

# АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ТЕЧИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЯ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Д.М. Швецов\*, Е.Л. Трыков\*, С.Т. Лескин\*\*, А.Ю. Пузаков\*\*

\* АО «НТЦ Дианпром»

109518, Москва, ул. Газгольдерная, 14

\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1



В настоящее время для контроля герметичности оборудования и трубопроводов, а также своевременного обнаружения течей теплоносителя первого контура реакторной установки (РУ) при работе энергоблока на различных уровнях мощности в режимах нормальной эксплуатации и с ее нарушением используются системы акустического контроля течей (например, САКТ). В качестве основных диагностических признаков обнаружения течи в системах используются усредненная по времени дисперсия акустического сигнала. Чувствительность этого признака определяется превышением сигналом заданного порогового значения, которое определяется фоном. При этом фоновые значения акустического сигнала зависят от режимов работы оборудования и зачастую не позволяют определить течь теплоносителя на ранней стадии ее развития.

Представлен новый подход к формированию диагностических признаков обнаружения разгерметизации контура на ранней стадии развития течи теплоносителя.

Методика получения диагностических признаков основана на обработке в различных частотных диапазонах акустического сигнала, сопровождающего истечение теплоносителя из трубопровода, с помощью метода главных компонент.

Эффективность разработанной методики по обнаружению течи теплоносителя демонстрируется на обработке акустических сигналов экспериментальной установки, моделирующей течь теплоносителя при разгерметизации контура.

Чувствительность метода даже при наличии значительного акустического фона позволяет обнаружить течи значительно меньшего расхода (до пяти раз), чем традиционная обработка акустического сигнала.

Реализация разработанной методики не потребует значительных затрат на модернизацию существующих систем контроля течей, работающих в настоящее время на различных АЭС.

**Ключевые слова:** контроль герметичности оборудования, дисперсия акустического сигнала, моделирование течей теплоносителя, метод главных компонент, дополнительные диагностические признаки, распознавание образов.

© Д.М. Швецов, Е.Л. Трыков, С.Т. Лескин, А.Ю. Пузаков, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для контроля герметичности оборудования и трубопроводов, а также своевременного обнаружения течей теплоносителя первого контура РУ при работе энергоблока на различных уровнях мощности в режимах нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации одной из диагностических систем является система акустического контроля течей (САКТ) [1, 2, 9, 13]. В качестве диагностического признака обнаружения течи в этой системе используется усредненная по времени дисперсия акустического сигнала. Чувствительность этого признака определяется превышением сигналом заданного порогового значения, которое определяется фоном. При этом фоновые значения акустического сигнала зависят от режимов работы оборудования и зачастую не позволяют определить течь теплоносителя на ранней стадии ее развития.

В работе рассматриваются дополнительные диагностические признаки и методы их получения, позволяющие более уверенно определять наличие течей в случае малого расхода теплоносителя. Основу формирования дополнительных диагностических признаков составляет теория распознавания образов [12, 15, 17 – 19], которая успешно применяется в различных работах по диагностике оборудования РУ [3 – 8, 10 – 14, 16, 20].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения проводились на экспериментальной установке «Циркуляционная петля» в ИАТЭ НИЯУ МИФИ, предназначенной для проведения работ по исследованию акустических шумов и гидравлических характеристик циркулирующего теплоносителя.

Установка состоит из устройства имитации течи сжатым воздухом и макета теплообменной трубы, предназначенного для изучения характера распространения поверхностных волн в стальной трубе. Макет представляет собой трубу из нержавеющей стали 1X18H10T длиной 5000 мм и диаметром 45×3,5 мм. На одном конце трубы закреплен датчик акустической эмиссии GT301.

Излучателем волн напряжения (имитатор течи) является сопло с калиброванным отверстием, которое размещается на трубе в составе специального приспособления. Шум, возникающий при истечении газа через сопло, имитирует шум течи воды. Система подачи газа состоит из баллона высокого давления, редуктора, мерной емкости, манометра, измеряющего давление газа в мерной емкости, и системы вентилей и сопла.

Процедура калибровки канала расхода газа заключается в измерении величины давления газа, имитирующего рабочее тело.

