают 1 млн тонн в год и это без учета потерь при прорывах внутривидовых трубопроводов.

В настоящее время существует большое количество методов определения утечек на трубопроводах, основанных на различных физических явлениях. Методы можно разделить на периодические и постоянные.

Основными требованиями, предъявляемые к методам обнаружения утечек, являются:

1. точность определения места утечки;
2. высокая чувствительность;
3. высокая степень надёжности и автоматизации;
4. достоверность информации;
5. отсутствие помех, оказывающих влияние на режим перекачки;
6. безопасность в эксплуатации;
7. обеспечение контроля состояния трубопроводов большой протяжённости,
8. экономичность,
9. работоспособность при плохих климатических и погодных условиях.

Ниже описаны наиболее часто используемые методы, их достоинства и недостатки.

### ***Ультразвуковой метод (зондовый)***

Метод основан на звуковом эффекте (ультразвуковой диапазон), возникающем при истечении жидкости через сквозное отверстие в стенке трубопровода.

Возникновение звука при утечке обусловлено: локальными изменениями давления на выходе из отверстия в стенке трубы, вызванными завихрениями жидкости (переход из ламинарного режима в турбулентный); процессом кавитации.

Ультразвуковые волны, распространяясь в жидкой среде, проникают через отверстие в стенке трубопровода и создают звуковое поле внутри трубопровода. Оно фиксируется, и его параметры обрабатываются с помощью специальных зондов, пропускаемых внутри трубопровода.

*Достоинства:*

1. эффективен и перспективен для проведения периодического контроля за малыми утечками нефтепродукта;
2. высокая чувствительность при обнаружении малых утечек;
3. высокая точность определения места малых утечек нефтепродукта;
4. не влияет на режим перекачки;

5. обеспечивает контроль герметичности участков трубопровода большой протяжённости (свыше 200 км) за один пропуск прибора;

6. высокая надёжность и достоверность используемых автономных течеискателей за счёт самоконтроля;

7. безопасен в эксплуатации;

8. экономичен;

9. обеспечивает автоматическую обработку информации.

*Недостатки:*

1. метод не применим при обнаружении значительных утечек, так как движение автономных приборов по трубопроводу практически прекращается;

2. возможны застревания автономных приборов в трубопроводе при наличии отводов большого диаметра, соизмеримых с основной магистралю, и при малых радиусах поворотов трубопровода;

3. отсутствие непрерывной дистанционной информации о местонахождении автономного прибора и о результатах контроля герметичности трубопровода;

4. неприменим для трубопроводов с участками труб разных диаметров;

5. возможна ложная информация при скорости перекачки более 2 м/с;

6. уменьшается пороговая чувствительность к величине утечки при высокой вязкости перекачиваемого продукта и при истечении в воздушную среду.

### *Акустический метод*

Метод основан на регистрации звукового эффекта (акустические волны звукового диапазона частот), возникающего при истечении жидкости через сквозное отверстие (свищ, трещина) в стенке трубопровода [11].

Для определения мест, скрытых утечек в подземных трубопроводах разработан ряд электронно-акустических течеискателей, принцип действия которых основан на прослушивании и оценке акустических шумов, создаваемых утечкой, с поверхности земли. Нахождение места повреждения производится по фиксируемому максимуму шумов, при перемещении течеискателя по трассе трубопровода.

*Достоинства:*

1. Акустический метод, реализованный в автономных переносных течеискателях, эффективен для нахождения точного места утечек;

2. Высокая чувствительность к величине незначительных утечек;

3. Применим для любых трубопроводов и для любых жидкостей в трубопроводах;

4. При наличии устройств для подавления помех в трубопроводе применим для точного обнаружения места малых утечек;

5. Безопасен с экологической точки зрения;

6. Автономные переносные течеискатели просты по конструкции и удобны в эксплуатации.

*Недостатки:*

1. трудоёмок (например, бригада из трёх человек обследует за день 8 - 13 км трассы трубопровода);
2. неприменим в зимнее время, и на трубопроводах, проложенных в труднодоступной местности;
3. эффективность контроля снижается в ночное время и зависит от погодных условий;
4. чувствительность аппаратуры снижается при залегании трубопровода на глубине более одного метра – в этом случае требуется повышение давления перекачиваемого продукта;
5. не определяет величину утечки продукта.

***Метод анализа статического давления.***

Метод основан на дистанционном измерении скорости падения давления на участке трубопровода между задвижками при наличии утечки в процессе гидравлического испытания. Трубопровод находится под гидравлическим давлением в течение 15 мин; оператор из центрального диспетчерского пункта следит за изменением давления на каждом участке трубопровода. Если происходит изменение давления на каких либо участках и предполагаемая утечка более  $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , то испытание трубопровода производится по методу дифференциального давления. Данный метод в некоторых источниках называют методом статического давления и методом опрессовки [1].

*Достоинства:*

1. позволяет оперативно обнаружить наличие малой утечки;
2. испытательное давление не превышает рабочего;
3. применим на любом автоматизированном трубопроводе.

*Недостатки:*

1. требуется остановка перекачки по трубопроводу;
2. большая погрешность при обнаружении места утечки;
3. возможны ложные показания.

***Метод дифференциального давления***

Метод основан на постоянстве градиента перепада давлений в смежных участках трубопровода при отсутствии утечек и температурном равновесии продукта и окружающей среды. Перекачка по трубопроводу прекращается, в нём устанавливается статическое давление, перекрываются все линейные задвижки и контролируется изменение перепада давлений в двух смежных участках [12].

Перепад давлений остаётся постоянным при отсутствии утечки и температурном равновесии контролируемых смежных участков.

Достоинства:

1. способствует обнаружению малых утечек и выявлению повреждений участка;
2. обеспечивает дистанционность и автоматизацию контроля малых утечек;
3. применяется независимо от длины и конструкции испытываемого трубопровода;
4. позволяет оценить утечку по диаграммам, записанным на самописце.

