

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

А.И. КРАСИЛЬНИКОВ¹, В.С. БЕРЕГУН², Т.А. ПОЛОБЮК¹

¹*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*

²*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

На установке для физического моделирования осуществлена имитация утечек жидкости в трубопроводе при различных параметрах – давлении в трубопроводе и диаметре течи. Проведено статистическое оценивание вероятностных характеристик полученных сигналов утечки – кумулянтов, плотностей вероятностей, спектральных плотностей, корреляционных функций. Проанализирована связь между параметрами течи и вероятностными характеристиками сигналов утечки.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическое контактное течеискание [1, 2] находит широкое применение для обнаружения и локации течи в металлических трубопроводах теплоэнергетического оборудования без вывода их из эксплуатации. Обнаружение утечек жидкости основано на измерении и анализе вероятностных характеристик акустического сигнала утечки, среди которых в настоящее время используются, как правило, дисперсии, корреляционные и спектральные функции.

Повышение чувствительности и достоверности контроля и диагностики трубопроводов возможно при использовании в качестве диагностических характеристик и параметров более полных вероятностных характеристик акустического сигнала утечки. При этом возникает задача исследования влияния известных характеристик объекта диагностирования – размера и формы течи, давления и скорости движения воды в трубе, состояния трубопровода и пр., на вероятностные характеристики акустического сигнала утечки.

Сложность и многообразие физических процессов возникновения и распространения акустических сигналов утечки [1, 3–5] ограничивают возможности аналитических методов решения этой задачи. В связи с этим для анализа информативности вероятностных характеристик акустического сигнала утечки представляется целесообразным использовать экспериментальные методы. В настоящее время экспериментальные исследования акустических сигналов утечки жидкости [1, 3, 5, 6] ограничиваются анализом спектральных и корреляционных функций, причем зависимости этих функций от изменения давления в трубе и диаметра течи изучены недостаточно.

Целью данной работы является статистический анализ в низкочастотной области зависимости плотности вероятностей, кумулянтных, спектральных и корреляционных функций сигналов утечки от изменения давления и диаметра течи.

1. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Свойства акустических сигналов утечки существенно зависят от гидродинамических режимов вытекания жидкости, которые определяются, прежде всего, величиной перепада давления и размерами течи [1]. Основную роль для акустического контактного течеискания играет кавитационный режим, который наступает в коротких щелях (5...10 мм) с диаметром щели 0,1...1,0 мм при перепадах давлений около 1 атм (0,1 МПа).

Кавитационний шум, що виникає при такому режимі, представляє собою результат накладення великої кількості імпульсів з випадковими параметрами і при постійному тиску в трубі може бути описано моделлю Бунімовича – Райса [7]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t-t_k), \quad (1)$$

де $v(t)$ – однорідний процес Пуассона з інтенсивністю $\lambda > 0$; t_k – моменти часу появи імпульсів; η_k – амплітуди імпульсів, що характеризують газосодержання в рідині, однаково розподілені, незалежні між собою і з t_k ; $h(t)$ – детермінована функція, що описує форму елементарного звукового імпульсу.

Акустичні сигнали витіку, які описуються моделлю (1) є стаціонарними негауссовими випадковими процесами [7]. Одним із напрямків дослідження таких процесів є аналіз їх кумулянтів. В частині, одномерні кумулянти κ_s порядку s процесу (1) теоретично можна отримати за формулою [7]:

$$\kappa_s = \lambda \alpha_{s\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h^s(t) dt,$$

де $\alpha_{s\eta} = \mathbf{M}[\eta_k^s]$ – початкові моменти порядку s амплітуд η_k . Звернемо увагу, що кумулянт κ_1 є математичним очікуванням процесу (1), а κ_2 – його дисперсією.

