

УДК:621.317.38:621.65:621.643

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Р. Н. Манько, Т. В. Коренькова

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: baharia1@mail.ru

Показано, что трубопроводные сети насосных комплексов характеризуются частым возникновением утечек. Установлено, что волновые процессы в трубопроводной сети с утечкой зависят от места локализации аварии, величины утечки, конструктивных параметров трубопроводной сети, а также свойств транспортируемой жидкости. Отмечено, что для диагностики утечки целесообразно использовать сигнал гидравлической мощности, частотный анализ которой позволяет получить более широкий спектр диагностических признаков нестационарного режима. Показано, что утечка сопровождается ростом переменной составляющей гидравлической мощности, а именно ее синусоидальной компоненты. Для оценки гармонического состава гидравлической мощности при возникновении утечки в трубопроводной сети предложен коэффициент усиления переменной составляющей мощности. Установлено, что чем больше величина утечки и ближе ее расположение к контрольной точке измерения технологических параметров, тем выше значение коэффициента усиления переменной составляющей гидравлической мощности. Получена аппроксимационная функция для определения места утечки в трубопроводной сети в зависимости от величины утечки и места ее локализации.

Ключевые слова: трубопроводная сеть, утечка, волновые процессы, гидравлическая мощность, частотный анализ.

ВИКОРИСТАННЯ В ЗАДАЧАХ ДІАГНОСТИКИ ВИТОКУ В ТРУБОПРОВОДНІЙ МЕРЕЖІ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ ГАРМОНІЧНОГО АНАЛІЗУ ГІДРАВЛІЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Р. М. Манько, Т. В. Коренькова

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: baharia1@mail.ru

Показано, що трубопровідні мережі насосних комплексів характеризуються частими виникненнями витоків. Установлено, що хвильові процеси в трубопровідній мережі з витокем залежать від місця локалізації аварії, величини витoku, конструктивних параметрів трубопровідної мережі, а також властивостей рідини, що транспортується. Відзначено, що для діагностики витoku доцільно використовувати сигнал гідравлічної потужності, частотний аналіз якої дозволяє отримати більш широкий спектр діагностичних ознак нестационарного режиму. Показано, що витік супроводжується зростанням змінної складової гідравлічної потужності, а саме її синусоїдальної компоненти. Для оцінки гармонічного складу гідравлічної потужності при виникненні витoku в трубопровідній мережі запропонований коефіцієнт підсилення змінної складової потужності. Установлено, що чим більше величина витoku й ближче її розташування до точки виміру технологічних параметрів, тим вище значення коефіцієнта підсилення змінної складової гідравлічної потужності. Отримано апроксимаційну функцію для визначення місця витoku в трубопровідній мережі залежно від величини витoku й місця її локалізації.

Ключові слова: трубопровідна мережа, витік, хвильові процеси, гідравлічна потужність, частотний аналіз.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Трубопроводные сети являются неотъемлемой частью насосных комплексов (НК) и предназначены для транспортировки под давлением различных рабочих сред. Трубопроводные сети Украины характеризуются достаточно низким техническим состоянием – пятая часть трубопроводных магистралей исчерпали свой эксплуатационный ресурс. Так, например, из общей протяженности трубопроводных сетей жилищно-коммунального хозяйства Украины 30 % общей длины трубопроводов находятся в аварийном состоянии и требуют ремонта, восстановления или замены. Такая ситуация приводит к значительному росту аварий – до 180 аварий на 100 км трубопроводов [1].

Анализ [2, 3] показал, что наиболее частыми аварийными ситуациями являются утечки в трубопроводах (рис. 1), которые сопровождаются загрязнением окружающей среды и существенными материальными затратами на их ликвидацию.



а)



б)

Рисунок 1 – Примеры порывов трубопроводных сетей вследствие коррозионных процессов в трубопроводе (а); неудачной врезки в магистральный нефтепродуктопровод (б)

При этом непроизводительные потери жидкости из-за утечек составляют от 3 до 7 % от общего количества транспортируемой среды [2]. Перекачка жидкости посредством трубопроводных сетей – это энергозатратная индустрия, которая потребляет 2–3 % мировой выработки электроэнергии [3], поэтому утечки связаны с нерациональным расходом большого количества энергии.

По данным [2, 3], основными причинами, приводящими к утечкам в трубопроводных сетях, являются: коррозия (42 %), внешние воздействия (28 %), дефекты конструкции (16 %), несанкционированные врезки в трубопровод (8 %) и другие причины (6 %).

Анализ [2, 3] показал, что утечки можно классифицировать по следующим признакам:

– причине возникновения:

внешнее воздействие (механическое воздействие на трубопровод, землетрясение);

коррозия;

низкое качество материала или дефекты трубы;

несанкционированные врезки в трубопровод;

– виду утечки:

точечная (свищ с диаметром отверстия меньше 2 см);

порыв (диаметр отверстия больше 2 см или равен диаметру трубы);

разрыв (диаметр отверстия больше диаметра трубы);

– величине утечки:

малые (не превышающие 3–5 % номинального значения расхода Q_n);

средние (до 10 % Q_n);

большие (свыше 10 % Q_n);

– характеру изменения утечки во времени:

постоянное истечение жидкости;

периодическое истечение жидкости.

На рис. 2 показана частота аварий в НК в зависимости от вида утечки [2]. Анализ диаграммы по-

казал, что наибольшее количество аварий обусловлено появлением трещин (свищей) и отверстий, возникающих вследствие развития коррозионных и волновых процессов в трубопроводных сетях.

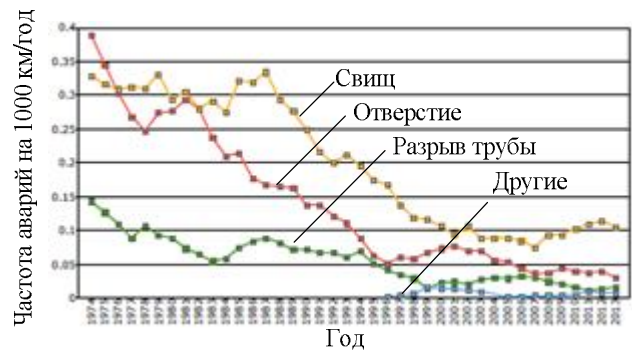


Рисунок 2 – Частота аварий в трубопроводных сетях в зависимости от вида утечки

Возникновение утечек в трубопроводной сети НК сопровождается изменением скорости и давления потока перекачиваемого продукта, изменением мощности, потребляемой насосными агрегатами, возникновением специфического акустического шума в трубопроводе и т.п.