Недостатки.

1. требуется остановка перекачки по трубопроводу на длительное время – от 3 до 10 суток с периодичностью в два месяца, что снижает производительность трубопровода на 10 %;
2. из-за трудности точного измерения температуры продукта в участке трубопровода метод недостаточен объективен для обнаружения микроутечек;
3. большая погрешность обнаружения мест незначительных утечек. Точное местонахождение утечки осуществляется наземными переносными и зондовыми течеискателями по перепаду давления.

#### ***Метод обработки кривой падения давления***

Сущность метода состоит в следующем. В испытываемый участок нефтепровода закачивают жидкость и поднимают давление до достаточно высокого значения, чтобы все сечения трубы оказались заполненными жидкостью и чтобы существовал запас давления над упругостью насыщенных паров. Затем наблюдают, как это давление изменяется в зависимости от времени. Если давление в рассматриваемом участке трубопровода не изменяется с течением времени, то это свидетельствует об отсутствии в нём утечки. Если давление в конкретном сечении падает, то это означает, что в испытываемом участке трубопровод имеет отверстие и задача состоит в том, чтобы оценить величину этого отверстия и, по возможности, точно указать его местоположение.

*Достоинства:*

1. не требует для своего применения особых затрат, то есть является достаточно экономичным;
2. позволяет с достаточно большой степенью точности определить местоположение точки;
3. имеется возможность определить размер расхода жидкости через утечку.

*Недостатки:*

1. неприменим на трубопроводах с различным диаметром труб и овальностью;
2. неприменим в местах отводов и лупингов;
3. требует приостановки перекачивания нефтепродукта.

### **Метод отрицательных волн давления**

Метод основан на регистрации волн понижения давления (отрицательных ударных волн), возникающих в момент появления утечки нефтепродукта и распространяющихся в обе стороны по трубопроводу со скоростью звука.

При возникновении утечки отрицательная волна давления достигает измерительных точек в обе стороны от утечки. Время прибытия сигналов от преобразователей регистрируется на центральном диспетчерском пункте самописцем. На основе специальной программы, установленной на компьютер, обрабатывает результаты поступающей информации и вычисляет место утечки, при этом учитывается: последовательность поступления сигналов, расстояния до преобразователей, скорость распространения волны давления, эксплуатационные параметры перекачки.

#### *Достоинства:*

1. эффективен для быстрого обнаружения значительных утечек;
2. применим независимо от длины и конструкции трубопровода;
3. обеспечение дистанционной автоматической передачи информации о появлении утечки;
4. применим независимо от погодных условий;
5. обеспечение непрерывного контроля;
6. обеспечение высокой надёжности и объективности контроля;
7. обеспечение простоты конструкции и эксплуатации приборов

#### *Недостатки:*

1. низкая точность при определении местонахождения значительных утечек;
2. низкая чувствительность к величине утечки;
3. чувствительность метода снижается при последовательной перекачке различных продуктов.

### **Метод сравнения расходов**

Метод основан на постоянстве мгновенного расхода нефтепродукта в начале и в конце участка трубопровода при отсутствии утечки и установившемся режиме перекачки.

На входе и выходе каждого участка трубопровода устанавливаются расходомеры турбинного или объёмного типа, дистанционно связанные с компьютером, находящиеся на центральном диспетчерском пункте. Информация от расходомеров поступает на компьютер, которая с учётом температурной поправки непрерывно производит сравнение расходов в начале и в конце каждого участка трубопровода. В том случае, если разность расходов превышает допустимый пре-

дел, установленный программой, автоматически срабатывает аварийная сигнализация о появлении утечки.

*Достоинства:*

1. эффективен для быстрого обнаружения значительных утечек при установленном режиме перекачки на основе компьютеров;
2. обеспечение непрерывности дистанционного контроля возникновения значительных утечек;
3. обеспечение автоматической обработки поступающей информации;
4. обеспечение автоматической остановки перекачки по трубопроводу и перекрытие задвижек;
5. применим независимо от погодных условий;
6. не влияет на режим перекачки.

*Недостатки:*

1. низкая точность при определении даже значительных утечек;
2. низкая чувствительность к величине утечки;
3. в период пуска и остановки перекачки по трубопроводу система даёт ложные показания;
4. компараторы расхода могут применяться только на коротких участках трубопровода, так как не учитывают температурную поправку и аккумулирующую способность трубопровода;
5. смена и ремонт турбинных расходомеров требует остановки перекачки по трубопроводу;
6. наличие ложных срабатываний системы при последовательной перекачке различных нефтепродуктов.

### ***Корреляционный метод***

Корреляционный метод обнаружения утечек среды в трубопроводах и определения мест их расположения основан на измерении виброакустического сигнала, генерируемого утечкой, с помощью двух датчиков (пьезодатчиков), установленных непосредственно на трубопроводе [13]. Если два датчика установить с двух сторон (в двух колодцах) от предполагаемого места утечки и измерить с помощью 2-х канального анализатора взаимно-корреляционную функцию (кросскорреляции), то в этом случае можно определить разницу (задержку) по времени распространения сигнала от утечки до одного и до второго датчика.

Задержка определяется по максимуму функции кросскорреляции сигналов, измеренных датчиками. При известной скорости распространения сигнала (звука) по трубе и, зная расстояние между датчиками (колодцами, в которые они установлены), можно точно определить место расположения утечки.

*Достоинства:*

1. эффективен для нахождения значительных утечек;

2. применим для любых трубопроводов и для любых жидкостей в трубопроводах;

3. безопасен с экологической точки зрения;

*Недостатки:*

1. неприменим при определении малых утечек;

2. возможны ложные срабатывания сигнала;

3. не определяет величину утечки продукта.

