



СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЙ УТЕЧЕК НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ LEAKSPY(NT)

Описание программного обеспечения СОУ

Листов 14

Москва
2026





СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Аннотация..... | 3 |
| Назначение документа | 3 |
| Что вы должны знать | 3 |
| Сведения о назначении программы | 3 |
| Используемые методы обнаружения утечек | 4 |
| Классы решаемых задач | 6 |
| Описание задач | 6 |
| Методы решения задач | 7 |
| Алгоритм 1. Алгоритм диагностики утечек на основе изменения профиля давления вдоль трубопровода | 7 |
| Алгоритм 2. Алгоритм диагностики утечек с использованием нестационарной математической модели трубопровода..... | 8 |
| Алгоритм 3. Алгоритм объёмного баланса..... | 10 |
| Алгоритм 4. Алгоритм по «волне давления»..... | 11 |
| Описание основных характеристик и особенностей программы..... | 12 |
| Временные характеристики..... | 13 |
| Режимы работы системы | 13 |
| Сведения о технических и программных средствах, обеспечивающих выполнение программы..... | 13 |
| Сведения о входных и выходных данных..... | 13 |
| Сведения о входных данных..... | 13 |
| Сведения о выходных данных..... | 14 |



Аннотация

Назначение документа

Настоящее Описание предназначено для ознакомления пользователя с программным обеспечением Система обнаружений утечек на магистральных трубопроводах LEAKSPY(NT).

Что вы должны знать

Характер изложения данного Руководства предполагает, что Вы знакомы с операционной системой компьютера, на котором работает система (MS Windows) и владеете базовыми навыками работы в ней.

Вы должны владеть следующими навыками:

1. использование меню «Пуск» для вызова программ;
2. приемы работы с окнами;
3. работа с меню;
4. использование управляющих элементов диалогов;
5. работа со стандартными диалогами;

Если Вы недостаточно хорошо владеете перечисленными выше понятиями и навыками, рекомендуем обратиться к документации по операционной системе.

Сведения о назначении программы

Анализ данных, опубликованных в литературе, а также опыт эксплуатации трубопроводов показывает, что не существует какого-то одного метода, который был бы одинаково эффективен для диагностики любых утечек: быстро и медленно развивающихся, больших и малых. Таким образом, чтобы добиться максимальной эффективности система диагностики утечек должна быть комбинацией различных методов. Как только используется несколько независимых алгоритмов, то возникает необходимость в специальном алгоритме принятия решения. Поскольку условия эксплуатации трубопровода меняются, то система должна быть гибкой и адаптивной. Для получения информации используют датчики и систему сбора и обработки данных, которые не свободны от ошибок. Это значит, что исходная информация может быть утеряна, задержана при передаче или просто недостоверна. Система диагностики утечек должна анализировать входящую информацию, фильтровать ее и интерполировать в случае необходимости, определять плохие измерительные каналы и согласовывать измеряемые параметры друг с другом.

Система должна базироваться на использовании математической модели, которая представляет собой численную форму уравнений сохранения вещества, движения и энергии, описывающих течение в трубопроводе. Эта динамическая модель для разветвленной трубопроводной системы. Исходными данными для нее являются получаемые из системы СДКУ данные о технологических параметрах, таких как давление,



расход, плотность, вязкость, скорость звука температура. Кроме диагностики утечек модель служит для расчета движения скребка, транспорта порций перекачиваемого вещества, анализа системы измерения, оценки потерь давления в трубопроводе и т.п.

Такой системой является система обнаружения утечек (СОУ) LEAKSPY(NT).

Программный комплекс LEAKSPY(NT) предназначен для использования предприятиями трубопроводного транспорта для непрерывной диагностики процессов, протекающих внутри трубопроводов. Используя оперативные данные, поступающие с датчиков давления, расхода, плотности, температуры, программа в реальном времени моделирует динамические процессы в трубопроводе, опираясь на основные законы и принципы динамики жидкости. Основное назначение программного комплекса LeakSPY(NT) – это определение факта утечки, её координаты и величины.

Помимо основной функции диагностики утечек LEAKSPY(NT) может использоваться для анализа перекачки, контроля исправности измерительной аппаратуры и достоверности информации о технологическом процессе, расчета движения скребка, плотности, вязкости (дополнительные функции).