В настоящее время существует достаточно большое разнообразие методов диагностики утечек в трубопроводных магистралях [4–7]. Использование того или иного метода зависит от параметров трубопровода, профиля трассы, свойств перекачиваемой жидкости, направления и режима перекачки, а также природно-климатических условий. Одни методы позволяют установить только факт наличия утечки, с помощью других удастся определить место повреждения трубопровода.

Общая характеристика наиболее известных методов диагностики утечек приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Общая характеристика методов диагностики утечек в трубопроводных сетях

Название метода	Параметр измерения
<i>Методы постоянного мониторинга</i>	
Метод отрицательных ударных волн	$dH(t)/dt$
Метод мониторинга давления с фиксированной уставкой	$H(t)$
Частотный анализ сигнала давления	
Метод сравнения расходов	$Q(t)$
Метод линейного баланса	
Метод сравнения скорости изменения расходов	$dQ(t)/dt$
Частотный анализ сигнала гидравлической мощности	$P_h(t)$
<i>Методы периодического контроля</i>	
Метод падения давления	$H(t)$
Метод мерных сосудов	$dQ(t)/dt$
Акустический метод	–
Визуальный метод	–

В зависимости от режима работы трубопровода различают методы статического и динамического контроля. Первые используются для диагностики аварий при временно прекращенной перекачке рабочей среды НК. При статическом контроле утечку можно обнаружить методом падения давления или методом дифференциального давления. Данные методы относятся к достаточно точным и позволяют обнаруживать утечки порядка $0,1-1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Однако их существенным недостатком является невозможность определения места возникновения утечки, а также необходимость остановки эксплуатируемого оборудования, что, в большинстве случаев, является недопустимым. Методы динамического контроля работают по тому же самому принципу, но не требуют для своей реализации остановки технологического оборудования.

По периодичности контроля выделяют методы периодической и непрерывной проверки наличия утечки в трубопроводной сети.

Зачастую методы диагностики утечек в качестве основных диагностических параметров используют напор $H(t)$ и расход $Q(t)$, а также их производные по времени d/dt или по длине d/dt [5–7].

В последнее время на практике достаточно широко используются акустические методы [7], базирующиеся на спектрально-акустическом анализе изменения амплитуд вибрации в трубопроводе. Такие методы позволяют определить место развития и характер аварийной ситуации. Акустические методы контроля делятся на две группы: активные методы, основанные на генерировании акустических колебаний и волн; пассивные методы, осуществляющие прием колебаний и волн. Таким образом, по полноте получаемых сведений о состоянии элементов трубопровода, малому числу используемых датчиков и высокому быстродействию акустические методы контроля являются наиболее распространенными. Однако акустические методы обнаружения утечек затруднительно использовать для трубопроводов из пластиковых труб и трубопроводов большого диаметра (свыше 500 мм) в связи с быстрым затуханием вибрационных колебаний, возникающих при наличии утечек.

Обобщая вышеперечисленное, следует отметить, что методы определения утечек в трубопроводных сетях должны базироваться на анализе волновых процессов в трубопроводных магистралях. Очевидно, использование на практике того или иного метода будет зависеть от конфигурации трубопровода, условий его эксплуатации, свойств перекачиваемой среды, характера утечки и т.п. Поэтому является целесообразным поиск такого метода, который бы обладал достаточной точностью и простотой при минимальных затратах на его внедрение.

С учетом сказанного заслуживает внимания метод гармонического анализа волновых процессов в

трубопроводе не по прямым параметрам измерения напора $H(t)$ и расхода $Q(t)$, а на базе гидравлической мощности $P_h(t)$, равной произведению этих величин. Такой подход позволяет определять не только факт наличия утечки, но и различать развитие других нестационарных процессов в трубопроводной сети (кавитация, гидравлический удар, помпаж и другие) [8–10].

Целью работы является оценка влияния параметров утечки на волновые процессы в трубопроводной сети насосного комплекса на базе частотного анализа гидравлической мощности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

А. Исследование волновых процессов в трубопроводной сети НК с утечкой

Возникновение утечки напрямую связано с появлением волновых процессов в трубопроводной сети, которые сопровождаются появлением вибраций, распространяющихся по длине трубопровода. Эти вибрации являются результатом взаимодействия молекул жидкости между основным потоком и потоком, возникающим в результате разгерметизации, и служат признаком утечки [11].

Утечка влияет на технологические параметры всего НК: потеря массы вызывает падение напора и, как следствие, возникает перемещающаяся «волна низкого давления», которая движется в обоих направлениях по трубопроводу со скоростью звука в жидкости. При падении давления ускоряется поток жидкости на входе в трубопровод, а поток на выходе из трубопровода, наоборот, уменьшается [12]. Анализ [13, 14] показал, что на характер волновых процессов в трубопроводной сети при наличии утечки влияет ряд факторов: материал трубы (чем плотнее стенки трубы, тем на большее расстояние распространится звук при возникновении утечки); диаметр трубопровода (трубы большого диаметра, как правило, ослабляют вибрации); степень уплотнения почвы вокруг трубы (когда почва вокруг трубы плотно спрессована, стенка трубы теряет часть своей эластичности и передача звука улучшается) и др.

Величина потерь перекачиваемого продукта зависит от места и размеров повреждения, а также от времени его обнаружения и устранения. Объем потерянной жидкости может оказаться значительным даже при относительно небольших повреждениях, если они остаются незамеченными в течение длительного периода времени.

На рис. 3 показана обобщенная схема трубопроводной сети с утечкой и двумя контрольными точками (КТ) измерения технологических параметров (напора и расхода), расположенных на насосной станции (НС) и в конце трубопроводной сети у потребителя (П). В качестве примера рассмотрен случай возникновения утечки I на расстоянии 300 м от НС и утечки II на расстоянии 2700 м соответственно.

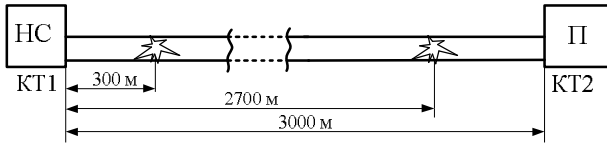


Рисунок 3 – Обобщенная схема трубопроводной сети с утечкой и двумя контрольными точками измерения технологических параметров

Для исследования волновых процессов в НК разработана математическая модель (рис. 4), включающая [15] насосный агрегат, трубопроводную сеть с потребителем в конце, блок формирования утечки.