Процеси (1) мають безмежно ділимі закон розподілу, тому для отримання їх щільності ймовірностей, за винятком деяких окремих випадків, необхідно застосовувати наближені методи. В частині, в практичних задачах для знаходження щільностей ймовірностей, що відрізняються від гауссової, широко використовується ряд Грама – Шарльє [7, 8], який для стандартної щільності ймовірностей з урахуванням поліномів до шостого порядку має наступний вигляд:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \left(1 + \frac{\gamma_3}{6} H_3(x) + \frac{\gamma_4}{24} H_4(x) + \frac{\gamma_5}{120} H_5(x) + \frac{\gamma_6 + 10\gamma_3^2}{720} H_6(x)\right), \quad (2)$$

де $\gamma_s = \kappa_s / \kappa_2^{s/2}$ – кумулянтні коефіцієнти s -го порядку, $H_s(x)$ – поліноми Ерміта.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для отримання достовірних результатів статистичного аналізу акустичних сигналів витіку необхідно проводити експеримент на трубі з відомими розмірами течії, забезпечити регулювання і контроль тиску в трубі і виключити вплив шуму рухомих частин в трубі потоку рідини і зовнішніх шумів.

Сформульованим вимогам задовольняє розроблена і виготовлена установка [9], що дозволяє здійснювати фізичне моделювання течії в трубі і проводити експериментальні дослідження сигналів витіку в стоячій воді.

Основним вузлом установки є сталевий патрубок діаметром 159 мм і товщиною стінки 7 мм. В патрубок через вузол подачі і регулювання поступає рідина (газ), надлишковий тиск якої може досягати до 8 атм і контролюється манометром, встановленим на патрубку. Для роботи установки в режимі імітації витіку рідини або газу в патрубок на трубі встановлюється насадка з отвором циліндричної форми з мідними стінками. Тік може бути перекритий краном, встановленим на патрубку. Крім того для відтворення природних умов вихідний отвір патрубка закривалося мікропористим тілом.

Сбор и обработка акустических сигналов утечки осуществлялась мобильной системой для съема, регистрации и обработки акустических сигналов, в состав которой входят пьезоэлектрический акселерометр KD 39 (рабочий диапазон частот до 13 кГц, чувствительность по напряжению 5 мВ/(м/с²)); усилитель заряда, разработанный на основе усилителя LP-03 (коэффициент усиления по напряжению 24 дБ); усилитель – фильтр РУ2-11; модуль АЦП ADA-1406 (разрядность 14 бит, частота дискретизации до 350 кГц); ноутбук.

При помощи разработанных алгоритмов и программ [7] производилась запись сигналов на жесткий диск с их последующей обработкой, которая включала в себя оценивание следующих вероятностных характеристик – кумулянтов, кумулянтных коэффициентов, плотностей вероятностей, спектральных плотностей, корреляционных функций. Акселерометр крепился при помощи цементирующей шпильки на шлифованную поверхность трубы на расстоянии 50 мм от патрубка.

Эксперименты проводились при давлении в трубе 2, 4 и 6 атм и следующих размерах канала: насадка 1 – диаметром 1 мм и насадка 2 – диаметром 2,1 мм. Параметры записи сигналов утечки следующие: частота дискретизации 150 кГц; число отсчетов 10⁶ (длительность записи около 6,5 с); частота среза фильтра нижних частот 13 кГц.

Приведем результаты исследования типовых реализаций сигналов утечки.

В табл. 1 приведены значения оценок кумулянтов $\hat{\kappa}_s$, $s = \overline{2,6}$, которые вычислялись на основании формул связи кумулянтов с моментами [7, 8] и оценок этих моментов.

Таблица 1

Давление, атм	Насадка 1					Насадка 2				
	$\hat{\kappa}_2$	$\hat{\kappa}_3$	$\hat{\kappa}_4$	$\hat{\kappa}_5$	$\hat{\kappa}_6$	$\hat{\kappa}_2$	$\hat{\kappa}_3$	$\hat{\kappa}_4$	$\hat{\kappa}_5$	$\hat{\kappa}_6$
2	0,016	-1,3·10 ⁻⁵	0,0002	-1,0·10 ⁻⁶	9,9·10 ⁻⁶	0,56	0,001	0,12	0,004	0,27
4	0,071	-1,1·10 ⁻⁴	0,0041	-3,9·10 ⁻⁵	0,001	1,95	0,017	0,36	-0,025	0,35
6	0,335	2,6·10 ⁻⁴	0,058	-8,6·10 ⁻⁴	0,034	2,88	-0,003	0,78	0,43	0,65

Из данных табл. 1 следует, что с ростом давления значения кумулянтов четных порядков возрастают для обеих насадок. Абсолютные значения кумулянтов нечетных порядков возрастают, за исключением $\hat{\kappa}_3$ для насадки 2 и давления 6 атм. При изменении диаметра течи с 1 до 2,1 мм абсолютные значения кумулянтов возрастают в несколько раз при всех давлениях, в частности, при давлении 6 атм $\hat{\kappa}_2$ отличаются в 9 раз, а $\hat{\kappa}_6$ в 19 раз. С ростом давления величина отношения кумулянтов одного порядка уменьшается.