Использование программного комплекса LEAKSPY(NT) позволяет:

- ❖ снизить экономические последствия от утечки путем уменьшения объема вылившейся жидкости за счет:
- ❖ сокращения времени от момента возникновения утечки до остановки перекачки;
- ❖ сокращения времени ликвидации утечки за счет точного указания места разрыва;
- ❖ снизить вероятность ошибок управления за счет автоматизации функции контроля состояния трубопровода и анализа измеренных значений технологических параметров, полученных из системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ);
- ❖ повысить надежность функционирования трубопровода и качества управления за счет автоматизации функции контроля состояния измерительных каналов.

Используемые методы обнаружения утечек

Процессы, протекающие в трубопроводе после появления в нем утечки, можно разбить по времени на 2 этапа:

- 1 этап – падение давления в начальный момент (длится от несколько долей секунды до 1-2сек), связанное с образованием волны давления;
- 2 этап – постепенное падение давления, связанное с переходом системы на новый режим работы.

На первом этапе расходы на входе и выходе равны друг другу, так как волна давления еще не пришла на вход и выход трубы. На втором этапе расход на входе увеличивается, а расход на выходе – уменьшается. Время установления нового режима зависит от длины трубопровода.

На Рис. 1 и Рис. 2 представлены графики типичного поведения давления и расходов на входе и выходе при образовании утечки.

