

УДК 621.311

С.А. Козерук, К.П. Пилипенко

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

МЕТОД ОЦЕНКИ УТЕЧЕК ВОДЫ ЧЕРЕЗ УЗЛЫ ЗАТВОРНОЙ АРМАТУРЫ ТРУБОПРОВОДА

Предложен метод измерения величины утечки жидкости через запирающую арматуру на основе анализа вероятностных характеристик акустического сигнала. Основываясь на экспериментальных данных, были построены аналитические зависимости, связывающие величину утечки, давление в трубопроводе и вероятностные характеристики сигнала на основе регрессионной модели. В качестве критерия качества полученных моделей был использован коэффициент детерминации. Погрешность оценки величины утечки, полученная по тестовой выборке сигналов, составила 14...16 %.

Ключевые слова: кумулянтные коэффициенты, закон распределения, контроль утечек, запирающая арматура, регрессионная модель.

Введение

Обнаружение и исследование течей запирающей арматуры играет важную роль в безопасной эксплуатации оборудования атомных и тепловых электростанций. Одним из ряда методов контроля герметичности запирающей арматуры является метод акустического контроля [1, 2]. Принцип работы данного метода основан на регистрации акустического сигнала, возникающего в результате протекания жидкости через неплотности арматуры. Однако эти методы позволяют достоверно судить лишь о наличии негерметичности запирающей арматуры, и не позволяют дать количественную оценку протечек.

Цель настоящей работы – показать возможность применения акустических методов для количественной оценки негерметичности арматуры и получение зависимости величины протечки от параметров акустического сигнала.

В качестве рабочего был выбран ультразвуковой диапазон частот (50–500 кГц). Такой выбор обусловлен тем, что шумы, возникающие в результате технологических процессов в звуковом диапазоне частот, могут достигать уровня 100 дБ, что усложняет задачу обнаружения и анализа сигналов утечек в этой области частот.

Теоретические предпосылки

При протекании жидкости через полости под давлением возникают турбулентности, вызывающие колебания высокой частоты – ультразвуковые волны. Колебания распространяются по конструкциям трубопровода и могут быть зарегистрированы соответствующими техническими средствами. Энергетика ультразвуковых колебаний зависит от количества вытекающей жидкости. Обработав определенным образом принятый сигнал, можно определить информационные параметры, коррелирующие с

объемом утечек. Далее, по результатам экспериментальных исследований, используя стохастическую обработку, строится градуировочная зависимость между информационным параметром и объемом протечки.

Методика измерений

Для проверки гипотезы были проведены экспериментальные исследования в лаборатории ПАО «КЦКБА» на специализированном измерительном стенде, в состав которого входят: проливная машина, способная обеспечить заданный диапазон давлений в трубопроводе; исследуемый затворный узел; устройство приема и записи акустического сигнала.

Акустические сигналы записывались при помощи пьезоэлектрического датчика с рабочей полосой частот 0–500 кГц. Оцифровка сигналов осуществлялась с частотой дискретизации 5 МГц, а предварительная фильтрация при помощи фильтра с частотой среза равной 50 кГц. Количество и продолжительность – достаточная для дальнейших статистических исследований.

Обработка экспериментальных данных

В результате проведения эксперимента были записаны акустические сигналы для ряда давлений и зафиксированы расходы в каждом случае. На рис. 1 и 2 изображены соответственно оценки спектров и плотностей вероятностей для акустических сигналов, возникающих в результате утечки при давлениях 1, 3 и 5 атм. Максимум спектра мощности расположен в диапазоне частот 100-150 кГц. Известно, что мощность случайного процесса характеризует его дисперсия.

Примем в качестве информационных параметров дисперсию сигнала при заданном давлении в трубопроводе.