Из баллона высокого давления заполняется мерная емкость объемом  $V$ , из которой газ стравливается через сопло. При этом генерируются ультразвуковые колебания, возбуждающие поверхностные волны Рэлея. Средний расход газа рассчитывается по формуле

$$G = -VM_N (V_m P_0)^{-1} \cdot dP/dt, \quad (1)$$

где  $G$  – расход газа, кг/с;  $M_N$  – молекулярная масса газа, кг;  $V_m = 22,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;  $P_0$  – величина атмосферного давления, МПа;  $dP/dt$  – скорость спада давления, МПа/с.

Заметим, что данная формула верна только для докритического истечения газа, т.е. для величины  $P \leq 2$  атмосфер. Выше этого значения давление меняется линейно, и расход остается постоянным. Однако формула (1) определяет расход газа как раз в области малых значений, что позволяет проверить чувствительность автоматизированной системы измерений к малым течам.

На рисунке 1 приведены зависимости величины давления в мерной емкости и расхода от времени истечения газа. Истечение газа в данном эксперименте начинается с 12-й секунды. Величина расхода газа имеет физический смысл примерно с 100-й секунды.

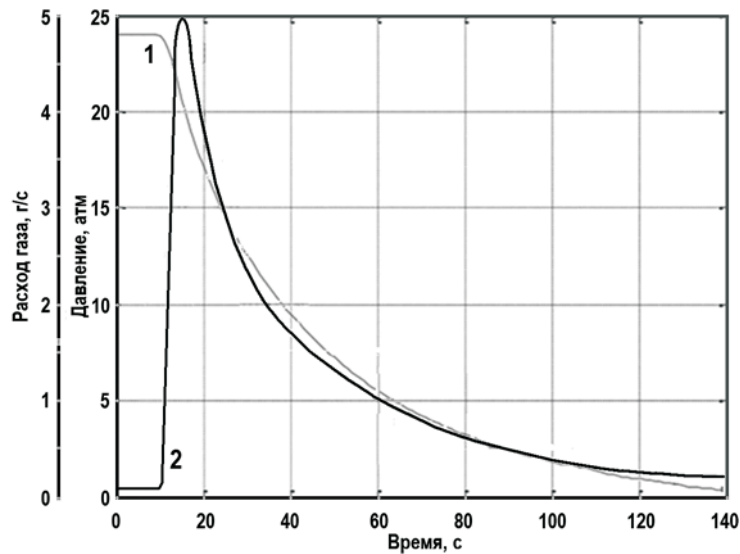


Рис. 1. Зависимости давления и расхода газа от времени при истечении газа: 1 – давление; 2 – расход

### ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД

Обычно для определения течи при диагностике трубопроводов акустическим методом используется две интегральные статистические характеристики – мощность спектра акустического сигнала и средняя частота спектра сигнала.

Мощность спектра

$$M = \sum_{i=1}^N S(F_i),$$

где  $S(F_i)$  – спектральная плотность мощности (СПМ) на частоте  $F_i$ , пропорциональная площади под графиком СПМ и определяемая дисперсией измеряемого акустического сигнала.

Средняя частота спектра  $F_R$  (частота Райса)

$$F_R = \frac{\sum_{i=1}^N F_i \cdot S(F_i)}{\sum_{i=1}^N S(F_i)}$$

определяется формой частотного спектра измеряемого акустического сигнала.

Использование этих диагностических признаков обусловлено следующими фактами:

- при росте течи увеличивается мощность акустического спектра;
- при возникновении течи меняется форма акустического спектра по сравнению с фоновым значением (на начальном этапе возникновения течи происходит резкое смещение центра тяжести акустического спектра в область низких частот);
- по соотношению количественных характеристик – диагностических признаков, характеризующих изменение мощности и формы спектров акустического сигнала для датчиков, установленных в различных точках, возможно проведение оценки величины и ориентировочного местоположения источника течи.

На рисунке 2 приведены дисперсии и средние частоты акустического сигнала датчика. По правой оси показан график расхода газа. Видно, что начиная с 500-й секунды при расходе газа около 0,04 г/с эти диагностические признаки фактически не идентифицируют течь.