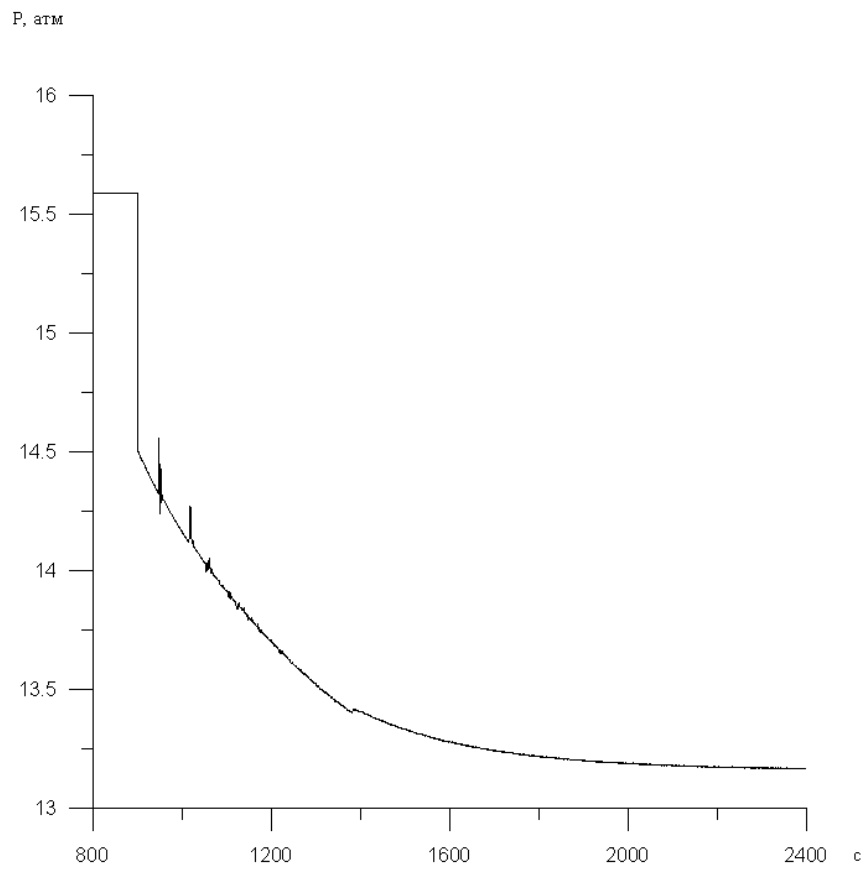


Рис. 1- Изменение давления в месте утечки в зависимости от времени

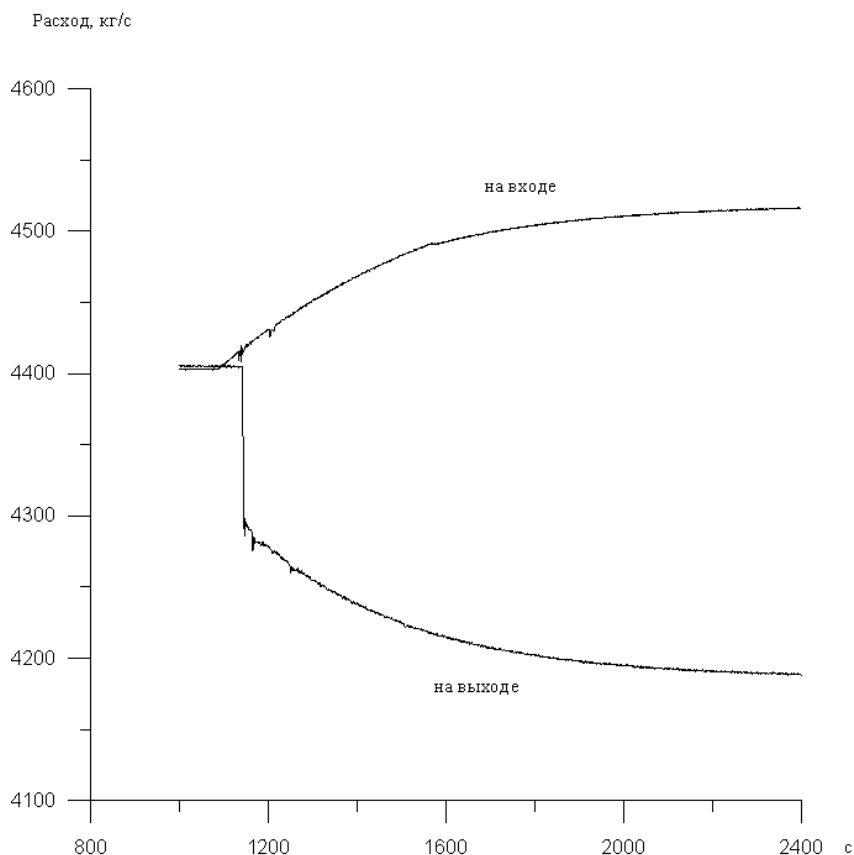


Рис. 2 - Изменение расхода на входе и выходе участка трубопровода при возникновении утечки в зависимости от времени

Отмеченные закономерности в поведении параметров позволяют разработать методы диагностирования утечек на основе изменения давлений и расхода.

Классы решаемых задач

Описание задач

Система обнаружения утечек (СОУ) предназначена для:

- ❖ определения состояния нарушения герметичности трубопровода;
- ❖ нахождения места и времени нарушения герметичности;
- ❖ определении размера предполагаемой утечки;
- ❖ передачи сигнала о нарушении герметичности трубопровода диспетчеру;
- ❖ контроля исправности измерительной аппаратуры и достоверности информации о технологическом процессе;
- ❖ ведения журнала контроля состояния трубопровода и соответствующих архивов.



Методы решения задач

Диагностика утечек на трубопроводе осуществляется 4 основными независимыми алгоритмами:

- ❖ алгоритм диагностики утечек на основе изменения профиля давления вдоль трубопровода (алгоритм 1);
- ❖ алгоритм диагностики утечек с использованием нестационарной математической модели трубопровода (алгоритм 2);
- ❖ алгоритм массового баланса (алгоритм 3)
- ❖ алгоритм диагностики утечек по волне давления (алгоритм 4);
- ❖ Дополнительные алгоритмы.

Набор исходных данных для каждого алгоритма уникален.

Алгоритм 1. Алгоритм диагностики утечек на основе изменения профиля давления вдоль трубопровода

Метод основан на изменении квазистатического распределения давления в результате появления утечки на трубопроводе. Производится анализ отклонения давления на установившемся квазистатическом режиме течения. Утечка вызывает увеличение расхода выше по течению в трубопроводе и уменьшение расхода – ниже по течению, таким образом, она вызывает соответствующее изменение давления в точках трубы. Данный метод реализуем для трубопроводов длиной от 40 км и при наличии 4х и более точек измерения давления.