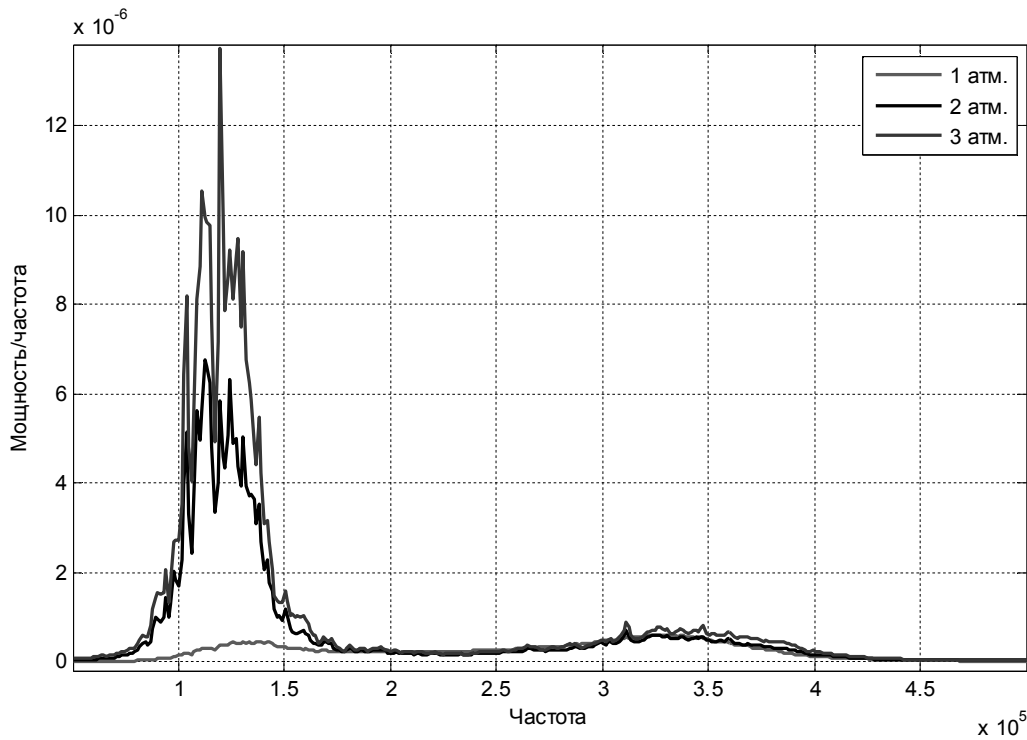


Рис. 1. Оценки спектров акустических сигналов при утечках

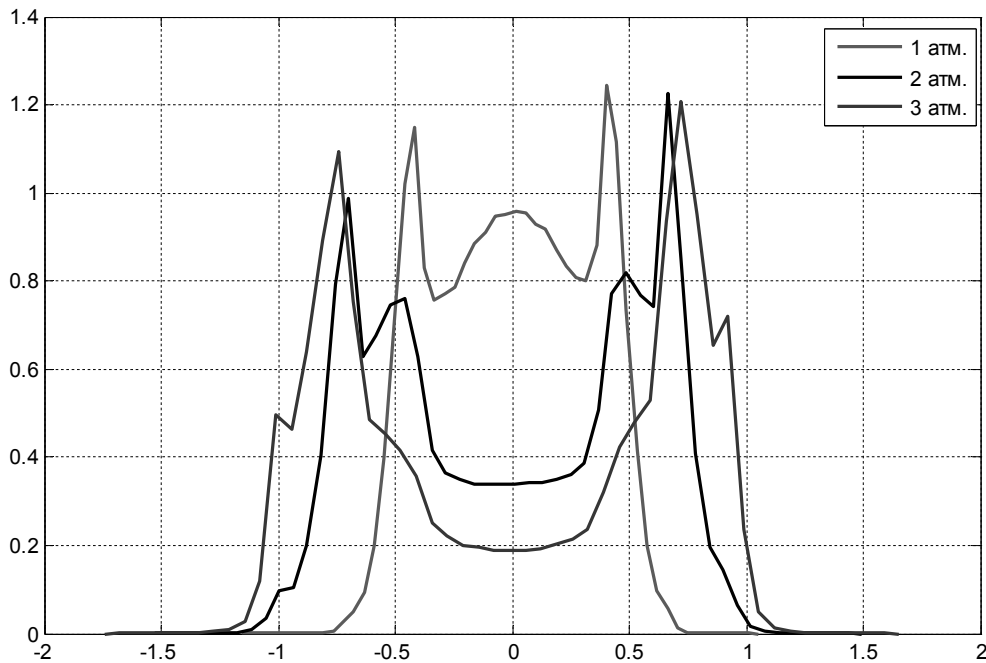


Рис. 2. Оценки плотностей вероятностей акустических сигналов при утечках

В табл. 1 указаны значения дисперсий сигнала в зависимости от давления и величины расхода. На рис. 3 построены кривые зависимости величины расхода от дисперсии сигнала при фиксированном давлении в трубопроводе.

Данные, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что одному и тому же объему протечки могут соответствовать различные значения дисперсии сигнала, таким образом для определения расхода по значению мощности акустического сигнала необходимо знать давление в трубопроводе.

Данную проблему можно решить, используя в качестве признаков кумулянтные коэффициенты, поскольку они не зависят от мощности сигнала, а характеризуют характер распределения мгновенных значений амплитуд сигналов.

В табл. 2 и на рис. 4 представлены значения кумулянтного коэффициента γ_6 .