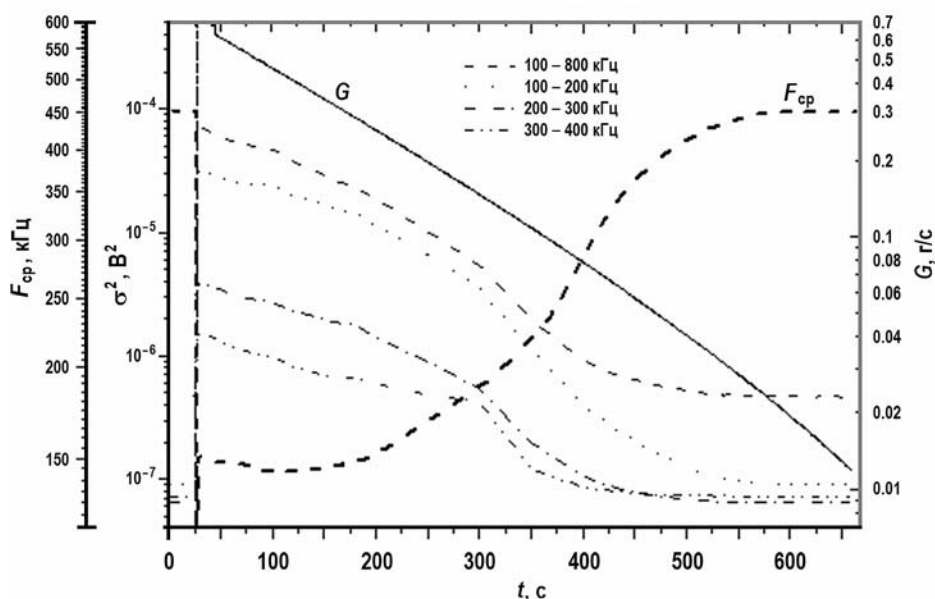


Рис. 2. Средние частоты и дисперсии сигнала акустического датчика в диапазоне от 100 до 800 кГц

### НОВЫЙ ПОДХОД

В предлагаемом подходе в качестве диагностических признаков выбраны отношение энергий сигнала на различных участках спектра мощности, а также отношение текущей средней частоты к средней частоте фона. Поскольку сигнал в различных диапазонах частот затухает по-разному, сделано предположение, что отношения энергий сигналов в различных частотных диапазонах будут более информативными диагностическими признаками, чем полная дисперсия.

Вычислялись энергии сигнала в частотном диапазоне от 100 до 200 кГц ( $E_1$ ), от 200 до 300 кГц ( $E_2$ ), от 300 до 400 кГц ( $E_3$ ) и по всему спектру от 0 до 800 кГц ( $E_4$ ), а также средняя частота спектра  $F_R$ . Эти величины вычислялись путем усреднения сигнала по временному интервалу в одну секунду. Частота дискретизации измерений  $F_s = 2$  МГц. Из этих величин строились диагностические признаки следующим образом: брались различные отношения  $P_i = E_{i1}/E_{i2}$ ,  $i = 1 - 8$  ( $i_1$  и  $i_2$  – различные комбинации парциальных энергий), а также  $P_9 = F_R/F_{\text{фона}}$ .

Признаки необходимо привести к одному масштабу, чтобы осуществить их анализ и построить ковариационную матрицу. Для этого к каждому признаку применена формула

$$P^* = (P - \mu)/\sigma, \quad (2)$$

где дисперсия  $\sigma$  и матожидание  $\mu$  вычисляются по текущему временному окну.

Отмасштабированные признаки показаны на рис. 3. В таком представлении значительно лучше видно их отличие от фоновых значений. Фактически они совпадают с фоном только к 640-й секунде течи.

Построим ковариационную матрицу для признаков в  $i$ -й момент времени

$$C_{ij} = \sum_{j=1}^N P^*_{ij} \times P^{*T}_{ij} - M_i \times M^T_j, \quad (3)$$

а затем вычислим ее собственные значения, которые по сути являются дисперсиями признаков в новом пространстве:

$$\Lambda Q = CQ, \quad (4)$$

где  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$  – собственные значения матрицы ковариации;  $Q = (q_1, \dots, q_N)$

– соответствующие собственные векторы матрицы ковариации.