### ***Метод акустической эмиссии***

Метод основан на регистрации высокочувствительными пьезоэлектрическими датчиками, расположенными на контролируемом участке трубопровода, сигналов акустической эмиссии (АЭ) о микротрещинах в стенке трубопровода и об утечках жидкости.

Для обнаружения места утечек разработано специальное оборудование для анализа затухания и времени прихода импульсов акустической эмиссии. Вычислительная машина временного анализа использует сигналы от пьезодатчиков для определения разницы времени прихода звуковых сигналов АЭ к преобразователям. Компьютер обрабатывает поступающую информацию и с учётом скорости распространения сигналов АЭ, расстояния между датчиками на трубопроводе определяет местонахождение дефекта.

*Достоинства:*

1. эффективен для обнаружения малых утечек;

2. характеризуется высокой точностью обнаружения места утечки;

3. обеспечивает автоматическую обработку информации и выдачу результатов обследования технического состояния магистральных трубопроводов с указанием степени опасности дефектов;

4. применим для любых конструкций трубопроводов и ёмкостей, работающих под давлением;

5. применим для любых нефтепродуктов;

6. экономичен;

7. обеспечивает высокую степень достоверности результатов контроля.

*Недостатки:*

1. требует значительного времени для обследования трубопроводов большой протяжённости;

2. высокая стоимость обследования;

3. неприменим для трубопроводов, пролегающих в труднодоступной местности;

4. зависимость от погодных и климатических условий;

5. метод АЭ является контактным, пьезодатчики с преусилителями должны устанавливаться на поверхности трубы, для чего требуется шурфовка.



### Метод гидравлической локации утечки

Данный метод основан на анализе гидравлических характеристик участка нефтепровода. Метод локации места утечки нефтепродукта и оценки ее интенсивности основан на измерении гидравлических уклонов на двух специально выбранных базисных сегментах, находящихся вблизи перекачивающих станций [1]. Задача состоит в том, чтобы указать место утечки нефти и оценить ее интенсивность по изменению гидравлических уклонов на этих сегментах.

*Достоинства:*

1. низкая эксплуатационная стоимость;
2. использование только штатных средств КИП;
3. визуализация распределения давления по трассе;
4. оперативность обнаружения утечек.

*Недостатки:*

1. низкая чувствительность (5...15% от номинальной производительности), зависящая от расположения дефектного участка [14];
2. наличие «мертвой зоны» в конце эксплуатационного участка;
3. применение только при установившемся режиме эксплуатации изотермического трубопровода;
4. неприменим в трубопроводных сетях со сбросами и подкачками;
5. чувствительность алгоритма к изменению проходного сечения труб в 3-5 раз выше, чем к утечке, что приводит к ложным срабатываниям системы.
6. точность метода снижается при уменьшении интенсивности утечки.

Таким образом, ни один из рассмотренных методов обнаружения утечек полностью не удовлетворяет всем предъявляемым к ним требованиям. Следует также отметить, что методы не учитывают в явном виде геометрию трубопровода.

Задачей данной работы является разработка алгоритмов определения не только местоположения, но и расхода утечек, которые получены на основе решения уравнений, описывающих гидродинамические процессы в трубе для участка, расположенного между двумя насосными станциями и имеющего геометрический профиль.

При разработке алгоритмов использовалась гидродинамическая модель, описывающая процессы утечки в трубопроводе в виде дифференциального уравнения и граничных условий [4]:

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

при  $t=0, P(0, x) = P_H - \frac{P_H - P_K}{l} x$  при  $x=0, P = P_H$ ; при  $x=l, P = P_K$ , где  $\chi = c^2/b$ ;  $b = (\lambda w/2d)_m = 2a$ ;  $\delta(x - \xi)$  – функция Дирака;  $P$  – давление в магистрали;  $t$  – время;  $x$  – координата по длине трубы;  $l, d$  – длина и внутренний диа-

метр трубопровода;  $F$  – площадь сечения трубы;  $C$  – скорость распространения волны давления;  $G_T$  – массовый расход утечки;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трубопровода;  $w$  – скорость движения нефтепродукта;  $\zeta$  – координата места утечки.

Для уравнений (1) методом разделения переменных (методом Фурье) получено точное решение [4]:

$$P(x, t) = P_H - \frac{(P_H - P_K)x}{l} - \frac{2aG_T}{lF}(l-x)\zeta + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi x}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \frac{C^2}{2a} t \right], \text{ при } 0 < x < \zeta \quad (2)$$

$$P(x, t) = P_H - \frac{(P_H - P_K)x}{l} - \frac{2aG_T}{lF}(l-x)\zeta + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi x}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \frac{C^2}{2a} t \right], \text{ при } \zeta < x < l$$

$$C_n = \frac{4aG_T}{\pi^2 n^2} F \sin \frac{n\pi \zeta}{l},$$

где  $P_H$ ,  $P_K$  – давления, соответственно, в начале и на конце участка трубопровода. Эти значения давлений в процессе функционирования трубопровода должны поддерживаться постоянными.

Параметры утечки по профилю давления для прямолинейного горизонтального трубопровода на основе решения (2), описывающей процессы утечки в трубопроводе в виде дифференциального уравнения в частных производных и граничных условий, основаны на показаниях четырёх датчиков давления, два из которых расположены по длине трубопровода и два – на насосных станциях, определяются по формулам [5, 6]:

$$\zeta = \frac{x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right) l}{(l - x_2) \left( P_1 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_1 \right) + x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right)}, \quad (3)$$

$$G_T = \frac{x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right) - (l - x_2) \left( P_1 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_1 \right)}{lx_1 \frac{A(l - x_2)}{F}},$$

где  $A = \lambda w / 2d$ ;  $P_1$  и  $P_2$  – давление на первом и втором датчиков, расположенных по длине трубопровода, Па.