Как видно из рис. 4, графики значений кумулянтных коэффициентов сохранили такой же характер, как и в случае рис. 3.

Таблица 1

Дисперсии сигналов в зависимости от давления и величины расхода

Давление, атм.									
1		2		3		4		5	
Расход	σ^2	Расход	σ^2	Расход	σ^2	Расход	σ^2	Расход	σ^2
0,79	0,1064	1,32	0,3627	1,17	0,3098	1,70	0,5821	1,41	0,4791
2,49	0,2498	3,62	0,7133	2,98	0,7084	3,44	0,9987	3,51	0,9849
3,75	0,3972	5,58	0,9193	4,61	0,8740	5,61	1,2552	4,93	1,1753
5,52	0,7615	8,36	1,3908	6,41	1,2499	7,85	1,5147	6,54	1,4046
7,56	0,9965	10,42	1,2718	8,91	1,5241	10,55	1,3709	8,60	1,6473

Таблица 2

Кумулянтные коэффициенты сигналов при различных давлениях и величинах расхода

Давление, атм.									
1		2		3		4		5	
Расход	γ_6	Расход	γ_6	Расход	γ_6	Расход	γ_6	Расход	γ_6
0,79	6,2101	1,32	10,5054	1,17	9,7989	1,70	12,1125	1,41	11,6567
2,49	7,5660	3,62	12,4615	2,98	12,5022	3,44	13,2390	3,51	13,1996
3,75	9,4914	5,58	13,0995	4,61	13,0431	5,61	13,6760	4,93	13,5342
5,52	12,5507	8,36	13,8151	6,41	13,6583	7,85	13,9359	6,54	13,8147
7,56	13,2042	10,42	13,6789	8,91	13,9265	10,55	13,5958	8,60	14,0347