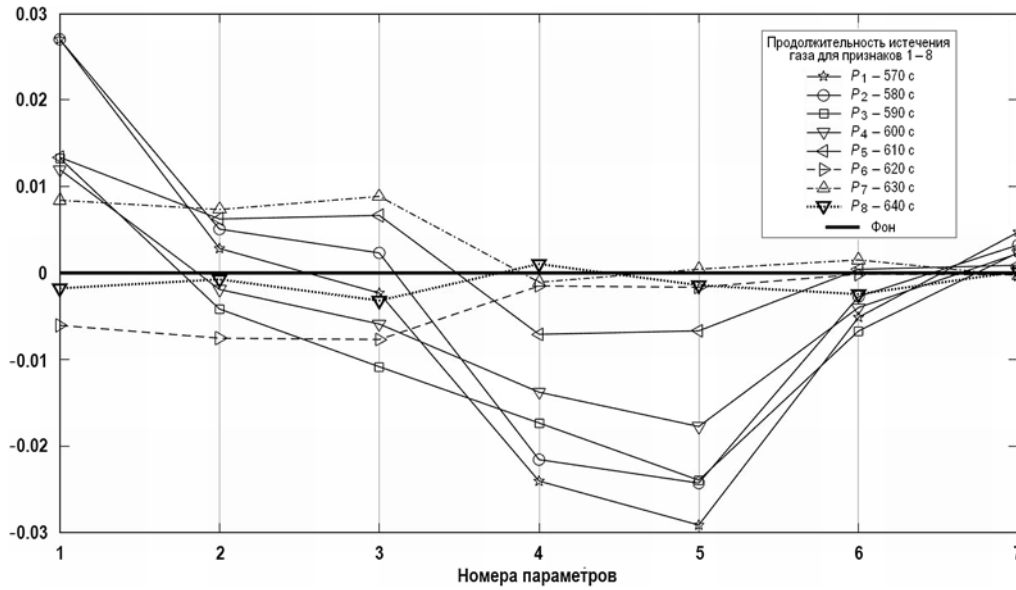


Рис. 3. Нормированные диагностические признаки акустического датчика в различные моменты времени

Для вычисления ковариационной матрицы все признаки  $P_i$  усреднялись в рамках текущего временного окна, которое равнялось 10-ти секундам, т.е. в каждый момент времени брались признаки  $P_{ij}$  за последние 10 с, где  $i$  – номер признака, а  $j$  – его временная метка в пределах текущего временного окна. Именно усреднение по временному окну и означает суммирование в формуле (3).

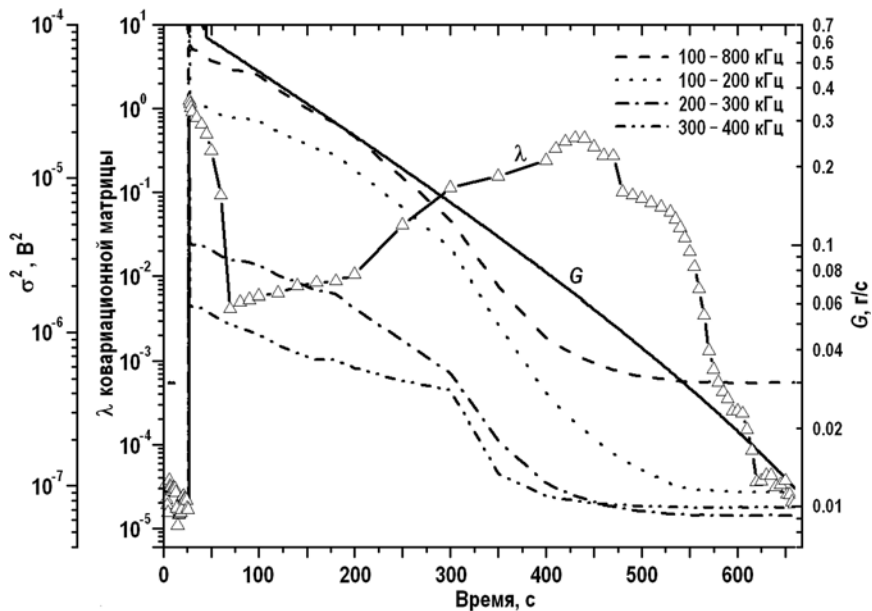


Рис. 4. Сравнение изменения наибольшего собственного значения ковариационной матрицы (НСЗКМ) во времени с дисперсиями сигналов [17]

На рисунке 4 показано сравнение изменения наибольшего собственного значения ковариационной матрицы [17] (НСЗКМ) во времени с дисперсиями сигналов, а также расход течи в г/с. Из рисунка видно, что использование в качестве признака НСЗКМ для

контроля течи оказывается более чувствительным, чем дисперсия сигнала или средняя частота спектра. Индикация течи при использовании НСЗКМ происходит при расходе  $\sim 0,015$  г/с, в то время как при индикации течи с помощью дисперсии сигнала – при расходе  $\sim 0,04$  г/с.