Напорно-расходная характеристика насосного агрегата (НА) описана выражением вида

$$H_p = A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3, \quad (1)$$

где $v = \omega_i / \omega_n$ – относительная частота вращения рабочего колеса насоса; ω_i, ω_n – текущая и номинальная угловая частота вращения электропривода насоса соответственно, c^{-1} ; ρ – плотность перекачиваемой жидкости, $кг/м^3$; $g = 9,81 \text{ м}/c^2$ – ускорение свободного падения; H_p, Q_p – напор и расход на выходе НА соответственно, $м, м^3/с$; A_3, B_3, D_3 – коэффициенты аппроксимации, определяемые по паспортной характеристике насоса.

Инерционность НА учитывается аperiodическим звеном первого порядка вида

$$W_p(s) = \frac{H_i(s)}{H_p(s)} = \frac{1}{T_p s + 1}, \quad (2)$$

где T_p – постоянная времени насоса.

Для описания волновых процессов в трубопроводной сети используются телеграфные уравнения, решение которых находится методом конечных элементов. При этом трубопроводная сеть представляется неразветвленной системой из последовательно соединенных взаимосвязанных участков трубопровода, где выходные параметры (напор, расход) предыдущего участка являются входными для последующего. Система дифференциальных уравнений трубопроводной сети имеет вид:

$$\begin{cases} H_i - H_{i-1} + l_0 l_{sect} \frac{dQ_{i-1}}{dt} + r_0 l_{sect} Q_{i-1} |Q_{i-1}| = 0; \\ \frac{dH_i}{dt} + c_0 \frac{1}{l_{sect}} (Q_i - Q_{i-1}) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $r_0 = \frac{\lambda}{S^2 d} \frac{1}{2g}$ – удельное гидравлическое сопротивление участка трубопроводной сети, $c^2/м^5$; $c_0 = \frac{c^2}{Sg}$; $l_0 = \frac{1}{Sg}$ – гидравлические емкостное и индуктивное сопротивления участка трубопроводной сети соответственно, $c^2/м^5, м^{-1}$; $H_i, Q_i, H_{i-1}, Q_{i-1}$ – напор и расход на выходе и входе i -го участка сети

соответственно, $м, м^3/с$; c – скорость распространения звука в среде, $м/с$; d – диаметр трубопровода, $м$; λ – безразмерный коэффициент, учитывающий потери напора на трение на участке трубопровода.

Гидравлическая характеристика потребителя имеет вид:

$$H_{con} - h_{st} = R_{con} Q_{con}^2, \quad (4)$$

где H_{con}, Q_{con} – напор и расход в сети потребителя соответственно, $м, м^3/с$; h_{st} – статический напор в трубопроводе, $м$; R_{con} – гидравлическое сопротивление потребителя, $c^2/м^5$.

Блок формирования утечки в модели описан RLC – цепочкой с параметрами, отличными от параметров трубопроводной сети, и может быть подключен к любому ее участку. Получение необходимых значений утечки Q_{leak} осуществляется уменьшением гидравлического сопротивления R_{leak} трубы.

В качестве объекта моделирования рассмотрен НК с номинальными параметрами: насоса $H_n = 94 \text{ м}$, $Q_n = 0,5928 \text{ м}^3/с$, $P_n = 800 \text{ кВт}$ и трубопроводной сети $L = 3000 \text{ м}$, $d = 1,2 \text{ м}$, условно представленной 20-ю элементарными участками с параметрами: $l_0 = 0,0654 \text{ с}^2/м^3$, $r_0 = 13,6978 \text{ с}^2/м^6$, $c_0 = 679,8 \text{ м}^{-1}$; трубопровод – прямолинейный, круглого сечения; материал трубы – сталь; параметры блока утечки $l_{leak} = 9,81 \text{ с}^2/м^3$; $r_{leak} = 0,0219 \text{ с}^2/м^6$; $c_{leak} = 1,01 \text{ м}^{-1}$.

На рис. 5 приведены кривые изменения технологических параметров – напора $H(t)$ и расхода $Q(t)$ при внезапном появлении утечки в момент времени 10 с. Место локализации утечки расположено на расстоянии 300 м от контрольной точки КТ1, а ее величина составляет $Q_{leak} = 0,035 Q_n$. На рис. 6 представлены кривые изменения напора и расхода при внезапном появлении утечки $Q_{leak} = 0,035 Q_n$ на расстоянии 2700 м от КТ1.

Анализ полученных кривых показал, что напор в НК на всех участках гидросети снижается, при этом производительность на выходе НС растет, а у потребителя, ввиду наличия утечки, уменьшается.

Кривые изменения напора и расхода при внезапном появлении утечки $Q_{leak} = 0,035 Q_n$ на 10 с одновременно в двух точках трубопроводной сети приведены на рис. 7. В случае возникновения утечки на нескольких участках характеристика волнового процесса усложняется вследствие распространения по трубопроводу отрицательных волн давления, образовавшихся от точек разгерметизации. Отрицательные волны давления, возникшие при утечке, распространяются в обе стороны, поэтому датчиками сначала будут фиксироваться короткие волны от ближайших мест утечки, а после – длинные, отраженные волны (рис. 7).