Определим величину δ_n , характеризующую суммарный вклад кумулянтов κ_s , $s = \overline{3,n}$, по отношению к дисперсии κ_2 , следующим образом:

$$\delta_n = \left(\sum_{s=3}^n |\hat{\kappa}_s| / \hat{\kappa}_2 \right) 100 \% .$$

Используя данные табл. 1 получаем, что величина δ_6 при давлении 6 атм для насадки 1 составляет 27,8 %, а для насадки 2 – 49,8 %. Таким образом, для увеличения чувствительности обнаружения утечек жидкости в трубопроводах целесообразно учитывать кумулянты высших порядков, а величина δ_n может быть использована к качестве диагностического параметра.

В табл. 2 приведены значения оценок кумулянтных коэффициентов $\hat{\gamma}_s$, $s = \overline{3,6}$. Из данных табл. 2 следует, что при всех давлениях для обеих насадок абсолютные значения коэффициентов асимметрии $\hat{\gamma}_3$ меньше чем 0,007, а $\hat{\gamma}_5$ – меньше чем 0,031.

Таблица 2

Давление, атм	Насадка 1				Насадка 2			
	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$
2	-0,0064	0,6452	-0,0295	2,2705	0,0019	0,3655	0,0164	1,5328
4	-0,0058	0,8200	-0,0292	2,7934	0,0064	0,095	-0,0047	0,046
6	0,0014	0,5153	-0,0133	0,9034	-0,0006	0,0935	0,0305	0,0270

С увеличением диаметра течи значения кумулянтных коэффициентов $\hat{\gamma}_4$ и $\hat{\gamma}_6$ уменьшаются. Наибольшие значения эти коэффициенты имеют для насадки 1 при давлении 4 атм ($\hat{\gamma}_4=0,82$; $\hat{\gamma}_6=2,79$), что показывает существенное отличие закона распределения сигналов утечки от гауссовского. Для насадки 2 при давлениях 4 и 6 атм абсолютные значения всех коэффициентов $\hat{\gamma}_s$, $s=3,6$, не превышают 0,1, поэтому распределение сигналов утечки в этом случае можно считать гауссовским.

На рис. 1 приведены графики оценок плотностей вероятностей (1, а – насадка 1; 1, б – насадка 2), которые получены для центрированных и нормированных сигналов утечки на основе выражения (2) по оценкам кумулянтных коэффициентов (см. табл. 2).