Таким образом, индикация течи с использованием НСЗКМ повышает чувствительность к обнаружению течи более чем в два раза. На рисунке 5 приведены результаты индикации течи в представлении главных компонент ковариационной матрицы.

Обращает на себя внимание тот факт, что НСЗКМ имеет достаточно большое значение в области расхода теплоносителя, где традиционные диагностические признаки (дисперсия и средняя частота спектра) уже экспоненциально затухают. Поэтому можно ожидать, что при наличии внешних шумов (помехи) метод, использующий НСЗКМ, покажет гораздо большую чувствительность к течи, чем традиционные диагностические признаки.

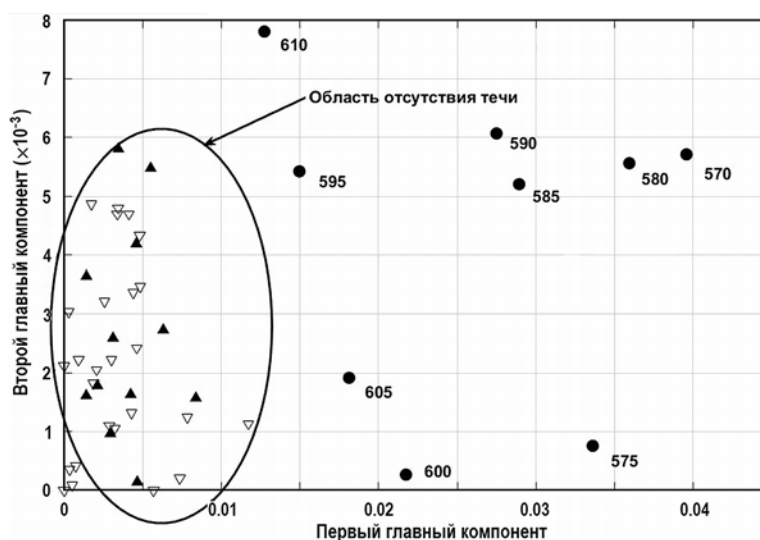


Рис. 5. Развитие течи во времени в представлении главных компонент ковариационной матрицы: треугольники – состояние отсутствия течи (с вершиной вниз – до ее возникновения, с вершиной вверх – после ее затухания); диски – состояние течи в соответствующие моменты времени

Для подтверждения этого факта была решена модельная задача. К сигналу, имитирующему течь, был добавлен сигнал белого шума с дисперсией  $1 \cdot 10^{-2} \text{ В}^2$ .

Сравнение изменения наибольшего собственного значения ковариационной матрицы во времени с дисперсиями сигналов и средней частотой спектра показано на рис. 6 и 7. Видно, что использование в качестве признака НСЗКМ существенно повышает чувствительность к течи по сравнению с дисперсией сигнала или средней частотой спектра. Индикация течи при использовании НСЗКМ происходит при величине расхода  $\sim 0,02$  г/с, в то время как при индикации течи с помощью дисперсии сигнала или средней частоты спектра – при  $\sim 0,1$  г/с. То есть при использовании НСЗКМ чувствительность повышается примерно в пять раз.

Практическое применение данного подхода на реальных системах контроля течи может осуществляться при использовании широкополосных акустических датчиков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный новый подход позволяет повысить чувствительность систем контроля течи к малым течам, хотя и требует проведения экспериментов для реальных течей нагретого теплоносителя.