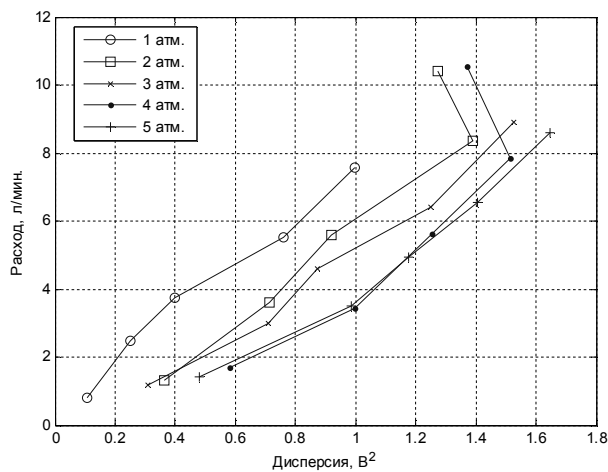


Рис. 3. Зависимость дисперсии сигнала от величины расхода

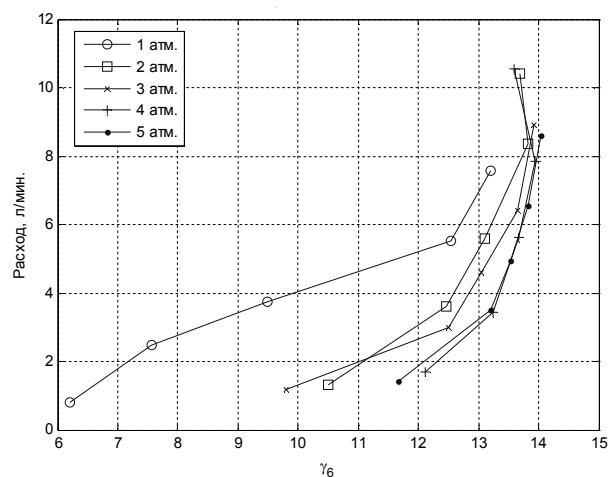


Рис. 4. Зависимость кумулянтного коэффициента γ_6 от величины расхода

Не монотонность кривых наблюдается лишь для утечек больше 10 л/мин. Существенным достоинством является независимость от коэффициента усиления тракта записи сигналов.

Построим несколько регрессионных моделей, исключив предварительно из рассмотрения случаи с протечками больше 10 л/мин.

Для построения аналитической зависимости величины утечки от значений выбранных информационных параметров будем использовать регрессионную модель. Пусть есть некая случайная величина y , зависящая от случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n , тогда согласно [3] выражение

$$h(x) = \sum_{i=0}^n \theta_i x_i = \theta^T x, \quad (1)$$

называется регрессией величины y или гипотезой,

где n – количество переменных, θ – вектор значений параметров модели, x – значения информационных признаков. Для получения параметров θ используют метод наименьших квадратов.

Критерием качества полученной модели часто выступает коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(h_{\theta} \left(x^{(j)} \right) - y^{(j)} \right)^2}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(y^{(j)} - \bar{y} \right)^2}, \quad (2)$$

где \bar{y} – математическое ожидание случайной величины y :

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y^{(j)}. \quad (3)$$

Чем ближе R^2 к единице, тем лучше модель отражает вариабельность процесса.

Модель 1

Для первой модели в качестве параметров будем использовать давление и дисперсию ненормированного сигнала. Поскольку графики рис. 3 свидетельствуют о нелинейной зависимости, то для построения функции $h(x)$ используем полиномы второго порядка

$$h(p, \sigma^2) = \theta_0 + \theta_1 p + \theta_2 p^2 + \theta_3 \sigma^2 + \theta_4 \sigma^4. \quad (4)$$

Получим параметры модели (4) посредством решения нормального уравнения [3]:

$$\theta = \begin{bmatrix} 2,5279 \\ -1,7309 \\ 0,1567 \\ 5,7454 \\ 0,4192 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Тогда, функция (4) запишется

$$h(p, \sigma^2) = 2,5279 - 1,7309p + 0,1567p^2 + 5,7454\sigma^2 + 0,4192\sigma^4. \quad (6)$$

На рис. 5 изображены графики функции (6) при фиксированных значениях давления (1–5 атм.) и значения исходной выборки.

Коэффициент детерминации для 1-й модели

$$R^2 = 0,973.$$

Модель 2

Построим теперь модель с использованием кумулянтных коэффициентов γ_6 . Учитывая более сложную форму кривых (рис. 4), повысим степень полинома

$$h(p, \gamma_6) = \theta_0 + \theta_1 p + \theta_2 p^2 + \theta_3 \gamma_6 + \theta_4 \gamma_6^2 + \theta_5 \gamma_6^3. \quad (8)$$

Также, как и в предыдущем случае, получим параметры модели

$$\theta = \begin{bmatrix} -75,9944 \\ -2,1512 \\ 0,2212 \\ 25,9361 \\ -2,7346 \\ 0,0954 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, получили функцию

$$h(p, \gamma_6) = -75,9944 - 2,1512p + 0,2212p^2 + 25,9361\gamma_6 - 2,7346\gamma_6^2 + 0,0954\gamma_6^3. \quad (9)$$

На рис. 6 изображены графики функции (9) при фиксированных значениях давления (1–5 атм.) и значения исходной выборки.