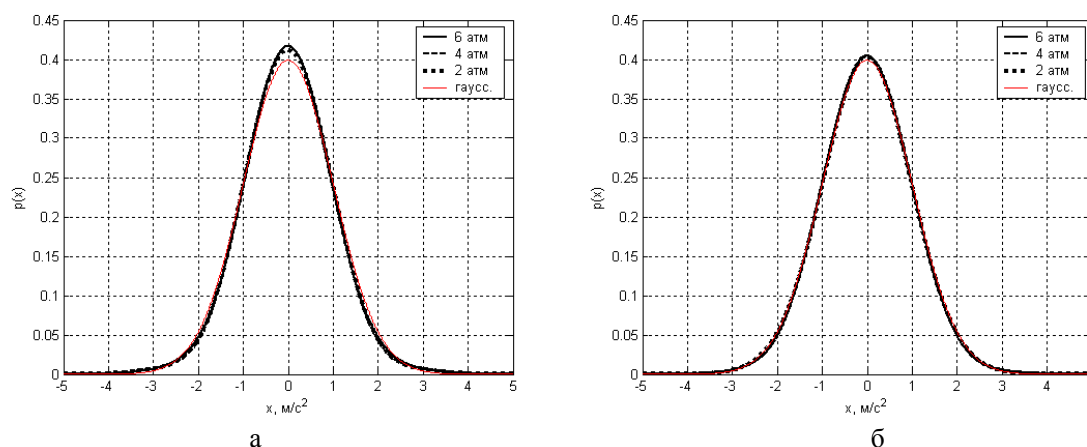


Рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при разных диаметрах течи и давлениях полученные плотности вероятностей практически одинаковы и имеют форму, которая близка к кривой стандартной гауссовской плотности вероятностей. В табл. 3 приведены значения величины $\max |\hat{p}(x) - p_n(x)|$, которая является расстоянием между оценками плотностей вероятностей $\hat{p}(x)$ и стандартной гауссовской плотностью вероятностей $p_n(x)$.

Таблица 3

Давление, атм	Насадка 1	Насадка 2
2	0,0133	0,0060
4	0,0177	0,0044
6	0,0182	0,0045

Из рис. 1 и табл. 3 следует, что плотности вероятностей сигналов утечки являются малоинформативными характеристиками при определении диаметра течи и давления.

На рис. 2 приведены оценки спектральных плотностей сигналов утечки относительно опорного уровня ускорения $a_0=10^{-6}$ м/с² (2, а – насадка 1; 2, б – насадка 2), которые получены на основе модифицированной периодограммы оценки [7] с применением быстрого преобразования Фурье и перекрытием соседних сегментов 50 %. Размер прямоуголь-

ного окна данных составлял 1024 отсчета, что обеспечило разрешающую способность по частоте $\Delta f \approx 146,5$ Гц. Спектральная плотность шума измерительного тракта практически постоянна во всем рабочем частотном диапазоне и равна 24 дБ/Гц.

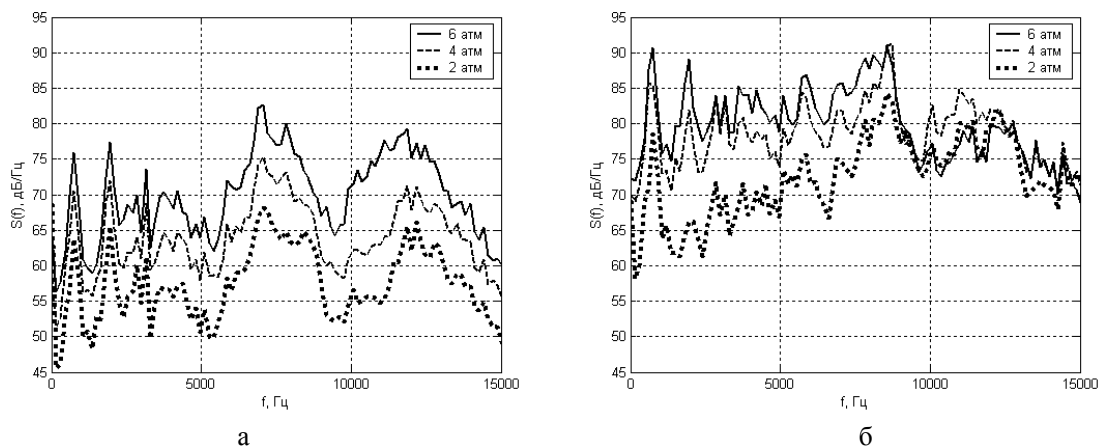


Рис. 2.

Из рис. 2, а видно, что для насадки 1 при разных давлениях изменение частотных зависимостей имеет сходный характер, причем максимум оценки спектральной плотности сосредоточен на частоте около 7,1 кГц, максимальная разность между оценками при давлениях 2 и 4 атм равна 9,7 дБ на частоте 3,3 кГц, а при давлениях 4 и 6 атм – 13,6 дБ на частоте 11,1 кГц. Для насадки 2 (рис. 2, б) максимум спектральной плотности сосредоточен на частоте около 8,6 кГц. Из рис. 2 следует, что спектральная плотность сигналов утечки может быть использована при определении диаметра течи.

На рис. 3 приведены оценки нормированных корреляционных функций сигналов утечки (3, а – насадка 1; 3, б – насадка 2), полученные по стандартным формулам [7] с применением треугольного корреляционного окна шириной 10^{-3} с, которая обратно пропорциональна эффективной ширине спектральной плотности 1 кГц.