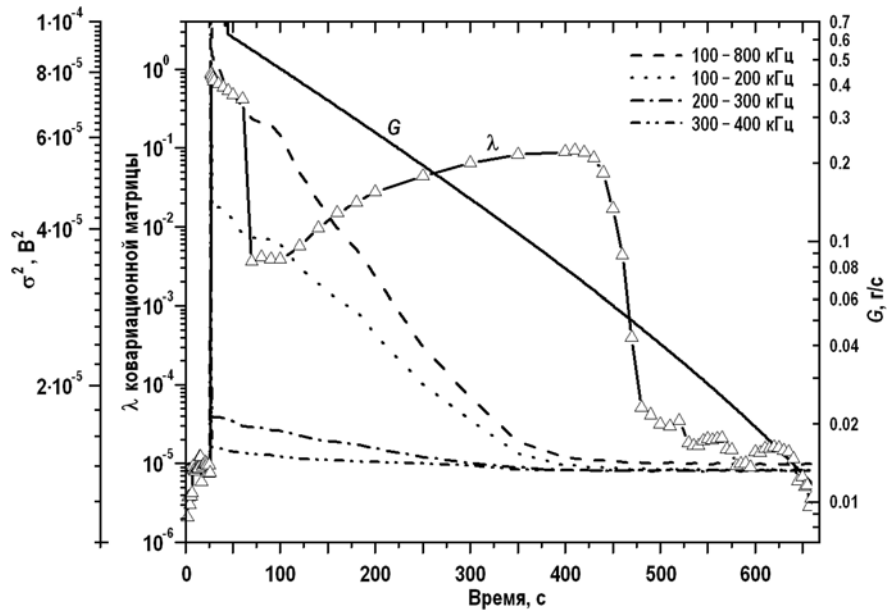


Рис. 6. Сравнение изменения НСЗКМ во времени с дисперсиями сигналов при наложении на сигнал белого шума

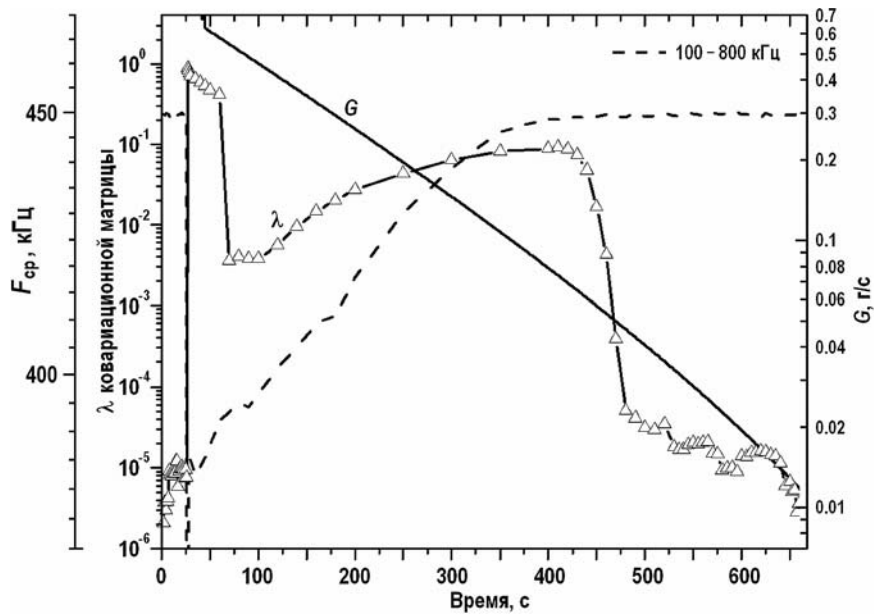


Рис. 7. Сравнение изменения НСЗКМ во времени со средними частотами сигналов

В случае наличия фоновых шумов чувствительность предложенного метода к малой течи увеличивается по сравнению с традиционным подходом до пяти раз.

Реализация предложенного подхода не потребует значительных затрат на модернизацию существующих систем контроля течи, работающих в настоящее время на различных АЭС.

### Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391с.
2. Weiss S., Reagan W., Roe J. Experience with operator aids for nuclear power plants in the



USA. In: Proc. Intern. Conf. on Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15-19.02.1988. – Vienna. – 1988. – PP. 323-329.

3. *Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С.* Анализ состояния ГЦН ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 12 - 22.

4. *Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С., Кашин Д.Ю.* Анализ состояния насосов систем безопасности по данным измеряемых параметров при их испытании // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 42 - 50.