Коэффициент детерминации для 2-й модели

$$R^2 = 0,967. \quad (10)$$

Модель 3

Теперь объединим обе модели в одну следующим образом

$$h(p, \sigma^2, \gamma_6) = \theta_0 + \theta_1 p + \theta_2 p^2 + \theta_3 \sigma^2 + \theta_4 \sigma^4 + \theta_5 \gamma_6 + \theta_6 \gamma_6^2 + \theta_7 \gamma_6^3. \quad (11)$$

Аналогично предыдущим двум случаям получим вектор параметров θ :

$$\theta = \begin{bmatrix} -44,5389 \\ -2,3282 \\ 0,2372 \\ -4,2893 \\ 3,0476 \\ 15,2265 \\ -1,5436 \\ 0,0535 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

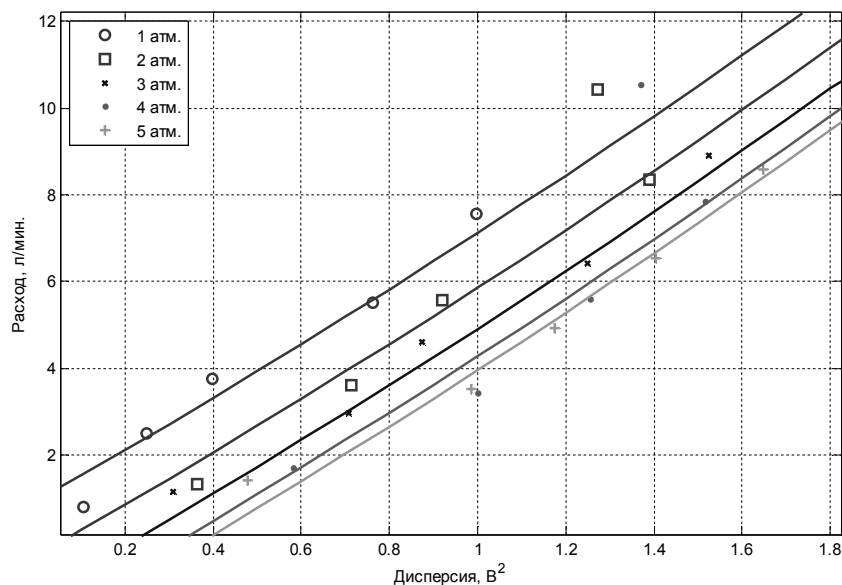


Рис. 5. Зависимость дисперсии сигнала от величины расхода

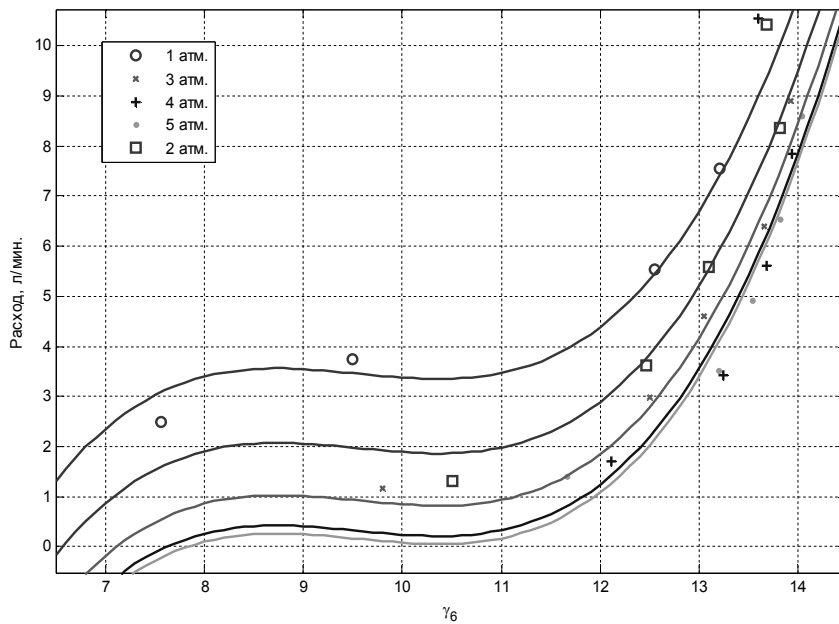


Рис. 6. Зависимость кумулянтного коэффициента γ_6 от величины расхода

и итоговую функцию

$$h(p, \sigma^2, \gamma_6) = -44,5389 - 2,3282p + 0,2372p^2 - 4,2893\sigma^2 + 3,0476\sigma^4 + 15,2265\gamma_6 - 1,5436\gamma_6^2 + 0,0535\gamma_6^3. \quad (12)$$

Коэффициент детерминации для 3-й модели

$$R^2 = 0,983.$$

Тестовое нахождение величин протечек

Проведем тестирование полученных функций на контрольной выборке сигналов, которая, как и обучающая, содержит 25 сигналов, записанных при разных давлениях и уровнях утечки. Результаты оценок протечек приведены в табл. 3.

Таблица 3

Погрешность оценки утечек

	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Средняя погрешность	16 %	17 %	14 %

Выводы

В работе показана возможность оценки величины протечки, возникающей в результате неплотности арматуры трубопровода, по параметрам акустического сигнала.

Одним из достоинств построенных моделей является то, что с их помощью можно получить значение величины протечки не для одного фиксированного значения давления, а для любого в диапазоне от 1 до 5 атмосфер.

Дальнейшие исследования требуют более точного измерения скорости утечки во время эксперимента, так как довольно таки высокая полученная погрешность могла быть следствием неточных экспериментальных измерений.

Список литературы