Расположение датчиков давления указано на рис. 1. При этом предполагается, что два датчика давления располагаются в начале и в конце трубопровода на станциях ( $P_H$  и  $P_K$ ), а также по длине трубопровода ( $P_1$  и  $P_2$ ) с координатами  $x_1$  и  $x_2$ .

Данные алгоритмы предназначены для прямолинейного трубопровода без наклона, поэтому их использование при других конфигурациях геометрического профиля приведёт к некорректным результатам. Для учёта геометрического профиля трубопровода необходимо преобразовать полученные алгоритмы, используя гидравлический профиль трубопровода – характеристику  $H(x)$ .

Как показано в [1], гидравлический профиль трубопровода, обладает следующими свойствами:

1. гидравлический профиль будет иметь прямолинейную зависимость в трубопроводе без утечки с геометрическим профилем  $z(x)$ ;
2. при наличии утечки будет наблюдаться надлом гидравлического профиля трубопровода по координате, соответствующей утечке (рис. 1).

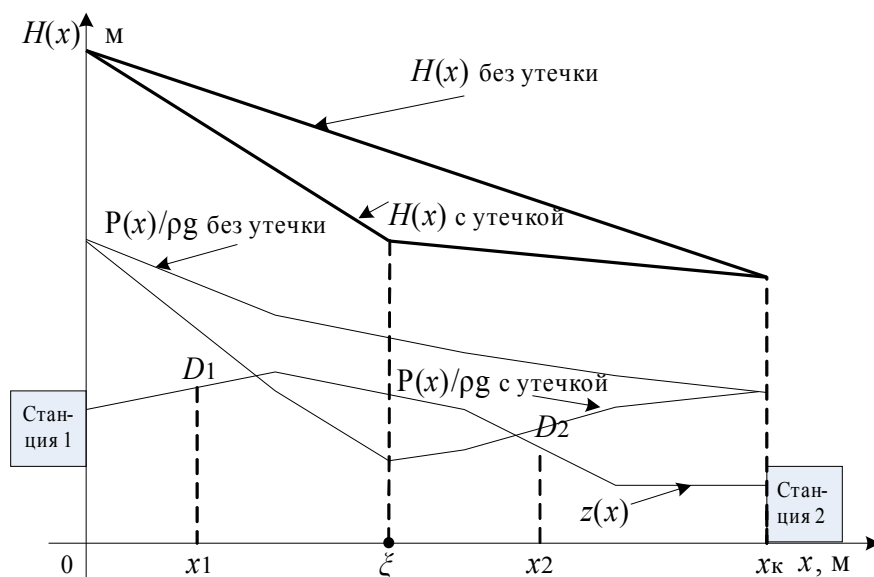


Рис. 1. Трубопровод сложной геометрической формы при наличии утечки и без неё, и его профили

Гидравлический уклон рассчитывается по формуле [1]:

$$H(x) = z(x) + \frac{P(x)}{\rho g}, \quad (4)$$

где  $z(x)$  – геометрический профиль, м;  $P(x)$  – профиль давления по длине трубопровода Па;  $P(x)/\rho g$  – пьезометрический профиль, м;  $\rho$  – плотность транспортируемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Пусть имеется трубопровод, полностью заполненный перекачиваемой жидкостью, без дополнительных вставок и отводов. По длине трубопровода с координатами  $x_1$  и  $x_2$  располагаются два датчика давления на высотах  $z(x_1)$  и  $z(x_2)$  по отношению к горизонту.

Тогда алгоритм определения параметров утечки трубопровода с учётом его геометрического профиля и свойств гидравлического профиля, аналогичные свойствам пьезометрического профиля прямолинейного горизонтального трубопровода, примет вид:

$$\xi = \frac{P_2 - P_H + \rho g(z_2 - z_H) - \frac{x_1}{l - x_2}(P_K - P_2) - \frac{\rho g x_1}{l - x_2}(z_K - z_2)}{\frac{1}{x_1}(P_1 - P_H) + \frac{\rho g}{x_1}(z_1 - z_H) - \frac{1}{l - x_2}(P_K - P_2) - \frac{\rho g}{l - x_2}(z_K - z_2)}, \quad (5)$$

$$G_T = \frac{\pi d^2}{8} \sqrt{\frac{dg}{2\lambda} \left( \sqrt{\frac{P_H - P_1 + \rho g(z_H - z_1)}{\rho g x_1}} - \sqrt{\frac{P_H - P_K + \rho g(z_H - z_K)}{\rho g l}} \right)}$$

Алгоритмы (3) были проверены на адекватность в [4, 5] с помощью визуального приложения Simulink математического пакета MatLab. Учитывая более сложный характер полученных алгоритмов (5) для трубопровода с геометрическим профилем  $z(x)$ , их исследование было проведено в математическом пакете COMSOL Multiphysics 3.5. [7]

COMSOL Multiphysics – это программа для конечно-элементных расчётов сложных научно-технических задач. Решение любой задачи базируется на численном решении уравнений в частных производных методом конечных элементов. При моделировании в программном пакете COMSOL Multiphysics для работы с гидродинамикой жидкости выбран раздел Fluid dynamics/study-state analysis, далее выполнялась прорисовка геометрии объекта моделирования в двухмерном пространстве, после устанавливались граничные условия, свойства жидкости и задавалась сетка для расчёта трубы. В пакете COMSOL Multiphysics решение в разделе гидродинамики основано на уравнении Навье-Стокса.

При построении различных конфигураций и размеров трубопровода было установлено, что при моделировании трубопроводов, соответствующих реальным размерам, в рассматриваемом пакете требуется затрата большого временного ресурса и мощности компьютера. Поэтому моделирование проводилось на основе метода подобия, для чего было проведено масштабирование трубопровода по его длине и диаметру.

Моделирование было выполнено для трубопровода, параметры которого указаны в табл. 1. Остальные параметры трубопровода и жидкости, транспортируемой по трубопроводу, необходимые для моделирования, были взяты из [3, 5] и также представлены в табл. 1.