Приведенный профиль давления вдоль трубы (рассчитанный с учетом геодезических отметок высот) имеет определенный вид, (линейный для жидкости). При появлении утечки расход G_1 на участке до места утечки становится больше первоначального расхода G_0 на этом участке, а расход на участке G_2 после места возникновения утечки становится меньше первоначального расхода G_0 (Рис. 2). Поэтому перепад давления на участке до места утечки увеличивается, а после утечки уменьшается, что приводит к появлению излома в приведенном профиле давления. На установившемся режиме перепады давлений ΔP_1 , ΔP_2 на участках до и после предполагаемой утечки определяется по формулам:

$$\Delta P_1 = \alpha_1 \cdot G_0^2 \quad (1.1)$$

$$\Delta P_2 = \alpha_2 \cdot G_0^2 \quad (1.2)$$

где α_1 , α_2 - коэффициенты, зависящие от геометрических размеров и коэффициентов сопротивлений участков до и после места возникновения утечки соответственно.

После возникновения утечки перепады давлений ΔP_1^1 , ΔP_2^1 на участках до и после утечки определяются по формулам:

$$\Delta P_1^1 = \alpha_1 \cdot (G_0 + \Delta G_1)^2 \quad (2.1)$$



$$\Delta P_2^1 = \alpha_2 \cdot (G_0 - \Delta G_2)^2 \quad (2.2)$$

где $\Delta G_1, \Delta G_2$ - изменения расходов на участках до и после места утечки.

Как видно из приведённых выше уравнений на участке до утечки перепад давления увеличивается, а после утечки уменьшается (здесь в первом приближении предполагалось, что коэффициенты α_1, α_2 при появлении утечки слабо изменяются).

Для работы алгоритма необходимо измерять давления на перекачивающих станциях и контролируемых пунктах линейной части.

1. Работа алгоритма отображается графиком «отклонение давления».
2. Алгоритм функционирует только на стационарном режиме перекачки.
3. Алгоритм выдает сообщение об изменении параметров в случае, если максимальное значение давления на одном из КП превышает значение $PR_{small} * Z$, а форма кривой изменения профиля давления коррелирует с формой кривой, соответствующей форме кривой при появлении утечки.
4. В случае работы на участке с отключенным алгоритмом определения утечки балансовым методом алгоритм определяет величину утечки. И превышение давлением значения $PR_{small} * Z$ означает малый уровень утечки, $PR_{med} * Z / PR_{big}$ – средний/большой.
5. Время существования утечки должно быть не менее времени, необходимого для обнаружения утечки (см. таблицу 1).
6. Через T_{adapt} мин. система адаптируется (подстраивается) к ступенчатому возмущению.
7. Алгоритм не выдает сообщения об утечке при превышении порога если:
8. идет нестационарный процесс;
9. превышение порога произошло, только по одному датчику давления
10. не снята предыдущая утечка по этому участку.
11. Срабатывание алгоритма отображается:
 - a. - записью «Обнаружено изм.парам....» в журнале диспетчера в случае, если на этом участке работает алгоритм по балансу или записью «<Уровень утечки> по Откл.Давл. ...»
 - b. - записью типа «Малая по Откл.Давл. Вблизи КП : км. Координата утечки :км.» для каждого из трех уровней утечки, если алгоритм по балансу на этом участке не работает.
 - c. - раскрашиванием участка н/п.

Для работы данного метода рекомендуется использовать измерения давления с периодом записи не более 1 секунды или порогом на передачу не более 0.04 кгс/см² и расстоянием между точками измерений не более 20 км.

Недостатком метода является его работа только на установившемся стационарном режиме работы трубопровода. Погрешность определения координаты данного метода составляет 2-5км.

Алгоритм 2. Алгоритм диагностики утечек с использованием нестационарной математической модели трубопровода



В данном алгоритме функционирует нестационарная математическая модель всего трубопровода. Нестационарная математическая модель описывает связь между давлением и расходом. В модели учитывается сжимаемость жидкости, ее инерционность, трение, профиль трассы и другие факторы. Использование математической модели уменьшает вероятность ложных срабатываний при осуществлении технологических операций на входе, выходе и промежуточных перекачивающих станций.

Если на входе в трубопровод увеличивается расход, то результатом этого станет увеличение давления в начале трубы. Напрессовка трубы наблюдается в постепенном увеличении давления вдоль трубопровода. Мы будем наблюдать соответствующее увеличение давления в измеряемых точках. Давление и расход являются, таким образом, функциями времени и координаты. Модель, заложенная в алгоритм, определяет вид этой функции.

Для работы этого алгоритма, кроме измерений давлений вдоль трубопровода, необходимо измерение расхода на входе и выходе трубопровода, а также привязка всех измеряемых параметров ко времени измерения с точностью не менее 1 сек.