1. Дробот Ю.Б. Акустическое контактное течеисследование / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешиников, В.Н. Бачегов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
2. Гуревич Д.Ф. Арматура атомных электростанций / Д.Ф. Гуревич, В.В. Ширяев, И.Х. Пайкин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
3. Friedman J. The Elements of Statistical Learning / J. Friedman, T. Hastie, R. Tibshirani. – Springer, 2008. – 739 p.

Поступила в редколлегию 11.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Артеменко, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

МЕТОД ОЦІНКИ ВИТОКУ ВОДИ ЧЕРЕЗ ВУЗЛИ ЗАПИРАЮЧОЇ АРМАТУРИ ТРУБОПРОВОДУ

С.О. Козерук, К.П. Пилипенко

Запропоновано метод вимірювання величини витoku рідини через запираючу арматуру на основі аналізу імовірнісних характеристик акустичного сигналу. Грунтуючись на експериментальних даних, були побудовані аналітичні залежності, що зв'язують величину витoku, тиск в трубопроводі і імовірнісні характеристики сигналу на основі регресійної моделі. В якості критерію якості отриманих моделей був використаний коефіцієнт детермінації. Похибка оцінки величини витoku, отримана за тестовою вибіркою сигналів, склала 14 ... 16%.

Ключові слова: кумулянтні коефіцієнти, закон розподілу, контроль витokів запираючої арматури, регресійна модель.

METHOD OF ESTIMATION OF THROUGH-VALVE LEAKAGE

S.A. Kozeruk, K.P. Pylypenko

The new method of estimation of through-valve leakage based on statistic properties of acoustic signal is presented. Analytical dependence of the value of the leakage on the pressure in the pipeline and the probabilistic characteristics of the signal were constructed based on experimental data using regression model. As a criterion of the quality of the obtained models the coefficient of determination was used. Estimation error of the leakage obtained on a test set of signals was 14...16%.

Keywords: *coefficient, probability distribution, loss control, regression model.*