Скорость звука  $C$  зависит от толщины стенок трубопровода и рассчитывается для стальных труб по формуле [10]:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\rho \beta + \frac{\rho d}{(\delta + h)E}}}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент сжимаемости жидкости;  $d$ ,  $\delta$ ,  $h$  – внутренний диаметр, толщина стенок и абсолютная шероховатость трубы, м;  $E$  – модуль упругости материала трубы (модуль Юнга), Па.

Таблица 1. Значения параметров трубопровода и транспортируемой жидкости

Обозначения	Название	Значение	Единица измерения
Параметры трубопровода			
$l$	длина	100	м
$d$	диаметр	0,1	м
$F$	площадь сечения	$7,85 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>
$P_H$	давление в начале трубы	1000000	Па
$P_K$	давление в конце трубы	700000	Па
Параметры транспортируемой жидкости			
$\rho$	плотность	817	кг/м <sup>3</sup>
$w$	скорость движения	1,2	м/с
$\nu$	кинематическая вязкость	$55 \cdot 10^{-6}$	м <sup>2</sup> /с
$C$	скорость звука	975	м/с
$\delta$	толщина стенки трубы	0,01	м

В ходе моделирования было взято три различных варианта геометрического профиля трубопровода:

1. прямолинейный без наклона;
2. прямолинейный с наклоном;
3. в виде сигмоидальной функции.

В первом случае был построен прямолинейный трубопровод без наклона при наличии утечки в трубопроводе с координатой  $\zeta = 55$  м и условным диаметром отверстия  $d_\zeta = 0,02$  м. В COMSOL Multiphysics был получен график профиля давления, представленный на рис. 2. По графику видно, что в месте прорыва трубопровода ( $\zeta = 55$  м) происходит надлом кривой, параметры которого могут быть вычислены по формулам (3) и (5).

Второе исследование проводилось для наклонного трубопровода при тех же значениях параметров трубопровода и транспортируемой жидкости с утечкой по координате  $\zeta = 55$  м и условным диаметром отверстия  $d_\zeta = 0,02$  м. График профиля давления, изменяющийся по длине трубопровода, представлен на рис. 3.

Третий эксперимент проводился для трубопровода с геометрическим профилем, описанным функцией:

$$z(x) = 20 - \frac{20}{1 + e^{-0,1(x-50)}} \quad (6)$$

При этом место утечки из трубопровода располагается по координате  $\zeta = 55$  м. и условным диаметром отверстия  $d_\zeta = 0,02$  м.

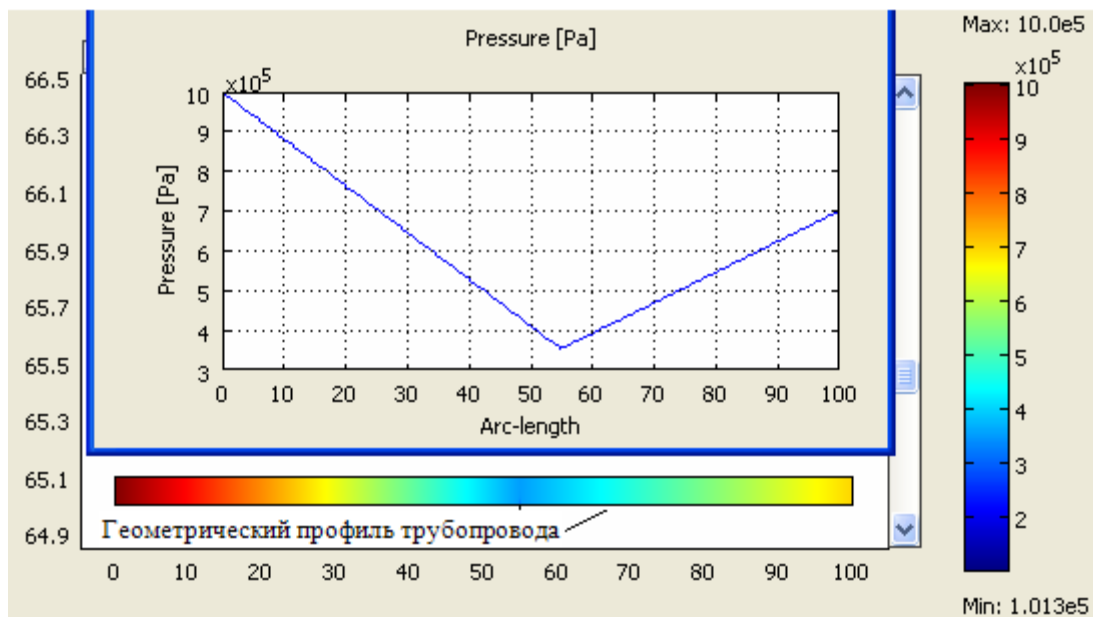


Рис. 2. Прямолинейный трубопровод с утечкой и график профиля давления, построенный в COMSOL Multiphysics