5. *Ujita Hiroshi.* A probabilistic analysis method of evaluate the effect of human factors on plant safety. // Nucl. Tehnol. – 1986. – Vol. 76. – No. 3. – PP. 370-376.

6. Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications / Ed. by Patton R., Frank P., Clarc R. – Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NY, 1989. – 360 p.

7. *Willsky A.S.* A Survey of design methods for failure detection in dynamic systems // Automatica. – 1976. – Vol. 12. – PP. 601-611.

8. *Iserman R.* Process fault detection based on modeling end estimation methods – a survey // Automatica. – 1984. – Vol. 20. – No. 4. – PP. 387-404.

9. *Basseville M.* Detecting changes in signal and systems – a survey // Automatica. – 1988. – Vol. 24. – No. 3. – PP. 309-326.

10. *Frank P.M.* Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results // Automatica. – 1990. – Vol. 26. – No. 3. – PP. 459-474.

11. *Reisen C., Marshall E.* Evaluating operator support system in realistic conditions at hammlab // Nuclear Engineering International. – 1988. – Vol. 33. – No. 402. – PP. 39-41.

12. *Абагян А.А., Дмитриев В.М., Клебанов Л.А., Крошилин А.Е., Ларин Е.П., Морозов С.К.* Система контроля и диагностики режимов работы энергоблока АЭС. // Атомная энергия. – 1987. – Т. 63. – Вып. 5. – С. 311-315.

13. *Herbert M.R.* A review of on-line diagnostic aids for nuclear power plant operators. // Nucl. Energy. – 1984. – Vol. 23. – No. 4. – PP. 259-264.

14. *Павелко В.И.* Обзор приложений методологии экспертных систем в атомной энергетике. // Атомная техника за рубежом – 1990. – Вып. 11. – С.1-8.

15. *Дж. Ту, Р.Гонсалес.* Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 412 с.

16. *Urig Robert E.* Potential application of nuclear networks to nuclear power plants. Proc. Amer. Power Conf. Vol. 53. Pt. 2 53-rd. Annu Meet., Chicago, Ill., Apr. 29-May 1. 1991. – PP. 946-951.

17. *Fukunaga K.* Introduction to statistical pattern recognition. – Academic Press, New York and London, 1972. – 375 p.

18. Классификация и кластер. Под ред. Дж. Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980. – 365 с.

19. *Tao Gu, Tou J.T.* A new criterion for optimal classification. // Pattern Recognition. – 1982. – No. 2. – PP. 1063-1065.

20. *Лескин С.Т.* Разработка алгоритмов распознавания аномалий в состоянии оборудования АЭС по анализу данных оперативного технологического контроля. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 4-12.

Поступила в редакцию 29.05.2017 г.

#### Авторы

Швецов Дмитрий Матвеевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

E-mail: shvet@ippe.ru

Трыков Евгений Львович, начальник лаборатории комплексной диагностики, д.ф.-м.н.

E-mail: kkkk62@mail.ru

Лескин Сергей Терентьевич, профессор, д.т.н.

E-mail: STLeskin@mephi.ru

Пузаков Алексей Юрьевич, старший преподаватель

E-mail: lex148@yandex.ru



## **ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS OF LEAK FOR INCREASES IN SENSITIVITY OF CONTROL DUE TO CREATION OF EFFECTIVE DIAGNOSTIC FEATURES**

Shvetsov D.M. \*, Trykov E.L. \*, Leskin S.T.\*\* , Puzakov A.Yu.\*\*

\* JSC «NTTS Diaprom»

14 Gasholdermaya str., Moscow, 109518 Russia

\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPHI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga Reg., 249030 Russia

### ABSTRACT

Currently, to monitor the integrity of equipment and pipelines, and timely detection of leaks from the primary coolant of the reactor facility during operation of the unit at different power levels in normal operation and a disruption of the normal operation systems are used for acoustic control leak (SACL). As the main diagnostic features of leak detection systems used, the dispersion of acoustic signal and its average frequency. The sensitivity of these features is determined by the signal exceeding a predetermined threshold value, wherein the threshold value is determined by the background. Background values of the acoustic signal depend on the mode of operation of the equipment and often do not allow to determine the flow of the coolant at an early stage of its development.

The paper presents a new approach to the formation of diagnostic features detection of leaks in the circuit at an early stage of development of leaks of the coolant.