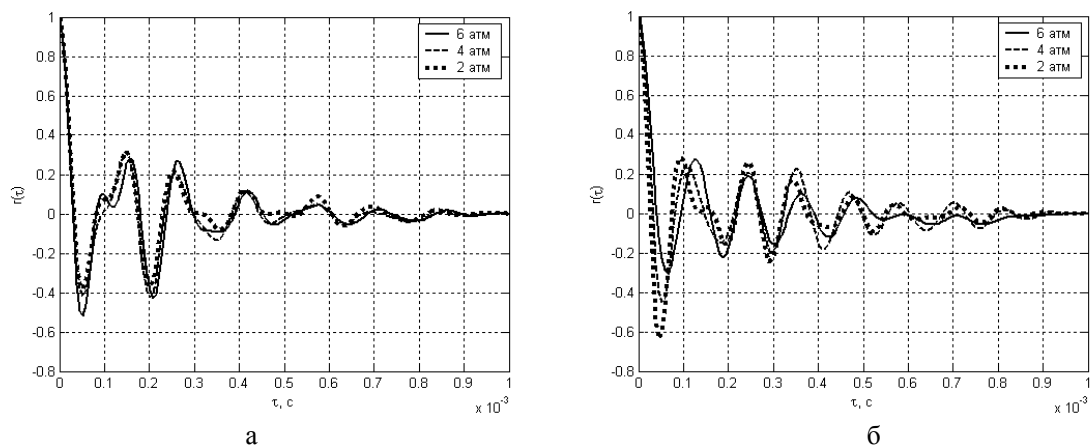


Рис. 3.

Из рис. 3 видно, что оценки нормированных корреляционных функций имеют сходный затухающий осциллирующий характер и мало зависят от величины давления в трубопроводе для обеих насадок. Скорость затухания для насадки 2 меньше, чем для насадки 1, а интервалы между нулями корреляционных функций для разных насадок различаются – равны приблизительно 0,14 мс (насадка 1) и 0,116 мс (насадка 2), что соответст-

вует частотам максимумов спектральних щільностей 7,1 кГц і 8,6 кГц для цих насадок. По тому довжина інтервала між нулями кореляційних функцій і число нуль-пересечень цих функцій можуть бути використані при визначенні діаметра течі.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистический анализ сигналов утечки жидкости показал, что кумулянтные коэффициенты высших порядков наиболее чувствительны к изменению диаметра течі и давления. Стандартные плотности вероятностей сигналов утечки при изменении диаметра течі и давления практически одинаковы и совпадают со стандартной гауссовской плотностью вероятностей. Спектральные плотности для насадки 1 имеют сходный характер при разных давлениях, но существенно отличаются от спектральной плотности для насадки 2. При определении диаметра течі информативными параметрами могут быть длина интервала между нулями корреляционных функций и число нуль-пересечений этих функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробот Ю.Б., Грешников В.А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1: Контроль герметичности / А.И. Евлампиев, Е.Д. Попов, С.Г. Сажин и др.; Кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 687 с.
3. Владимирский А.А., Владимирский И.А., Семенюк Д.Н. Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания // Акустичний вісник. – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 3–16.
4. Кузнецов Н.С., Тарасюк П.С. Использование теории гидродинамического шума для поиска утечек жидкости в подземных трубопроводах // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 6. – С. 6–14.
5. Овчинников А.Л. Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.13 / Овчинников Алексей Львович; [Том. политехн. ун-т]. – Томск, 2006. – 19 с.
6. Строганов В.А., Хоролич В.Н. Экспериментальное исследование сигналов утечек подземных трубопроводов // Вісник СевНТУ. Вип. 101: Інформатика, електроніка, зв'язок: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 29–32.
7. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / В.П. Бабак та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.
8. Крамер Г. Математические методы статистики / Пер. с англ. А.С. Мони́на и А.А. Петрова; под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
9. Красильников А.И., Полобюк Т.А. Установка для физического моделирования и экспериментального исследования утечек в трубопроводе // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1; II (45). – С. 147–150.