Для адаптации модели система использует методы идентификации параметров. Если наблюдается рассогласование параметров процесса и модели, то это означает, что имеют место какие-то аварии трубопровода. В случае если превышен порог рассогласования, модель пытается достичь согласования между параметрами, выдвигается гипотеза наличия утечки. Любая утечка описывается двумя параметрами, расстоянием от некоторой точки отсчета до места утечки и размером отверстия. Модель будет варьировать эти параметры, чтобы минимизировать отклонения. Для этого используется последовательный анализ и интеллектуальная процедура распознавания.

Основная идея метода заключается в том, что при образовании утечки расход на входе становится больше расхода на выходе. Кроме того, в методе баланса масс учитывается также количество продукта в самой трубе, которое при образовании утечки уменьшается.

Для определения утечек используется уравнение: $\varepsilon = G_{in} - G_{out} - \Delta M / t$, где

- ε - накопление продукта в трубе;
- G_{in} - средний массовый расход на входе в трубу;
- G_{out} - средний массовый расход на выходе трубы;
- t - время анализа;
- ΔM - изменение массы продукта в трубе.

Изменение массы продукта в трубе ΔM зависит от давления p , температуры T , длины трубы L , диаметра трубы D , толщины стенки δ , модуля упругости металла E , термического коэффициента расширения металла κ , прочих свойств продукта β

$$\Delta M = f(p, t, \kappa, L, D, \delta, E, \alpha, \beta)$$

Для данного метода необходимо использование данных по расходу, давлению и температуре с периодом записи сигналов не более 2 секунд. Рекомендуемое оптимальное расстояние между расходомерами не более 150 км. Понятно, что чем меньший объём заключён между двумя соседними расходомерами, тем точнее работает метод, но при уменьшении расстояния на первый план выходит погрешность самих измерений (точность аппаратуры). Крайне важно для стабильной и надёжной работы метода, выполняющего



заявленные характеристики, работа расходомеров с одинаковыми временными (динамическими) настройками. Расстояние между точками измерения давления должно быть порядка 10-20 км.

Утечка считается обнаруженной, если система способна найти неизменные во времени параметры утечки, которые минимизируют рассогласование между данными о процессе и моделью.

1. Работа алгоритма отображается графиками «рассогласования». На стационарном процессе работают одновременно три модуля, определяющие утечки различной интенсивности (высокое, среднее и малое рассогласование). На нестационарном режиме работа алгоритма отображается на графике «рассогласования на нестационаре».
2. Функционирует как на стационарном, так и на не стационарном режимах перекачки.
3. Выдает сообщение об утечке в случае, если функция рассогласования превышает заданный порог **MRsmall/MRmed/MRbig/MRunstate** (пороги различны для трёх модулей, рассчитывающих функцию рассогласования); Пороги функций рассогласования настраиваются таким образом, чтобы обеспечить паспортные характеристики системы.
4. Функционирует только при нормальной работе (не отбракованных и не выключенных) расходомеров, ограничивающих контролируемый участок;
5. Время существования утечки должно быть не менее времени, необходимого для диагностирования утечки.
6. Срабатывание алгоритма отображается записью «*Рассогласование Уровень* <<Уровень утечки>» в журнале диспетчера и раскрашиванием участка н/п между расходомерами, между которыми обнаружено рассогласование.

Метод позволяет обнаруживать утечки объёмом не менее погрешности используемых расходомеров. То есть при использовании накладных УЗ расходомеров: для жидких сред граница чувствительности метода будет около 1%

Недостатком метода является принципиальная невозможность определить место возникновения утечки, метод фиксирует только факт её появления на диагностируемом участке. Преимущество метода – высокая стабильность (минимум «ложных» срабатываний)

Алгоритм 3. Алгоритм объёмного баланса

Метод объёмного баланса является одним из самых простых и распространенных в мире методов диагностики утечек.

Точность метода зависит от точности расходомеров. Невозможно обнаружить утечку, которая меньше чем погрешность измерения расхода. В данном случае абсолютно не имеет значения абсолютная величина ошибки измерения, а только относительная погрешность одного прибора относительно другого.

Работа алгоритма 3 идентична работе алгоритма 2. Заданные пороги для этого алгоритма равны **VRsmall/VRmed/VRbig/VRunstate** Результаты работы обоих алгоритмов выводятся на поля одних графиков.