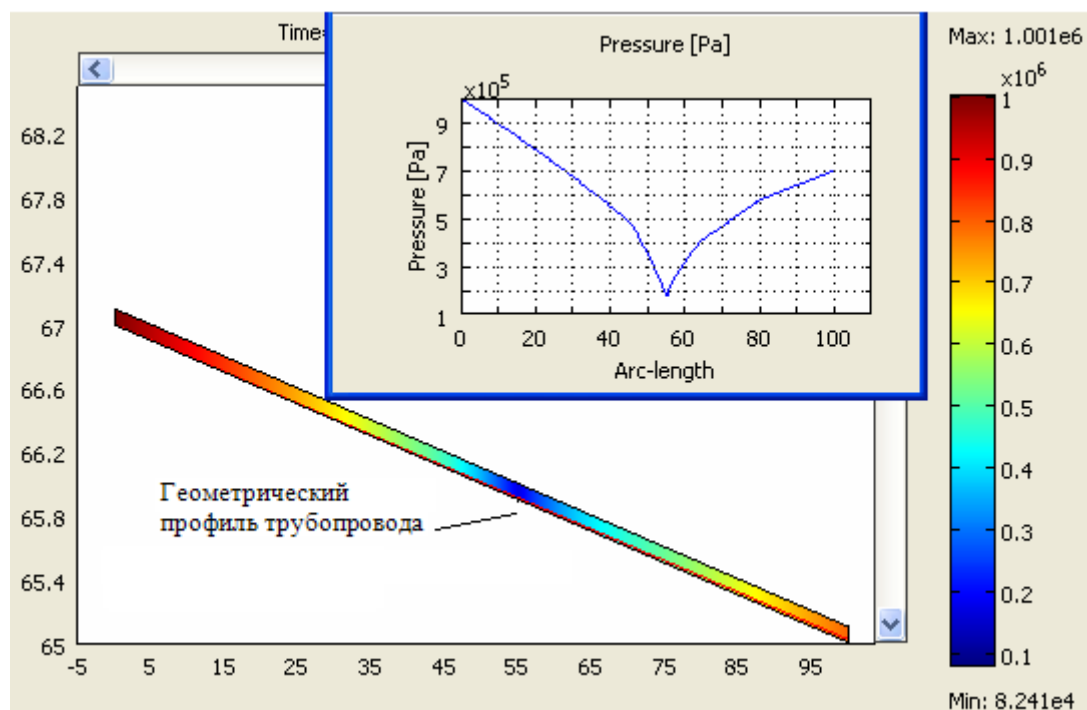


Рис. 3. Наклонный трубопровод с утечкой и график профиля давления, построенный в COMSOL Multiphysics

Для объектов сложной геометрической формы в пакете COMSOL Multiphysics получить точный геометрический профиль на протяжении всей длины трубопровода весьма трудно. В связи с этим для реализации трубопровода в виде сигмоидальной функции была произведена интерполяция функции и построено конечное число точек, координаты которых были рассчитаны по формуле (6). Далее средствами математического пакета были определены показания давлений с шагом 10 м. и в программном пакете Microsoft Excel построен профиль давления, представленный на рис. 4.

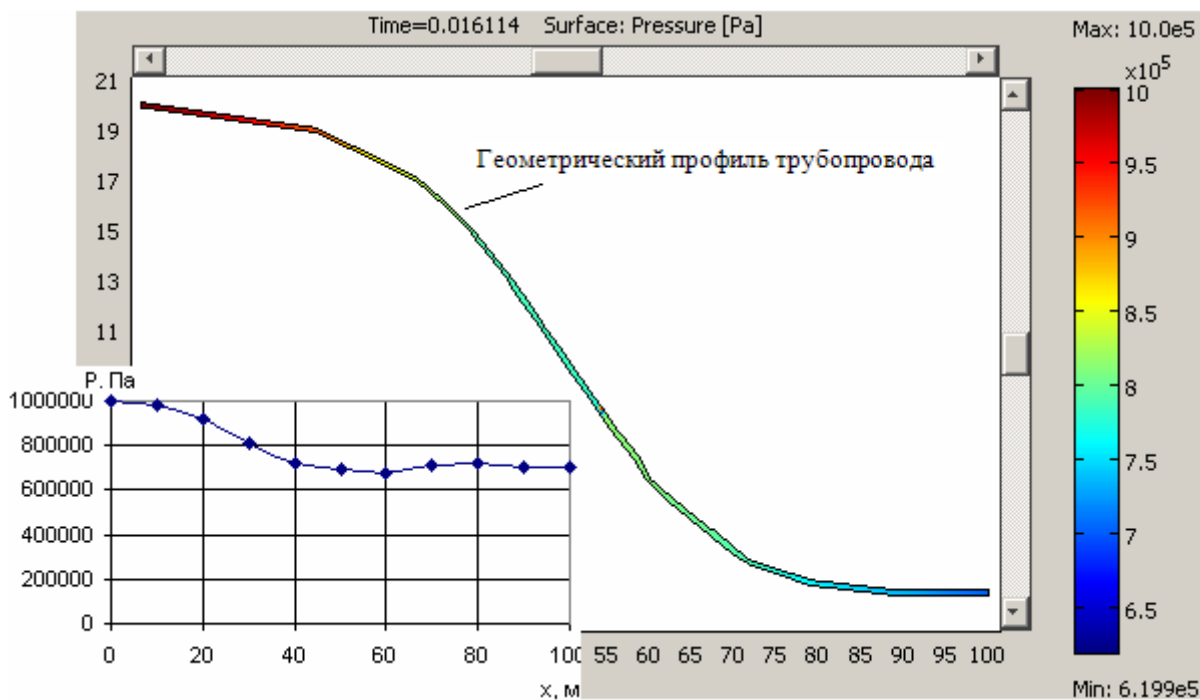


Рис. 4. График трубопровода сложной формы с утечкой, построенный в COMSOL Multiphysics, и его профиль давления

Из графиков, представленных на рисунках, видно, что даже при наличии минимального изменения геометрического профиля трубопровода, профиль давления в трубе с утечкой приобретает сложный характер. Следовательно, для расчёта параметров утечки необходимо воспользоваться универсальными алгоритмами определения параметров утечки, полученных через гидравлические уклоны (5).

Для расчёта массового расхода утечки трубопровода, построенного в пакете COMSOL Multiphysics, необходимо воспользоваться формулой для объёмного расхода жидкости  $Q$  по координате утечке при диаметре условного отверстия утечки  $d_\xi$  [2]:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2 g H_\xi}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода (примем равным 1);  $S_0$  – площадь условного отверстия утечки,  $m^2$ ;  $H_\xi$  – значение гидравлического напора в месте утечки, м.