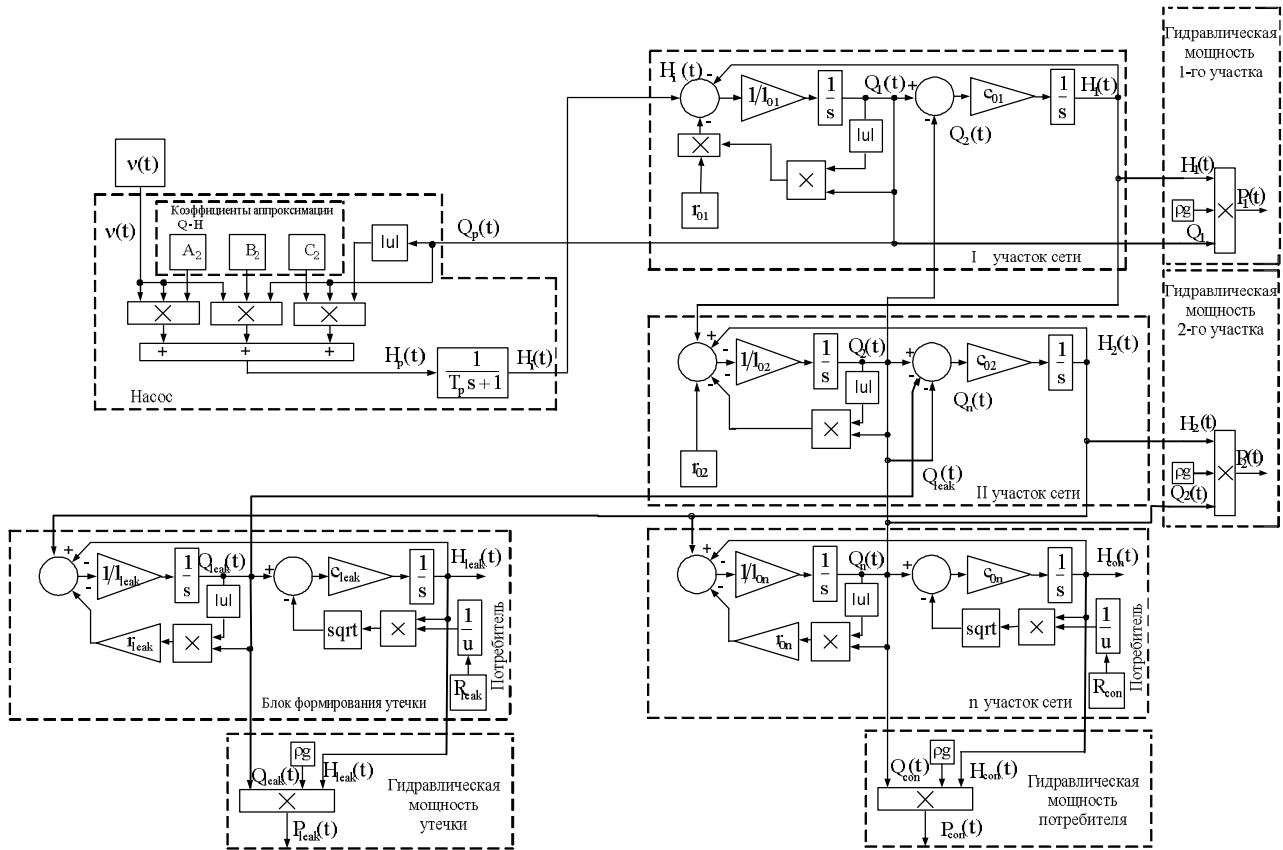


Рисунок 4 – Структурная схема математической модели трубопроводной сети насосного комплекса при возникновении утечки

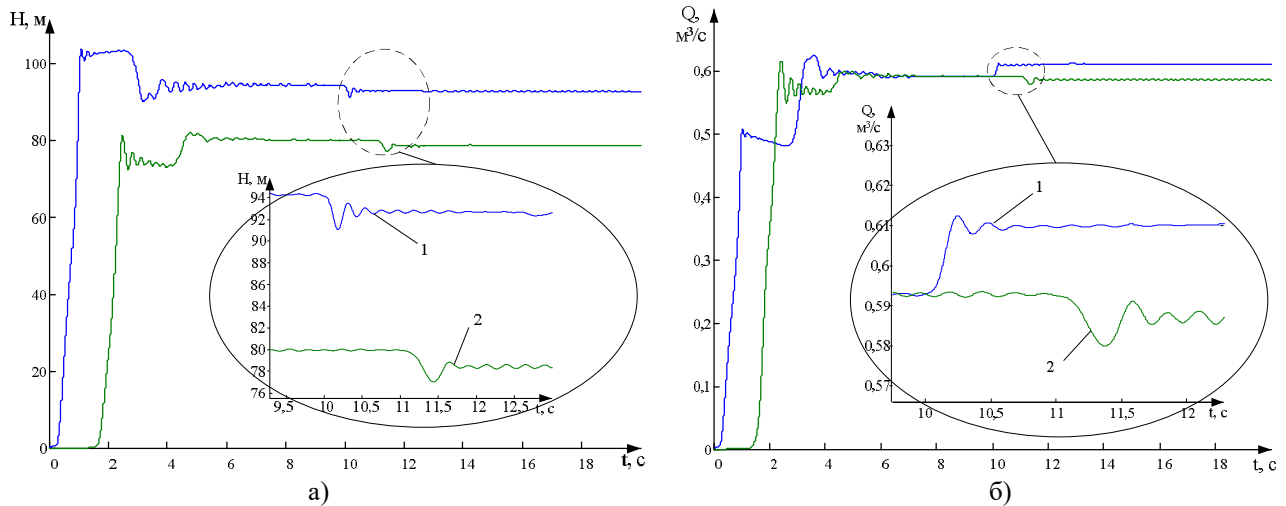


Рисунок 5 – Кривые изменения напора (а) и расхода (б) при внезапном появлении утечки в трубопроводной сети на расстоянии 300 м от НС: 1 – в точке измерения КТ1; 2 – в точке измерения КТ2