The method of obtaining diagnostic features based on processing the acoustic signal accompanying the expiration of the coolant from the tubing, in different frequency ranges using the method of principal components.

The efficiency of the developed technique to detect leaks of the coolant is demonstrated on the processing of acoustic signals of the experimental device and simulation flow of coolant during depressurization of the circuit.

The sensitivity of the method even in the presence of significant acoustic background allows to detect leaks much lower consumption (up to five times) than the traditional processing of the acoustic signal.

Implementation of the developed technique does not require significant expenses on modernization of existing control systems, leaks, currently working on various nuclear power plants.

**Key words:** leakage test equipment, dispersion of the acoustic signal, modeling of leaks of the coolant, the method of main components, additional diagnostic signs, pattern recognition.

### REFERENCES

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Systems diagnosis of VVER. Moscow. Energoatomisdat Publ., 2010. 391p. (in Russian).
2. Weiss S., Reagan W., Roe J. Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA. In: Proc. Intern. Conf. on Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15-19.02.1988, Vienna, 1988, pp. 323-329.
3. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of VVER-1000 main circulation pump condition in operation. *Izvestiya vusov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 4, pp. 12-22 (in Russian).
4. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S., Kashin D.Yu. Analysis of safety system pumps conditions based on their testing results. *Izvestiya vusov. Yadernaya energetika*. 2017, no. 1,

pp. 42-50 (in Russian).

5. Ujita Hiroshi. A probabilistic analysis method of evaluate the effect of human factors on plant safety. *Nucl. Tehnol.*, 1986, v. 76, no. 3, pp. 370-376.

6. *Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications*. Ed. by Patton R., Frank P., Clarc R. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NY, 1989. 352 p.

7. Willsky A.S. A Survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*. 1976, v. 12, pp. 601-611.

8. Iserman R. Process fault detection based on modeling end estimation methods – a survey. *Automatica*. 1984, v. 20, no. 4. pp. 387-404.

9. Basseville M. Detecting changes in signal and systems – a survey. *Automatica*. 1988, v. 24, no. 3, pp. 309-326.

10. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results. *Automatica*. 1990. v. 26, no. 3, pp. 459-474.

11. Reisen C., Marshall E. Evaluating operator support system in realistic conditions at hammlab. *Nuclear Engineering International*. 1988, v. 33, no. 402, pp. 39-41.

12. Abagyan A.A., Dmitriev V.M., Klebanov L.A., Kroshilin A.E., Larin E.P., Morozov S.K. System for monitoring and diagnostics of NPP unit operational conditions. *Atomnaya energiya*. 1987, v. 63, pp. 311-315 (in Russian).

13. Herbert M.R. A review of on-line diagnostic aids for nuclear power plant operators. *Nucl. Energy*. 1984, v. 23, no. 4, pp. 259-264.

14. Pavelko V.I. Review of application of expert methodology systems for nuclear power engineering. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*. 1990, v. 11, pp. 1-8 (in Russian).

15. Tu J., Gonsales R. *Pattern recognition principles*. Moscow. MIR Publ., 1978. 412 p. (in Russian).

16. Urig Robert E. Potential application of nuclear networks to nuclear power plants. Proc. Amer. Power Conf. V. 53. Pt. 2 53-rd. Annu Meet., Chicago, III., Apr. 29-May 1. 1991. pp. 946-951.

17. Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic press, New York and London, 1972, 375 p.

18. Classification and clustering. Ed. by J. van Ryzin. Moscow. MIR Publ., 1980, 365 p. (in Russian).

19. Tao Gu, Tou J.T. A new criterion for optimal classification. *Pattern Recognition*, 1982, no. 2, pp. 1063-1065.

20. Leskin S.T. Algorithm development for abnormality detection of NPP equipment conditions based on technological testing results. *Izvestia vusov. Yadernaya energetika*, 1997, no. 4, pp. 4-12 (in Russian).

#### Authors

Shvetsov Dmitryu Matveevich, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: shvet@ippe.ru

Trykov Evgeny L'vovich, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kkkk62@mail.ru

Leskin Sergey Terent'evich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: STLeskin@mephi.ru

Puzakov Aleksey Yuryevich, Senior Teacher

E-mail: lexx148@yandex.ru