Определяя по (7) с учётом (4)  $H_\xi$ , и считая, что массовый расход жидкости  $G_T = \rho \cdot Q$ , получим формулу для расчёта массового расхода жидкости в пакете COMSOL Multiphysics при утечке в виде:

$$G_T = \mu \rho S_0 \sqrt{2 \frac{P_\xi - P_{atm}}{\rho}}, \quad (8)$$

где  $P_{atm} = 101325$  Па – атмосферное давление.

Для проверки адекватности алгоритмов обнаружения параметров утечки (5) и результатам моделирования проведён расчет в математическом пакете MathCAD. 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 трубопровода показаны в табл. 2.

Таблица 2. Расчёт параметров утечки

№	Геометрический профиль трубы	Заданные значения в COMSOL Multiphysics		Рассчитанные значения по алгоритмам (4)		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	0,160	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

Проведённое моделирование установило, что полученные алгоритмы для расчёта параметров утечки (массового расхода и координаты) из трубопровода 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 адекватность алгоритма определения координаты утечки (5) для различных геометрических профилей трубопровода. Наблюдается также увеличение погрешностей расчёта параметров утечки  $\delta_\xi$  и  $\delta_{G_T}$  при повышении сложности геометрического профиля трубопровода.

В представленном пакете моделирования задание массового расхода производится посредством задания диаметра условной утечки и получение значения давления в месте, с координатой условной утечки. Тогда как расчёт массового расхода по формуле (5) происходит по показаниям датчиков давления, установленных в начале, в конце и по длине трубопровода, а также с учётом геометрического профиля  $z_\xi$ , зависящего от найденной координаты утечки. Следует также учитывать, что алгоритмы (5) имеют нелинейный характер. Совокупность перечисленных факторов ведёт к значительному повышению погрешности расчёта массового расхода утечки по алгоритму (5) в отношении к полученным в пакете моделирования COMSOL Multiphysics значениям массового расхода.



Таким образом, в данной работе была представлена гидродинамическая модель трубопровода, описывающая процессы утечки в трубопроводе в виде дифференциального уравнения и граничных условий, а так же её решение методом Фурье. Указаны алгоритмы определения параметров утечки (координаты и массового расхода), рассчитанные по пьезометрическому и гидравлическому профилям давления с учётом решений гидродинамической модели. Смоделированы и исследованы три случая геометрического профиля трубы: 1) прямолинейный трубопровод без уклона, 2) прямолинейный трубопровод с уклоном, 3) трубопровод сложной формы в виде сигмоидальной функции; получены алгоритмы с учётом геометрического профиля трубы через гидравлические характеристики. Полученные алгоритмы проверены на адекватность в программном пакете COMSOL Multiphysics и могут применяться для расчёта параметров утечки в трубопроводах, имеющих геометрические профили, описываемые с помощью сложных функций.

В дальнейшем планируется апробация универсальных алгоритмов определения параметров утечки на реальном нефтепроводе, а также повышение чувствительности указанного метода обнаружения утечки к малым утечкам.

### Литература

1. Вайншток С.М., Новосёлов В.В., Прохоров А.Д., Шаммазов А.М. Трубопроводный транспорт нефти: учебник для вузов в 2 т. Том 1. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 407 с.
2. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре / Основы гидравлики – курс лекций. URL: <http://gidravl.narod.ru/istechenie.html> (Дата обращения: 10.10.2011).
3. Справочник химика. Т. 5: Сырьё и продукты промышленности неорганических веществ. Процессы и аппараты. Коррозия. Гальванотехника. Химические источники тока / Под ред. Б. П. Никольского. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Химия, 1968. 974 с.
4. 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. Том 309. № 7. С. 70 - 73.
5. Степанченко Т. Е., Шкляр В. Н. Оценка точности алгоритма определения параметров утечки // Известия Томского политехнического университета. 2011. Том 318. № 4. С. 37 - 42.
6. Шкляр В.Н. Пространственно-комбинационный метод определения параметров утечки в магистральном нефтепроводе // Автоматическое управление и

информационные технологии: межвуз. науч.-техн. сборник. Вып. 1. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. С. 221 - 226.

7. COMSOL Multiphysics. Численное моделирование физических процессов. URL: <http://www.eurointech.ru/comsol> (Дата обращения: 21.06.2011).

8. Аварии на нефтепроводах: Текут нефтяные реки... // Беллона. URL: [http://www.bellona.ru/russian\\_import\\_area/energy/renewable/30468](http://www.bellona.ru/russian_import_area/energy/renewable/30468) (Дата обращения: 26.07.2012).

9. Савицкий Р.В., Блохина О.Л. Рассмотрение алгоритмов определения ожидаемой частоты возникновения аварийных ситуаций и сценариев их развития на магистральных нефтепроводах // III Общероссийская студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум», 15 - 20 февраля 2011 г., URL: <http://www.rae.ru/forum2011/pdf/1607.pdf> (Дата обращения: 26.06.2012).

10. Явление гидравлического удара // «Perpetuum mobile». 2006. URL: <http://khd2.narod.ru/hydrodyn/ramblow.htm> (Дата обращения: 23.02.2012).

11. Michael Gorny. Monitoring acoustic noise in steel pipelines // Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference, September 29 - October 3, 2008, Calgary, Alberta, Canada, 8 p.

12. Jun Zhang, Enea Di Mauro. Implementing a Reliable Leak Detection System on a Crude Oil Pipeline // Advances in Pipeline Technology 1998, Dubai, UAE. 12 p.

13. Корреляционный метод определения мест утечек жидкости в трубопроводах и принцип работы трубопроводных корреляционных течеискателей // ПК "Энерго-Профиль". URL: [http://pribor-yar.ru/metod\\_utechka](http://pribor-yar.ru/metod_utechka) (Дата обращения: 23.04.2012).