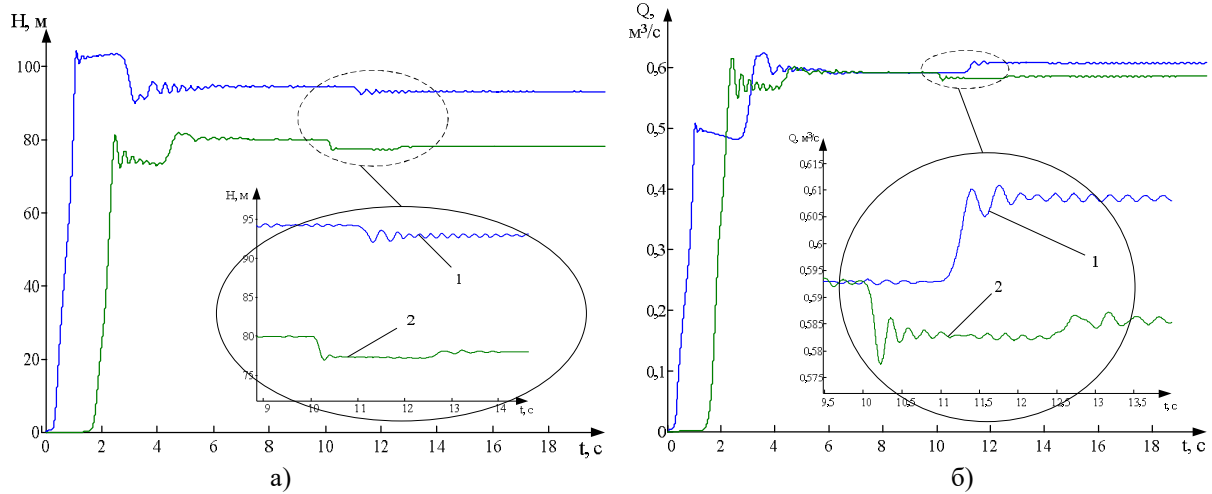


Рисунок 6 – Кривые изменения напора (а) и расхода (б) при внезапном появлении утечки в трубопроводной сети на расстоянии 2700 м от КТ1: 1 – в точке измерения КТ1; 2 – в точке измерения КТ2

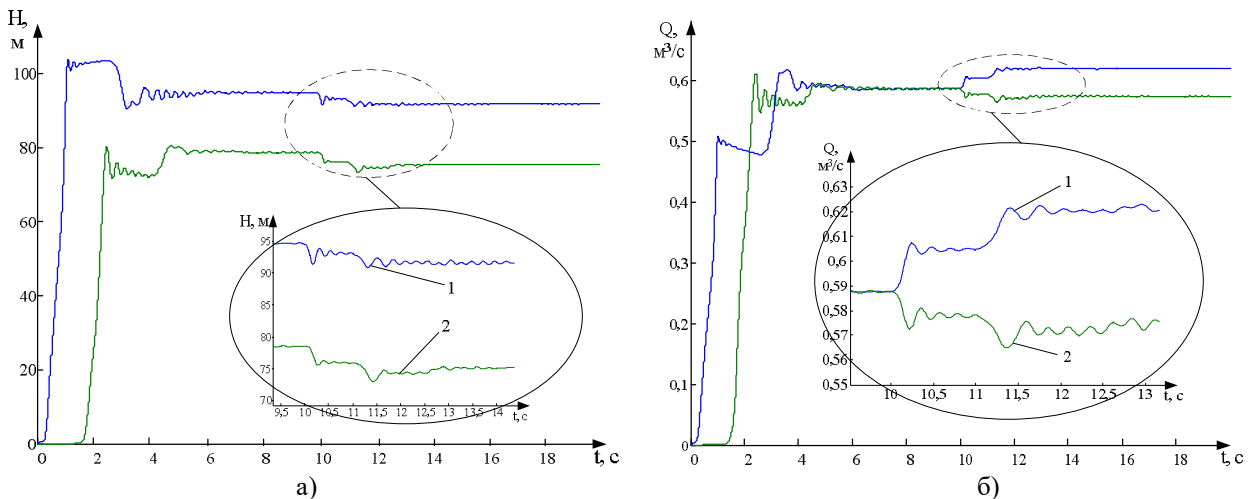


Рисунок 7 – Кривые изменения напора (а) и расхода (б) при внезапном появлении утечки в трубопроводной сети одновременно на расстоянии 300 м и 2700 м от НС: 1 – в точке измерения КТ1; 2 – в точке измерения КТ2

В. Частотный анализ гидравлической мощности в трубопроводной сети с различными параметрами утечки

Появление утечки в трубопроводной сети приводит к возникновению волновых процессов в трубопроводной сети, которые влияют на напор и расход, обладающие различными диагностическими признаками, присущими каждому из сигналов.

Для расширения диагностических признаков идентификации утечки в трубопроводной сети целесообразно использовать гидравлическую мощность, равную произведению напора и расхода на соответствующем *i*-м участке трубопровода:

$$p_{hi}(t) = \rho g H_i(t) Q_i(t), \quad (5)$$

где ρ – плотность транспортируемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $H_i(t)$, $Q_i(t)$ – значения напора и расхода на *i*-м участке трубопровода.

На рис. 8 приведены кривые изменения гидравлической мощности в гидросистеме с утечкой на расстоянии 300 м и для утечки, возникшей одновременно в двух местах трубопроводной сети.

Анализ показал, что гидравлическая мощность в точке измерения КТ1 возрастает ввиду увеличения расхода на выходе НС; гидравлическая мощность в конце трубопроводной сети снижается из-за появления утечки в системе.

На рис. 9,а показаны кривые изменения гидравлической мощности в гидросистеме с утечкой для рассматриваемого выше случая. Анализ показал, что гидравлическая мощность в точке измерения КТ1 возрастает ввиду увеличения расхода на выходе НС; гидравлическая мощность в конце трубопроводной сети снижается из-за появления утечки в системе.

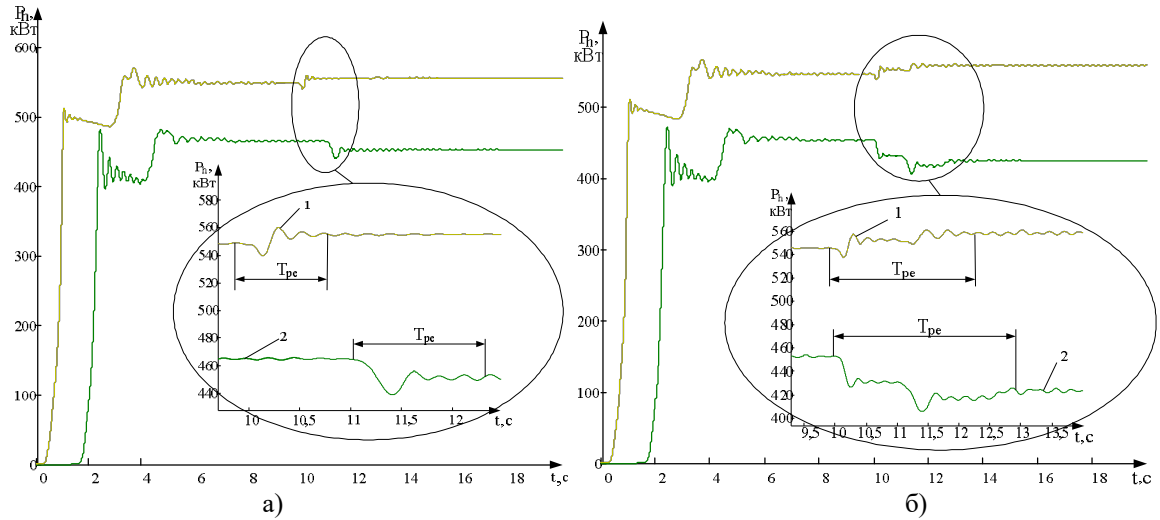


Рисунок 8 – Кривые изменения гидравлической мощности в трубопроводной системе с утечкой: а) при наличии одной утечки на расстоянии 300 м от КТ1; б) при возникновении утечки на расстоянии 300 м и 2700 м от КТ1; 1 – в точке измерения КТ1; 2 – в точке измерения КТ2