В системе предусмотрена возможность подключения при необходимости и других алгоритмов диагностики:

Алгоритм автоматического определения направления течения нефти

1. Алгоритм автоматически определяет направление течения нефти при установке режима определения течения в положение «АВТО» (см. «карта течений»);
2. Алгоритм корректно определяет течение нефти по трубе, если значения состояния задвижек по всей трубе, поступающие в СДКУ, соответствуют действительности - (откр/закр/промеж.);
3. Если состояние задвижки «плохое» (например – «обесточена») – алгоритм считает, что данная задвижка «открыта»;
4. Если задвижка находится в промежуточном состоянии (открывается, закрывается), то считаем что проток через неё есть.

Алгоритм 4. Алгоритм по «волне давления»

Алгоритм основан на обнаружении волны падения давления, возникающей в трубопроводе при утечке. Диагностируются утечки в трубе, возникающие между контрольными пунктами системы, на которых измеряется давление. Определяется время возникновения, координата и примерная величина утечки. Вся информация передается на верхний уровень системы управления и отображается на экране персонального компьютера. Данный метод позволяет определять утечки менее 1%. Координата утечки в данном методе определяется с точностью до 50-200м. Для реализации метода на диагностируемом участке трубы должны быть использованы измерения давлений на контролируемых пунктах (КП1, КП2, рис.1) на расстоянии $L=(1-50)$ км, снабженные контролером и датчиками избыточного давления. Контролируемые пункты должны быть синхронизованы с погрешностью $\Delta t=\pm 10$ мс.

Дополнительные алгоритмы

Алгоритм определения и снятия нестационарного процесса

1. Признак нестационарного процесса выставляется при изменении одного из следующего параметра по изменению значения данных телеметрии:
 - a. вкл\выкл МА, ПА, насосов откачки нефти;
 - b. откр\закр задвижек;
 - c. изменение положения регулятора на значение более заданного;
 - d. закачка\окончание закачки) присадок.
2. На протяжении всего нестационарного процесса работает алгоритм определения утечки с использованием балансового метода.
3. На протяжении всего нестационарного процесса не работает алгоритм определения утечки по отклонению давления и по волне давления.
4. После начала нестационарного процесса система анализирует изменения давления и снимает признак нестационарности если изменения давлений не превышают **PRNost**.
5. Через время **T3** система снимет нестационарный процесс в любом случае.



Алгоритм снятия утечки

1. При появлении утечки, обнаруженной по алгоритму 1 (по отклонению давления) и 2 (балансовый метод), включается алгоритм снятия утечки. Процедура снятия идентична процедуре снятия нестационарного процесса, описанной выше.
2. Во время удержания факта утечки ПСОУ не диагностирует участок на предмет возникновения второй и более утечек. После того как утечка сбрасывается, ПСОУ снова готова к диагностированию утечек на данном участке.
3. Через время **T2** система снимет утечку в любом случае.

Алгоритм определения утечки на остановленной трубе

Работает на остановленном трубопроводе в случае, если хотя бы одна задвижка на линейной части закрыта. Позволяет фиксировать малые утечки.

Алгоритм определения повышения давления (напрессовки) в трубе

Выдает сообщение о повышении давления (заданном в настройках) на стационарном режиме работы.

Алгоритм расчета движения и координаты СОД

В программном комплексе LEAKSPY(NT) осуществлены две методики, отслеживающие расположение скребка. При наличии сигнализаторов прохождения скребка происходит уточнение расписания прохождения скребка, и его координата. Если сигнализаторы отсутствуют, то вместо них для уточнения расписания и координаты скребка можно использовать пары датчиков давления на КП.

Если хотя бы один алгоритм обнаружил утечку, то активизируется алгоритм принятия решения. Этот алгоритм является интеллектуальной экспертной системой, которая должна сопоставить диагнозы, полученные различными методами, и реальные условия процесса. Происходит процедура голосования. Каждый алгоритм формирует «мнение» и имеет соответствующий «вес». Основная цель использования этого алгоритма состоит в уменьшении числа срабатываний не связанных с утечкой.

Предусмотрено три уровня аварийной сигнализации. Они зависят от степени уверенности и величины утечки. Соответствующие этим уровням пороги настраиваются. Все сообщения об утечках и данные о процессе архивируются. Этот архив может быть восстановлен и просмотрен повторно.