14. Кутуков С.Е. Проблема повышения чувствительности, надёжности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегазовое дело. Том 2 (2004). № 1. С. 29 - 45.

## THE ACCOUNT OF THE GEOMETRICAL OIL PIPELINE PROFILE FOR LEAKS PARAMETERS DETERMINATION

T.E. Mamonova

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*e-mail: stepte@tpu.ru*

**Abstract.** *In the presented work algorithms of definition of leak parameters in the pipelines, received by the decision of the equations of the hydrodynamic processes proceeding at occurrence of leaks in them, are considered. The given algorithms are transformed for a site of the continuous pipeline taking into account its geometrical profile, without the additional taps, lying between two pump stations. Working capacity of the received algorithms by means of the virtual pipeline constructed in software package COMSOL Multiphysics is checked up. The research results of the offered algorithms are resulted.*

**Keywords:** *main pipeline, hydraulic pipeline profile, pipeline leak, hydrodynamic model, pressure sensor, simulation model*

### References

1. Vainshtok S.M., Novoselov V.V., Prokhorov A.D., Shammazov A.M. *Truboprovodnyi transport nefti: uchebnik dlya vuzov v 2 t. Tom 1. (Oil pipeline transport: a textbook in 2 volumes. Vol. 1.). Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2004. 407 p.*

2. *Istechenie cherez malye otverstiya v tonkoi stenke pri postoyannom napore (The outflow through small holes in a thin wall with constant head) / Basic hydraulics – course of lectures. URL: <http://gidravl.narod.ru/istechenie.html> (Last access: 10.10.2011).*

3. *Spravochnik khimika. Tom 5: Syr'e i produkty promyshlennosti neorganicheskikh veshchestv. Protsessy i apparaty. Korroziya. Gal'vanotekhnika. Khimicheskie istochniki toka (The chemist's handbook. Vol. 5. Raw materials and industrial products of inorganic substances. Processes and equipment. Corrosion. Electroplating. Chemical power sources). Ed.: B.P. Nikolskii. 2 Ed. Moscow, Leningrad, Khimiya, 1968. 974 p.*

4. Stepanchenko T.E., Shklyar V.N. *Razrabotka i issledovanie algoritmov obnaruzheniya utechek v magistral'nykh truboprovodakh na osnove ikh gidrodinamicheskikh modelei (Development and research of leak detection algorithms in trunk pipelines on the bases of their hydrodynamic models), Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2006, Vol. 309, Issue 7, pp. 70 - 73.*

5. Stepanchenko T. E., Shklyar V. N. *Otsenka tochnosti algoritma opredeleniya parametrov utechki (Evaluation of the algorithm's accuracy for determining leak parameters of), Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2011, Volume 318, Issue 4, pp. 37 - 42.*

6. Shklyar V.N. *Prostranstvenno-kombinatsionnyi metod opredeleniya parametrov utechki v magistral'nom nefteprovode (Spatially-combinational method for the de-*

termination of leak parameters in the main oil pipeline), *Avtomaticheskoe upravlenie i informatsionnye tekhnologii: mezhvuzovskii nauchno-tekhnicheskii sbornik (Automatic control and information technology: interuniversity sci.-tech. papers collection)*. Issue 1. Tomsk, TPU, 2005. PP. 221 - 226.

7. COMSOL Multiphysics. Chislennoe modelirovanie fizicheskikh protsessov (Numerical simulation of physical processes). URL: <http://www.euointech.ru/comsol> (Last access: 21.06.2011).

8. Avarii na nefteprovodakh: Tekut neftyanye reki... (Accidents on oil pipelines: The oil rivers is flowing...) // Bellona Foundation. URL: [http://www.bellona.ru/russian\\_import\\_area/energy/renewable/30468](http://www.bellona.ru/russian_import_area/energy/renewable/30468) (Last access: 26.07.2012).

9. Savitskii R.V., Blokhina O.L. Rassmotrenie algoritmov opredeleniya ozhidaiemoi chastoty vozniknoveniya avariinykh situatsii i stsensariev ikh razvitiya na magistral'nykh nefteprovodakh (Consideration of the algorithms for determining the expected frequency of occurrence of emergency situations and scenarios of their development in the main oil pipelines), *III Obshcherossiiskaya studencheskaya elektronnyaya nauch. konf. "Studencheskii nauchnyi forum" (All-russian student's electronic sci. conf. "Student's Scientific Forum")*, 15 - 20 Febraury 2011, URL: <http://www.rae.ru/forum2011/pdf/1607.pdf> (Last access: 26.06.2012).

10. Yavlenie gidravlicheseskogo udara (The water hammer phenomenon) // «Perpetuum mobile». 2006. URL: <http://khd2.narod.ru/hydrodyn/ramblow.htm> (Last access: 23.02.2012).

11. Michael Gorny. Monitoring acoustic noise in steel pipelines // *Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference*, September 29 - October 3, 2008, Calgary, Alberta, Canada, 8 p.

12. Jun Zhang, Enea Di Mauro. Implementing a Reliable Leak Detection System on a Crude Oil Pipeline // *Advances in Pipeline Technology 1998*, Dubai, UAE. 12 p.

13. Korrelyatsionyi metod opredeleniya mest utechek zhidkosti v truboprovodakh i printsip raboty truboprovodnykh korrelyatsionnykh techeiskatelei (Correlation method for determining fluid leaks in pipelines and principle of operation of pipeline correlation leak detectors) // PK "Energo-Profil".

URL: [http://pribor-yar.ru/metod\\_utechka](http://pribor-yar.ru/metod_utechka) (Last access: 23.04.2012).

14. Kutukov S.E. Problema povysheniya chuvstvitelnosti, nadezhnosti i bystrodeistviya sistem obnaruzheniya utechek v truboprovodakh (Improvement in pipeline leak detection system's responsiveness, robustness and rapidity), *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, Volume 2 (2004), Issue 1, pp. 29 - 45.