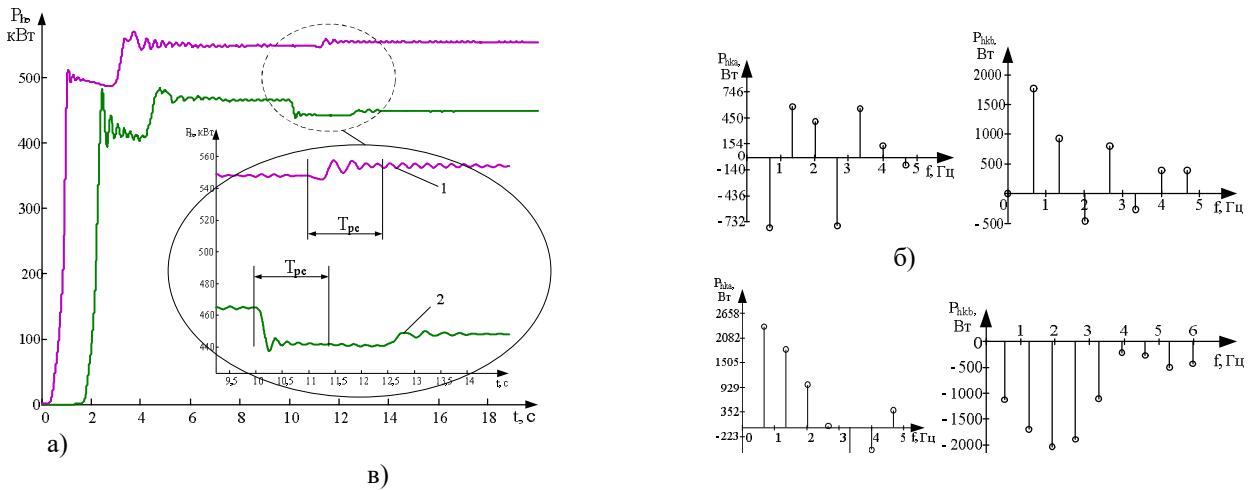


Рисунок 9 – Кривые изменения гидравлической мощности (а) и ее частотные характеристики (б), (в) при возникновении утечки в трубопроводной сети на расстоянии 2700 м от КТ1: 1 – в точке измерения КТ1; 2 – в точке измерения КТ2

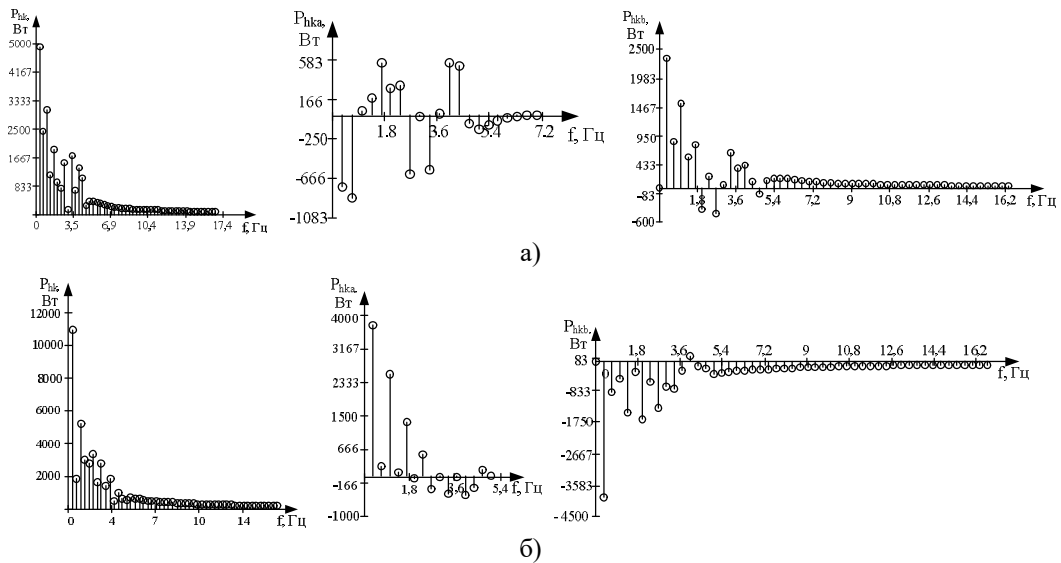


Рисунок 10 – Частотные характеристики гидравлической мощности при возникновении утечки на расстоянии 300 м и 2700 м от КТ1: а) в точке измерения КТ1; б) в точке измерения КТ2

Используя частотное преобразование на базе рядов Фурье, гидравлическая мощность имеет вид [14, 15]:

$$P_h(t) = P_{h0} + \sum_{k=1}^K P_{hka} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{hkb} \sin(k\Omega t), \quad (6)$$

где $P_{h0} = \frac{1}{T_{pe}} \int_0^{T_{pe}} P_h(t) dt$ – постоянная составляющая гидравлической мощности;

$P_{hka} = \frac{1}{T_{pe}} \int_0^{T_{pe}} P_h(t) \cos(k\Omega t) dt$ – косинусная составляющая гидравлической мощности;

$P_{hkb} = \frac{1}{T_{pe}} \int_0^{T_{pe}} P_h(t) \sin(k\Omega t) dt$ – синусная составляющая гидравлической мощности; T_{pe} – период разложения сигнала (в качестве T_{pe} принимается момент времени начала падения фронта волны до ее выхода на установившееся значение); $\Omega = 2\pi f$ – круговая частота сигнала; K, k – количество и номер гармоник гидравлической мощности соответственно.