Описание основных характеристик и особенностей программы

СОУ функционирует как автономная задача на выделенном персональном компьютере (ПК), находящемся в локальной вычислительной сети диспетчерского пункта.

Для сбора информации о технологическом объекте используется штатная система телемеханики.

СОУ является системой реального времени. При обнаружении утечки система оповещает диспетчера при помощи световой и звуковой сигнализаций и текстовых сообщений на АРМ оператора.



Временные характеристики

Срок службы СОУ не менее 12 лет.

Режимы работы системы

Предусмотрены следующие режимы функционирования системы:

- ❖ **Режим сбора данных и адаптации.** В этом режиме система осуществляет сбор данных и архивацию для их анализа и настройки коэффициентов алгоритмов диагностики. В этом режиме выполняется часть вспомогательных функций программы.
- ❖ **Рабочий режим.** Это основной режим работы программы. В этом режиме выполняются все основные функции программы.
- ❖ **Режим воспроизведения.** В этом режиме система осуществляет воспроизведение собранных ранее, либо подготовленных путем математического моделирования, данных. Режим предназначен для анализа имевших место ранее событий, а также для обучения.
- ❖ **Режим настройки.** Этот режим используется разработчиками программы для настройки ее функциональных возможностей. В этом режиме программа может выполнять ограниченный набор вспомогательных функций.

Сведения о технических и программных средствах, обеспечивающих выполнение программы

Программный комплекс LEAKSPY(NT) функционирует на IBM PC совместимом компьютере, подключенном к системе телемеханики через локальную сеть. Обмен данными осуществляется через файлы типа *.xfr с использованием стандартных сетевых средств операционной системы и протокола TCP/IP.

Сведения о входных и выходных данных

Сведения о входных данных

Для функционирования СОУ необходимо, поступление в компьютер СОУ следующих параметров:

- ❖ давление со всех линейных контролируемых пунктов;
- ❖ давление с входа и выхода перекачивающих станций;
- ❖ объемный расход на входе и выходе контролируемого участка трубопровода;
- ❖ объемный расход во всех промежуточных точках подкачки/отбора;
- ❖ плотность, вязкость, скорость звука, температура продукта перекачки на входе и выходе контролируемого участка;



- ❖ состояние задвижек (открыта/закрыта/промежуточное состояние) на линейной части трубопровода и задвижек на перекачивающих станциях, изменение положения которых оказывает влияние на технологические параметры перекачки;
- ❖ состояние (включен/выключен) магистральных насосных агрегатов;
- ❖ состояние (включен/выключен) подпорных насосных агрегатов;
- ❖ сигналы от сигнализаторов прохождения скребка;
- ❖ положение регулятора давления на перекачивающей станции;
- ❖ запуск/останов насоса откачки утечек.

Все измеренные величины и сигналы о любых событиях должны поступать в систему с меткой времени, которая присваивается соответствующим контроллером нижнего уровня и соответствует тому моменту времени, когда параметр фактически был измерен (событие произошло). Погрешность временной привязки событий и измерений, то есть отличие присвоенной метки времени от фактического абсолютного астрономического времени в момент события/измерения, должна быть не хуже 1сек.

Данные по состоянию задвижек, насосных агрегатов и сигнализаторов прохождения скребка поступают по изменению, с меткой времени, которая присваивается в контроллере и соответствует фактическому времени изменения состояния.

Расходы и давления измеряются одновременно во всех точках трубопровода с фиксированным периодом.

Сведения о выходных данных

Основными выходными данными программы является информация о нарушении герметичности трубопровода, о месте нарушения герметичности, о величине утечки. Кроме этого LEAKSPY(NT) позволяет получить информацию об исправности измерительной аппаратуры и достоверности информации о технологическом процессе, а также о движении скребка, транспорте плотности, вязкости (дополнительные функции). Выходные данные сохраняются в БД СОУ.

Выходными данными об утечках ПО LEAKSPY(NT) являются тэги, которые передаются с использованием OPC технологии в СДКУ.

Временные характеристики обнаружения утечки увеличены на величину гарантированного времени доставки, то есть максимальную величину задержки между моментом, когда происходит событие/измерение, и моментом получения информации об этом событии СОУ из СДКУ.