На рис. 9,б приведены частотные характеристики переменной составляющей (косинусной и синусной) сигналов гидравлической мощности в точках измерения КТ1 и КТ2 соответственно. Анализ показал, что утечка сопровождается появлением низкочастотных (до 4 Гц) гармонических составляющих гидравлической мощности. Ввиду того, что место локализации утечки расположено ближе к КТ2, амплитудные значения гармонических составляющих мощности кривой 2 (рис. 9,в) выше, чем для мощности, измеряемой в КТ1 (кривая 1, рис. 9,б).

На рис. 10 показаны амплитудные спектры гидравлической мощности при наличии утечки одновременно в двух местах трубопроводной сети. Как видно из анализа полученных спектров, утечка приводит к рассеиванию энергии, что подтверждается ростом синусных компонент гидравлической мощности.

С. Оценка влияния места локализации и величины утечки на частотные характеристики гидравлической мощности

Для оценки гармонического состава гидравлической мощности при возникновении утечки в трубопроводной сети предложен коэффициент усиления переменной составляющей мощности:

$$a_{var} = \sum_{k=1}^K P_{hk} / P_{h0}, \quad (7)$$

который отражает вес k -ых гармоник переменной составляющей мощности по отношению к ее постоянной компоненте при наличии утечки в трубопроводной сети.

Когда утечка отсутствует, коэффициент $a_{var} = 0$; при возникновении утечки – $a_{var} \neq 0$.

Зависимости изменения коэффициента a_{var} усиления переменной составляющей гидравлической мощности от величины утечки приведены на рис. 11

для случаев: $Q_{leak} = 0,093Q_n$ (кривая 1), $Q_{leak} = 0,05Q_n$ (кривая 2), $Q_{leak} = 0,035Q_n$ (кривая 3) и места локализации утечки в трубопроводной сети, расположенной на расстоянии 300, 900, 1500, 1950, 2400, 2850 м от КТ1.

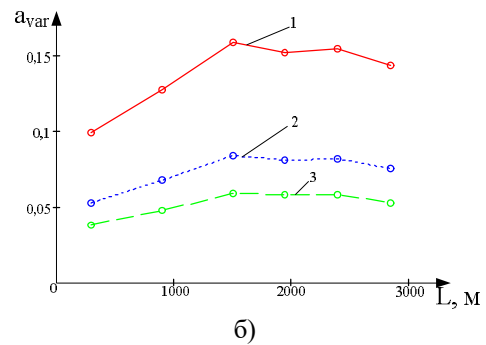
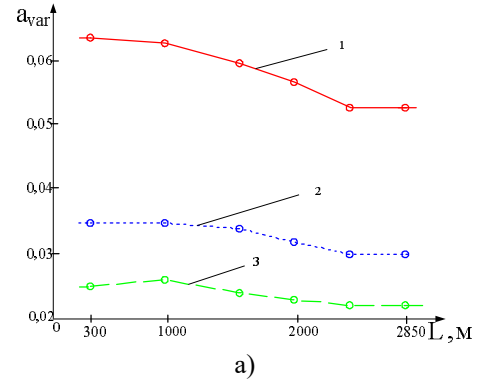


Рисунок 11 – Кривые изменения коэффициента a_{var} от места локализации и величины утечки: а) в КТ1; б) в КТ2

Кривые $a_{var} = f(L, Q_{leak})$ характеризуют протекание сложных волновых процессов в трубопроводной сети при наличии утечки. Получено, что чем больше величина утечки, тем выше значения коэффициента a_{var} и тем более явно выраженный нелинейный характер изменения кривой $a_{var} = f(L, Q_{leak})$.

На основе полученных кривых предложена аппроксимационная функция:

$$L = a + b/Q_{leak} + c/a_{var} + d/a_{var}^2, \quad (8)$$

где $Q_{leak}(t) = Q_p(t) - Q_{con}(t)$ – утечка жидкости из трубопровода; $Q_p(t), Q_{con}(t)$ – расход жидкости на выходе насоса и у потребителя соответственно; a, b, c, d – коэффициенты аппроксимации, зависящие от номинальных параметров насосного агрегата и параметров трубопроводной сети (для рассматриваемого случая $a = -2,3; b = 1,11; c = 174,7; d = -0,6$).

Полученная аппроксимационная функция позволяет определить зависимость расстояния от контрольной точки измерения до места локализации

утечки на базе известных параметров a_{var} и Q_{leak} . Точность определения места утечки данной функцией для рассматриваемого случая составила 2%. В дальнейшем является целесообразным уточнение предложенной аппроксимационной функции с целью учета влияния конфигурации трубопровода и свойств перекачиваемой жидкости на точность определения места локализации утечки.

ВЫВОДЫ. Показано, что утечка в трубопроводной сети характеризуется сложным процессом движения волн давления по длине трубопровода и зависит от конструктивных параметров трубопроводной сети, свойств транспортируемой жидкости и вида утечки (свищ, порыв, разрыв трубы и т.п.). Полученные переходные процессы изменения напора и расхода в трубопроводной сети с утечкой отражают влияние места локализации и величины утечки на физическую картину волновых процессов в гидросистеме. Чем ближе утечка расположена к контрольной точке измерения технологических параметров, тем более явно выраженный характер имеет волновой процесс в насосном комплексе.

Для идентификации утечки может быть использована гидравлическая мощность, частотный анализ которой позволил получить более широкий спектр диагностических признаков нестационарного режима. Установлено, что при наличии утечки наблюдается рост переменной составляющей гидравлической мощности, а именно ее синусной компоненты.

Для оценки влияния утечки на волновые процессы в трубопроводной сети введен коэффициент усиления переменной составляющей гидравлической мощности. Показано, что чем больше величина утечки и ближе ее расположение к контрольной точке измерения технологических параметров, тем выше значение коэффициента усиления переменной составляющей гидравлической мощности.

Для определения места локализации утечки в трубопроводной сети насосного комплекса предложена аппроксимационная функция зависимости расстояния от контрольной точки измерения до места локализации утечки для различных величин утечки и коэффициента усиления переменной составляющей гидравлической мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Country comparison: pipelines [Электронный ресурс]: Wikipedia. – Электрон. дані. – CIA World Factbook, 2013. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_total_length_of_pipelines.
2. 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2013). – P.61.
3. James K., Campbell S.L., Godlove C.E., 2002 Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Alliance to Save Energy, Washington DC, USA. – 142p.
4. Souza A.L., Cruz S.L., Pereira J.F.R. Leak detection in pipelines through spectral analysis of pressure

signals // Braz. Jour. Chem. Eng., April 2000. – Iss. 17. – P. 8.

5. Кутуков С.Е. Проблема повышенной чувствительности систем обнаружения утечек // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2004. – Т. 2. – С.29–45.

6. Гольянов А.А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах // НИС, ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ. Сер. «Транспорт и хранение нефтепродуктов». – Вып. 10–11, 2002. – С. 5–14.

7. Мишкин Г.Б. Классификация систем обнаружения утечек на магистральных трубопроводах нефти, газа и нефтепродуктов // Молодой ученый. – Чита, 2010. – Вып. 11. – Т.1. – С. 56–58.

8. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 30–36.

9. M. Zagirnyak, T. Korenkova. Harmonic analysis of power in an electrohydraulic complex with nonlinear processes in the pipeline system // Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Intelligent energy and power systems (IEPS). – Kyiv, 2016. – PP. 143–148. – IEEE Catalog Number: CFP1405X–PRTISBN: 978-1-4799-2265-9

10. Загирняк М.В., Коренькова Т.В. Энергетический метод в задачах определения параметров электрогидравлического комплекса. Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». – К.: ІЕДНАНУ, 2016. – Вып. 3. – С. 76–78.

11. Nash G.A., Karney B.W. Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems // Journal of Hydraulic Engineering. – 1999. – Iss. 125 (7). – PP. 761–764.

12. Lay-Ekuakille A., Vendramin G., Trotta A. STFT-based spectral analysis of urban waterworks leakage detection // XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology. – September 6–11 2009. – Portugal, Lisbon.

13. Covas D., Graham N., Maksimovic C. et al. An Assessment of the Application of Inverse Transient Analysis for Leak Detection: Part II - Collection and Application of Experimental Data // Proc. Computer Control for Water Industry (CCWI), London (UK), C. Maksimovic and N. Graham, eds., 2003.

14. Klepka A., Broda D., Michalik J. et al. Leakage detection in pipelines -the concept of smart water supply system // 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART 2015.

15. Коренькова Т.В. Энергетическая модель электрогидравлического комплекса с периодическим изменением технологических параметров // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 3/2014 (27). – С. 27–35.

USING OF HYDRAULIC POWER HARMONIC ANALYSIS IN THE TASKS OF LEAK DIAGNOSTIC IN PIPELINE NETWORKS

R. Manko, T. Korenkova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: baharia1@mail.ru

Purpose. Estimation of influence the leak parameters on wave processes in pipeline network on the basis of the frequency analysis of hydraulic power. **Methodology.** Harmonic analysis of the hydraulic power in the pipeline network in the presence of leakage based on frequency transform Fourier. **Results.** It is found that the wave processes in the pipeline network with leakage dependent of accident localization, values leakage, design parameters of the pipeline network, and the properties of the fluid. It is shown that the leakage accompanied by an increase of the variable component of the hydraulic power, namely its sine components. To evaluate the harmonic composition of hydraulic power in case of a leak in the pipe network is proposed coefficient gain of the variable power component. **Originality.** It is noted that for the diagnosis of leakage should be used the hydraulic power signal frequency analysis which allows a much wider range of diagnostic signs of transient condition. **Practical value.** Obtained approximation function is to determine the localization of leakage in a pipeline network according to the nature and magnitude of changes in wave propagation in the pipeline. References 15, tables 1, figures 11.

Key words: pipeline network, leak, wave processes, hydraulic power, frequency analysis.

REFERENCES

1. Country comparison: pipelines, Wikipedia, CIA World Factbook (2013), Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_total_length_of_pipelines.
2. 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (1970–2013), p. 61.
3. James, K., Campbell, S.L. and Godlove, C.E. (2002), "Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems." *Alliance to Save Energy*, Washington DC, USA.
4. Souza, A.L., Cruz, S.L. and Pereira, J.F.R. (2000), "Leak detection in pipelines through spectral analysis of pressure signals", *Braz. Jour. Chem. Eng.*, Vol. 17, p. 8.
5. Kutukov, S.E. (2004), "The problem of high sensitivity leak detection systems", *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Neftegazovoe delo"*, Vol. 2, pp. 29–45. (in Russian)
6. Golyanov, A.A. (2002), "Analysis methods of leak detection on pipelines", *Transport i hranenie nefteproduktov*, Vol. 10–11, pp. 5–14. (in Russian)
7. Muhkin, G.B. (2010), "Classification systems for detection of leaks in the main pipelines of oil, gas and petroleum products", *Molodoy ucheniy*, Vol. 11, pp. 56–58. (in Russian)
8. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2012), "Analysis of energy transformation processes in electromechanical complex", *Electromechanichni ta energozberigayuchi systemy. Problemy avtomatyzovanogo elektropriyoda. Teoria i praktuka*, Vol. 3, no. 19, pp. 30–36. (in Russian)
9. Zagirnyak, M. and Korenkova, T. (2016), "Harmonic analysis of power in an electrohydraulic complex with nonlinear processes in the pipeline system", *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Intelligent energy and power systems (IEPS)*, pp. 143–148.
10. Zagirnyak, M. and Korenkova, T. (2016), "Energy method in problems of determining the parameters of the electrohydraulic complex", *Tekhnichna elektrodinamika*, Vol. 3, pp. 76–78. (in Russian)
11. Nash, G.A. and Karney, B.W. (1999), "Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, no. 7, pp. 761–764.
12. Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G. and Trotta, A. (2009), "STFT-based spectral analysis of urban waterworks leakage detection", *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, September, Lisbon, Portugal, pp. 6–11.
13. Covas, D., Graham, N., Maksimovic, C. et al. (2003), "An Assessment of the Application of Inverse Transient Analysis for Leak Detection: Part II, Collection and Application of Experimental Data", *Proc. Computer Control for Water Industry (CCWI)*, London, UK.
14. Klepka, A., Broda, D., Michalik, J. et al. (2015), "Leakage detection in pipelines is the concept of smart water supply system", *7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART 2015*.
15. Korenkova, T. (2014), "Energy model of electrohydraulic complex with a periodic change of process parameters", *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy. Shchokvartalniy naukovo-virobnichiy zhurnal*, Vol. 3, no. 27, pp. 27–35. (in Russian)

Стаття надійшла 11.09.2016.